

Т

ISSN 1992-3252

ТРАНСПОРТА

**WORLD OF TRANSPORT
AND TRANSPORTATION**

5 2019
Том / Vol. 17



**МЦК: ИСТОРИЯ,
СОВРЕМЕННОСТЬ, РАЗВИТИЕ**

**THE MOSCOW CENTRAL CIRCLE:
THE HISTORY, THE PRESENT
AND THE FUTURE**



Стр./р. 58



«ТРАНСПОРТ РОССИИ. СКВОЗЬ ВРЕМЯ – В БУДУЩЕЕ»

В музее современной истории России 2 октября 2019 года торжественно открылась выставка «Транспорт России. Сквозь время – в будущее».

В открытии приняли участие помощник Президента России Игорь Левитин, министр транспорта Евгений Дитрих, министр культуры Владимир Мединский, директор музея современной истории России Ирина Великанова.

Выставочно-просветительский проект, организованный Министерством транспорта, приурочен к 210-летию транспортного ведомства и отраслевой системы профессионального образования.

Евгений Дитрих подчеркнул, что «экспозиция позволяет глубже погрузиться в то время, когда транспорт только начинался,

и никто не знал, каким он будет завтра. Это дань традициям, зародившимся более 200 лет назад, и тем людям, которые прикладывали усилия для совершенствования транспортной системы российского государства».

Представлены экспонаты из ряда ведущих российских музеев, исторических обществ, компаний, а также частных коллекций, материалы отраслевых учебных заведений, в том числе Российского университета транспорта, МГТУ ГА, МАДИ.

По материалам и с использованием фотографий Министерства транспорта России: <https://www.mintrans.ru/press-center/news/9289>; <https://history.mintrans.ru/exhibition.html>●

«TRANSPORT OF RUSSIA: THROUGH TIME TO THE FUTURE»

The Museum of Contemporary History of Russia hosted on October 2, 2019, the inauguration ceremony of the exhibition «Transport of Russia: Through Time to the Future». The ceremony was attended by Igor Levitin, Aide to the President of Russia, Evgeny Ditrich, Minister of Transport, Vladimir Medinsky, Minister of Culture, and Irina Velikanova, director of the Museum of Contemporary History of Russia.

The exhibition and educational project has been organized by the Ministry of Transport to celebrate the 210th anniversary of the establishment of the single transport department and the system of transport education and training.

Evgeny Ditrich pointed out that «the exposition allows you to plunge deeper into the history and feel yourself at the time when the transport was at its origins, and no one knew

what it would be like after. It is a tribute to the traditions that originated more than 200 years ago and to those people who made efforts to improve the transport system of the Russian state».

Exhibits were provided by leading Russian museums, historical societies, companies, and private collections, as well as by transport educational institutions, comprising the Russian University of Transport, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University.

Photos used and the text compiled based on the news of the Ministry of Transport of Russia: <https://www.mintrans.ru/press-center/news/9289>; <https://history.mintrans.ru/exhibition.html>●

ТРАНСПОРТ МИР

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

5²⁰¹⁹
(84)

Издаётся
Российским университетом
транспорта.
Учреждён МИИТ
в 2003 году

Редакционный совет:

Б. А. Лёвин – доктор технических наук, профессор РУТ – председатель совета

В. В. Виноградов – доктор технических наук, профессор РУТ

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

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

Б. В. Гусев – член-корреспондент Российской академии наук

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

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

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 Казахской академии транспорта и коммуникаций

Б. М. Лапидус – доктор экономических наук, профессор

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

Тамара БУНЬКОВА

Математическое описание процесса изнашивания пары «колесо–рельс» 6

Максим ЖЕЛЕЗНОВ, Олег КАРАСЕВ, Сергей ТРОСТЬЯНСКИЙ, Егор ШИТОВ

Критические технологии в системе научно-технологических приоритетов железнодорожной отрасли: мировой опыт 16

Анатолий БОНДАРЕНКО, Сергей ОРЛОВ, Владимир КАРАБАНОВ

Установление зависимости изменений нормальных напряжений от степени износа рельса 38

НАУКА И ТЕХНИКА

Василий ЧЕРЕМИСИН, Владислав НЕЗЕВАК

Эффективность применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце 58

Сергей БЕСПАЛЬКО, Елена КУРЗИНА, Ангелина КУРЗИНА, Иса ЖАЙСАН

Влияние жёсткости демпфирующего подрельсового элемента на параметры многомассовой колебательной системы «вагон–путь»... 78

Александр МАРАСАНОВ, Александр ШЕЙКИН, Иван АЛФЕРОВ

Взаимодействие столбчатых фундаментов с мёрзлым грунтом 96

Николай ОСТРОУХОВ, Екатерина ЧУМАКОВА

Возможности применения мультимодульных плавсредств-трансформеров в процессах освоения Мирового океана 114

ЭКОНОМИКА

Олег ТАРОВИК, Ольга МУДРОВА

Расчётная оценка стоимости транспортировки малотоннажного СПГ 130

Сергей ПАСТУХОВ

Совершенствование бизнес-аналитики в управлении на транспорте 164

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Евгения ПРОКОФЬЕВА, Виталий ПАНИН

Единые принципы организации эксплуатационной работы железнодорожных грузовых перевозок 186

Михаил ПРОКОФЬЕВ, Махмуджон ТОХИРОВ

Перспективы транспортного коридора «Север–Юг» 200

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Б. А. ЛЁВИН –
главный редактор
Е. Ю. ЗАРЕЧКИН –
первый 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
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
В. М. ФРИДКИН –
д.т.н., старший научный сотрудник РУТ
В. А. ШАРОВ –
д.т.н., профессор РУТ
А. К. ШЕЛИХОВА –
руководитель редакции

РЕДАКЦИЯ

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

При перепечатке ссылка на журнал «Мир транспорта» обязательна.

© «Мир транспорта», 2019

Арай РАМАЗАНОВА

Оптимизация месторасположения транспортно-логистических центров на примере Республики Казахстан 214

Алексей ПОПОВ, Ольга СУСЛОВА, Артем ХМЕЛЕВ

Информационная система контроля сырьевых грузов металлургического предприятия. 228

Григор ЧИБУХЧЯН

Проблемы развития общественного транспорта в Ереване 244

Филипп АКОПОВ, Анастасия ХОРОШИЛОВА, Юлия ФАДДЕЙКИНА

Вопросы проектирования и реформирования маршрутных сетей городского наземного пассажирского транспорта общего пользования. 254

Дмитрий МОРОЗ, Светлана ТИТОВА, Александр ЧЕРНЫШЕВ

Применение методов анализа пассажиропотоков к реформированию пассажирской транспортной системы района Левобережный города Москвы 268

БЕЗОПАСНОСТЬ

Светлана ШВЕЦОВА, Алексей ШВЕЦОВ

Анализ безопасности при перевозке грузов беспилотными летательными аппаратами 286

Михаил ИВАШЕВСКИЙ

Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте 298

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Марина ПОТЁМКИНА, Михаил ГРЯЗНОВ,

Татьяна ПАШКОВСКАЯ, Егор ТИМОФЕЕВ

Роль трамвайного движения в формировании транспортной системы Магнитогорска 316

Пресс-архив. Новые магистрали и мультимодальное взаимодействие в 1909 году 326

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Симон ИЛИЗАРОВ

Движение к будущему через познание прошлого: о курсе истории транспорта России. 332

Авторефераты диссертаций 337

Новые книги о транспорте 339

Экспресс-информация. Проект «ИНТЕРТРАН». 199

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. Тираж 500 экз. Цена свободная.

Подписной индекс в каталоге Агентства «Роспечать»

«Газеты. Журналы» – 80812.

Отпечатано с оригинал-макета: Книжная типография «Буки Веди».

115093, г. Москва, Партийный переулок, д. 1, корп. 58, стр. 2.

8 (495) 926-63-96, <http://bukivedi.com>, Info@bukivedi.com

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>, или на web-сайте Российского университета транспорта по адресу: <http://www.mii.ru>.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования.

World of Transport and Transportation

•THEORY
•HISTORY
•ENGINEERING
OF THE FUTURE

Vol. 17²⁰¹⁹
Iss. 5

**The journal is published
by Russian University
of Transport.**

Founded in 2003 by MIIT.

Editorial council:

Boris A. Lyovin, D.Sc. (Eng),
professor of Russian University of
Transport, chairman

Alexander C. Golovnich, D.Sc.
(Eng), associate professor of
Belarusian State Transport
University

Alexander A. Gorbunov, D.Sc.
(Pol), professor of Russian
University of Transport

Boris V. Gusev, corresponding
member of the Russian Academy
of Sciences

Nikolay A. Duhno, LL.D.,
professor of Russian University of
Transport

Dmitry G. Evseev, D.Sc. (Eng),
professor of Russian University of
Transport

Vladimir I. Kolesnikov, member
of the Russian Academy of
Sciences, professor of Rostov
State University of Railway
Engineering

Constantine L. Komarov, D.Sc.
(Eng), professor of Siberian State
University of Railway Engineering

Bakytzhan M. Kuanyshiev,
D.Sc. (Eng), professor of Kazakh
Academy of Transport and
Communications

Boris M. Lapidus, D.Sc. (Econ),
professor

Dmitry A. Macheret, D.Sc.
(Econ), professor of Russian
University of Transport, first deputy
chairman of the United scientific
council of JSC Russian Railways

Leonid B. Mirotin, D.Sc. (Eng),
professor of Moscow State
Automobile and Road Technical
University

Taisiya V. Shepitko, D.Sc. (Eng),
professor of Russian University of
Transport

Aleksander V. Sladkowski,
D.Sc. (Eng), professor of Silesian
University of Technology (Republic
of Poland)

Yuriy I. Sokolov, D.Sc. (Econ),
professor of Russian University of
Transport

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

Valentin V. Vinogradov, D.Sc.
(Eng), professor of Russian
University of Transport

CONTENTS

Page numbering below refers to the texts in English

THEORY

Tamara G. BUNKOVA

Mathematical Description of Wheel–Rail Wear Process 11

Maxim M. ZHELEZNOV, Oleg I. KARASEV,

Sergey S. TROSTYANSKY, Egor A. SHITOV

Critical Technologies in the System of Science and Technology

Priorities of the Railway Industry: Global Experiences 27

Anatoly N. BONDARENKO, Sergey E. ORLOV, Vladimir I. KARABANOV

Determining Dependence of the Change in Normal Stresses

in Rail on Its Wear Degree 48

SCIENCE AND ENGINEERING

Vasily T. CHEREMISIN, Vladislav L. NEZEVAK

Efficiency of Electric Energy Storage Systems

on the Moscow Central Circle. 68

Sergey V. BESPALKO, Elena G. KURZINA,

Angelina M. KURZINA, Issa Zh. ZHAISAN

The Influence of the Stiffness of the Elements of Rail Damping

on the Parameters of the Multi-Mass Wagon–Track Vibratory System. 87

Alexander I. MARASANOV, Alexander A. SHEIKIN, Ivan V. ALFEROV

Interaction of Post Foundations and Frozen Soils 105

Nikolai N. OSTROUKHOV, Ekaterina V. CHUMAKOVA

Potentiality of Multi-Modular Transformer Watercrafts

for Ocean Exploration 122

ECONOMICS

Oleg V. TAROVIK, Olga M. MUDROVA

Estimated Transportation Cost of Low-Tonnage LNG 148

Sergey S. PASTUKHOV

Development of Business Intelligence in Transport Management 175

ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL

Evgeniya S. PROKOFIEVA, Vitaly V. PANIN

Uniform Principles of Organization of Rail

Freight Transportation Operations 193

Mikhail N. PROKOFIEV, Mahmudjon M. TOKHIROV

Prospects for North–South Transport Corridor. 207

EDITORIAL BOARD

Boris A. LYOVIN,
editor-in-chief
Evgeny Yu. ZARECHKIN,
first deputy editor-in-chief

BOARD MEMBERS

Evgeny S. ASHPIZ,
D.Sc. (Eng), associate professor
of Russian University of Transport
Leonid A. BARANOV,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport
Alexander M. BELOSTOTSKIY,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport
Galina V. BUBNOVA,
D.Sc. (Econ), professor of Russian
University of Transport
Yuriy A. BYKOV,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport
Victor S. FEDOROV,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport
Vladimir M. FRIDKIN,
D.Sc. (Eng), senior researcher
of Russian University of Transport
Victor A. GRECHISHNIKOV,
D.Sc. (Eng), associate professor
of Russian University of Transport
Valeriy I. KONDRASHENKO,
D.Sc. (Eng), senior researcher
of Russian University of Transport
Alexey A. LOKTEV,
D.Sc. (Phys.-Math.),
professor of Russian University
of Transport
Svyatoslav Y. LUTSKIY,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport
Oleg E. PUDOVNIKOV,
D.Sc. (Eng), associate professor
of Russian University of Transport
Victor A. SHAROV,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport
Alla K. SHELIKHOVA,
head of editorial office
Vladimir N. SIDOROV,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport
Natalia P. TERYOSHINA,
D.Sc. (Econ), professor of Russian
University of Transport
Vladimir B. ZVLYOV,
D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

EDITORIAL STAFF

Ivan A. GLAZOV,
editor
Natalia C. OLEJNIK,
editorial secretary
Maria V. MASLOVA,
translator

© Mir Transporta
© World of Transport
and Transportation
© English translation
© 2019. All rights reserved.

Aray RAMAZANOVA

Optimization of Location of Transport and Logistics Centers
at the Example of the Republic of Kazakhstan 221

Alexey T. POPOV, Olga A. SUSLOVA, Artem S. KHMELEV

Information System for Control of Raw Material Transportation
of an Iron and Steel Plant 236

Grigor S. CHIBUKHCHYAN

Problems of Development of Public Transport in Yerevan. 249

Philipp V. AKOPOV, Anastasia D. KHOROSHILOVA, Yuliya S. FADDEYKINA

Issues of Designing and Restructuring the Route Networks
of Public Passenger Urban Ground Transport 261

Dmitry G. MOROZ, Svetlana S. TITOVA, Alexander A. CHERNYSHEV

Application of Passenger Flow Analysis Methods
to Restructuring the Passenger Transport System of the Levoberezhny
District of Moscow. 277

SAFETY AND SECURITY

Svetlana V. SHVETSOVA, Alexey V. SHVETSOV

Safety Analysis of Goods Transportation by Unmanned Aerial Vehicles. . . 292

Mikhail R. IVASHEVSKY

Video Surveillance Systems for Railway Transport 307

HISTORY WHEEL

Marina N. POTYOMKINA, Mikhail V. GRYAZNOV, Tatyana G. PASHKOVSKAYA, Egor A. TIMOFEEV

Role of Tram Transit in Formation of Magnitogorsk Transportation
System (1930–1955) 321
News from the Archives. Projects of new main railways and multimodal
interaction in 1909 329

BIBLIO-DIRECTIONS

Simon S. ILIZAROV

Moving to the Future by Studying the Past: on the Course
in the History of Transport in Russia. 335
Abstracts of D.Sc. and Ph.D. theses 338
New Books on Transport and Transportation 340
Express Information. INTERTRAN Project 199

Published quarterly since 2003. Bimonthly since 2013.
84 issues have been published since 2003.

Current issues are circulated in 500 hard copies; the journal is distributed by subscription and delivered by the editor to Russian and foreign technical and transport universities, national and regional technical libraries, government and public bodies, transport companies.

Each article in the journal consists of a Russian text and of an English text, fully identical in contents, both accompanied by abstracts, keywords, references and information about the authors.

Information for the authors and editorial politics are available at the media page of the Web site of Russian University of Transport at http://miit.ru/portal/page/portal/en/about/media/world_of_transport and at the Web site <https://mirtr.elpub.ru/jour>.

The open accessed full texts of the articles as well as the abstracts and key information in English are available at the Web site of the Russian scientific electronic library at <http://elibrary.ru> (upon free registration) and the Web site <https://mirtr.elpub.ru/jour>.

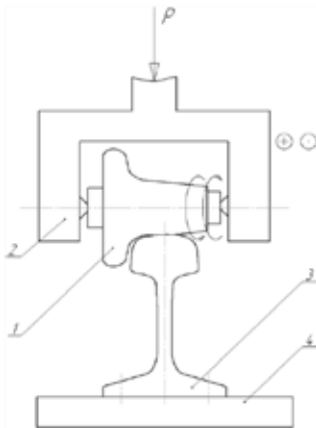
The journal is part of Russian scientific citation index system.

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.



КОЛЕСО-РЕЛЬС 6

Математическая модель соотношения жёсткости пары «колесо-рельс» и расчёты износа.



ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ 16

Обзор мирового опыта развития и применения критических технологий на транспорте.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИНФРАСТРУКТУРЫ 38

Зависимости нормальных напряжений от степени износа рельса.

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ • THEORY



WHEEL-RAIL 11

Mathematical model of the ratio of the hardness within the wheel-rail couple and the simulation of the wear processes.

HI-TECH 27

A review of global expertise in development and implementation of critical technologies in transport and transportation fields.



LIFE CYCLE OF INFRASTRUCTURE 48

Dependence of the normal stress on the rail wear magnitude.



Математическое описание процесса изнашивания пары «колесо–рельс»



Бунькова Тамара Геннадьевна – Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия.*

Тамара БУНЬКОВА

Статья посвящена одной из актуальнейших проблем – определению оптимального соотношения твёрдости пары «колесо–рельс». Продолжительность службы колёс и рельсов в значительной степени обуславливается твёрдостью стали, используемой для их изготовления. Это подтверждается достаточно большим числом исследований, проведённых в нашей стране и за рубежом. Однако многие работы по изучению зависимости износостойкости от твёрдости проводились только на образцах из колёсной или рельсовой стали без должной оценки степени влияния прочности одного элемента на износостойкость другого в паре, моделирующей работу колеса и рельса.

Цель настоящей работы заключается в установлении оптимума между прочностными характеристиками железнодорожного колеса и рельса с учётом режимов эксплуатации. Пара «колесо–рельс» рассматривается как система. Была разработана математическая модель процесса изнашивания пары трения «колесо–рельс». При математическом моделировании использовался некомпозиционный ротатбельный план второго порядка. В статье представлены результаты исследований интенсивности изнашивания колеса и рельса и рекомендации по выбору осевой нагрузки и скорости движения подвижного состава.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, пара «колесо–рельс», математическое моделирование, соотношение твёрдости, изнашивание.

*Информация об авторе:

Бунькова Тамара Геннадьевна – инженер кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава, преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, bunkovatg@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 02.05.2019, актуализирована 01.10.2019, принята к публикации 17.10.2019.

For the English text of the article please see p. 11.

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика определения оптимального соотношения твёрдости в системе «колесо—рельс» существует ещё с момента возникновения железных дорог. Из триботехники известно, что лучшую износостойкость в трущейся паре проявляют металлы с примерно одинаковой твёрдостью. Но на протяжении многих лет в России соотношение твёрдости материала колеса и рельса менялось. В связи с этим требуются экспериментальные исследования в данной области.

Проведённый анализ существующей в настоящее время твёрдости цельнокатаного колеса и железнодорожного рельса по данным отечественных и зарубежных статей показал, что максимальная твёрдость колеса — в таких странах, как США, Бразилия, Канада (390 НВ), а рельса — в России (401 НВ). Оптимальное соотношение твёрдости материала колеса и рельса в России минимальное (0,86), а в странах Европы — максимальное (1,1) [1].

На рис. 1 представлены соотношения прочностных характеристик колеса и рельса по странам.

С целью определения рационального соотношения твёрдости пары трения «колесо—рельс» были проведены экспериментальные исследования с использованием установки на базе токарно-винторезного станка модели 1К62. В качестве образцов колеса использовались ролики из материала цельнокатаного колеса, а в качестве имитатора рельса — диск, изготовленный из материала рельса Р65. Твёрдость модели рельса оставалась постоянной и равной 401 НВ, что соответствует верхнему значению твёрдости рельса по ГОСТ Р 51685-

2013, а твёрдость модели колеса варьировалась в пределах 293–363 НВ в соответствии с ГОСТ 10791-2011 [2; 3].

В ходе экспериментальных исследований учитывались три важнейших фактора, влияющих на износ в паре трения «колесо—рельс», а именно:

- HV_k — твёрдость материала колеса;
- P_1 — вертикальная нагрузка на ось;
- P_2 — горизонтальная нагрузка на ось.

Эксперимент был поставлен для условий эксплуатации вагона в кривых участка пути.

В результате экспериментальных исследований были определены значения HV_k , P_1 и P_2 , обеспечивающие минимальные значения износа колеса и рельса. Так же было определено оптимальное соотношение твёрдости колеса и рельса $HV_k 363 / HV_p 401 = 0,91$, но для уточнения результатов требовалось проведение дополнительных экспериментальных исследований [4; 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При движении в эксплуатации колесо меняет свою скорость от нуля до максимума, при торможении от максимума до нуля. Чтобы учесть эти особенности, а также наличие стыковых звеньев, была разработана новая испытательная установка, состоящая из двух устройств [6; 7].

Экспериментальная установка разработана на базе поперечно-строгального станка (рис. 2). Устройство (рис. 2а) состоит из образца колеса 1, установленного в центрах вилки 2, закреплённой в приспособлении на суппорте поперечно-строгального станка, и образца рельса 3. Образец колеса изготовлен из колёсной стали, профиль ко-

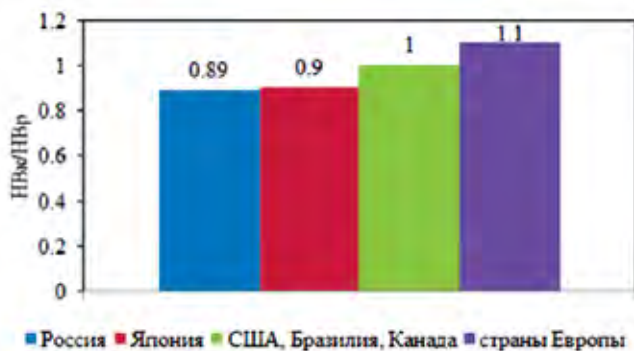


Рис. 1. Соотношения прочностных характеристик колеса и рельса по странам (данные автора).



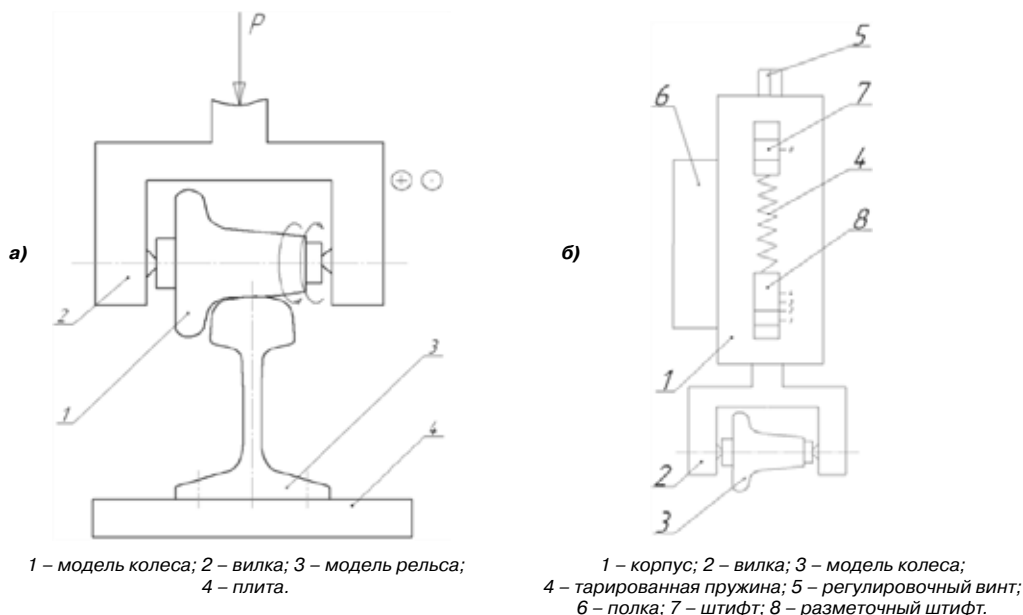


Рис. 2. Устройства для моделирования процесса движения колеса по рельсу (а) и процесса нагружения колеса на рельс (б).

торого соответствует профилю катания колеса. Образец рельса изготовлен из рельсовой стали, жёстко закреплён на поперечно-строгальном станке при помощи плиты 4. Профиль образца рельса соответствует профилю натурального рельса. Для имитации стыкового соединения рельсов на образце рельса выполнен пропил в средней части, параллельный оси вращения образца колеса. К образцу колеса можно прикладывать вертикальные нагрузки (рис. 2б) и перемещать вдоль образца рельса. Размеры образцов колеса и рельса уменьшены в три раза.

В работах [8; 9] на основе анализа мирового опыта и экспериментальных работ сделан вывод: увеличение твёрдости колеса на одну единицу по Бринеллю в эксплуатационном интервале твёрдостей увеличивает их износостойкость на 1–2 %. Кроме того, контактно-усталостная долговечность колёс возрастает пропорционально квадрату приращения их твёрдости [10; 11].

Проведём на разработанной установке опыты, используя некомпозиционный ротатбельный план, для рассмотрения износа колеса и рельса при условии равнозначности их твёрдости.

В данном случае математическую модель исследуемого процесса подбираем, начиная с простейшего линейного уравнения, последовательно увеличивая степень полино-

ма до получения адекватной модели. Процесс получения математической модели в данной ситуации осуществляется следующим образом. Сначала реализуется полный факторный эксперимент 2^k или эксперимент, представленный дробной репликой 2^{k-p} , где p – число эффектов взаимодействия, заменённых новыми переменными [12].

Следует отметить, что полиномом второго порядка часто удаётся описать исследуемый процесс. В случае неадекватности полинома второго порядка переходят к планированию полинома третьего порядка и описывают исследуемый процесс полиномом третьей степени.

Твёрдость образцов колеса и рельса примем за 440 единиц по Бринеллю. Значения скорости и нагрузки примем с учётом масштабных коэффициентов, предельные значения нагрузки $P_{\max} = 27$ тс, скорости $V_{\max} = 140$ км/ч.

Матрица планирования и результаты опытов представлены в таблице 1.

Уравнения регрессии, описывающие влияние нагрузки и скорости движения на износостойкость колеса Y_a , рельса Y_b :

$$Y_a = 0,075 + 0,0567x_1 - 0,0058x_2 - 0,01x_1^2 - 0,03x_2^2 - 0,346x_1x_2, \quad (1)$$

$$Y_b = 0,0475 + 0,0367x_1 + 0,0025x_1^2 - 0,0108x_2^2 - 0,346x_1x_2. \quad (2)$$

Поскольку гипотеза об адекватности не отвергается (выполняется условие $F_p < F_{\text{табл}}$),

Таблица 1

Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	P, Н	V, м/мин	Уа, г	Уб, мм
1	+1	+1	0	0	+1	0	1980	18	0,12	0,09
2	+1	-1	0	0	+1	0	420	18	0,01	0,01
3	+1	0,5	0,866	+0,433	+0,25	+0,75	1590	28,4	0,06	0,04
4	+1	0,5	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	1590	7,6	0,10	0,07
5	+1	-0,5	0,866	-0,433	+0,25	+0,75	810	28,4	0,03	0,04
6	+1	-0,5	-0,866	+0,433	+0,25	+0,75	810	7,6	0,01	0,01
7	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,08	0,05
8	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,07	0,04
9	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,07	0,05
10	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,08	0,05

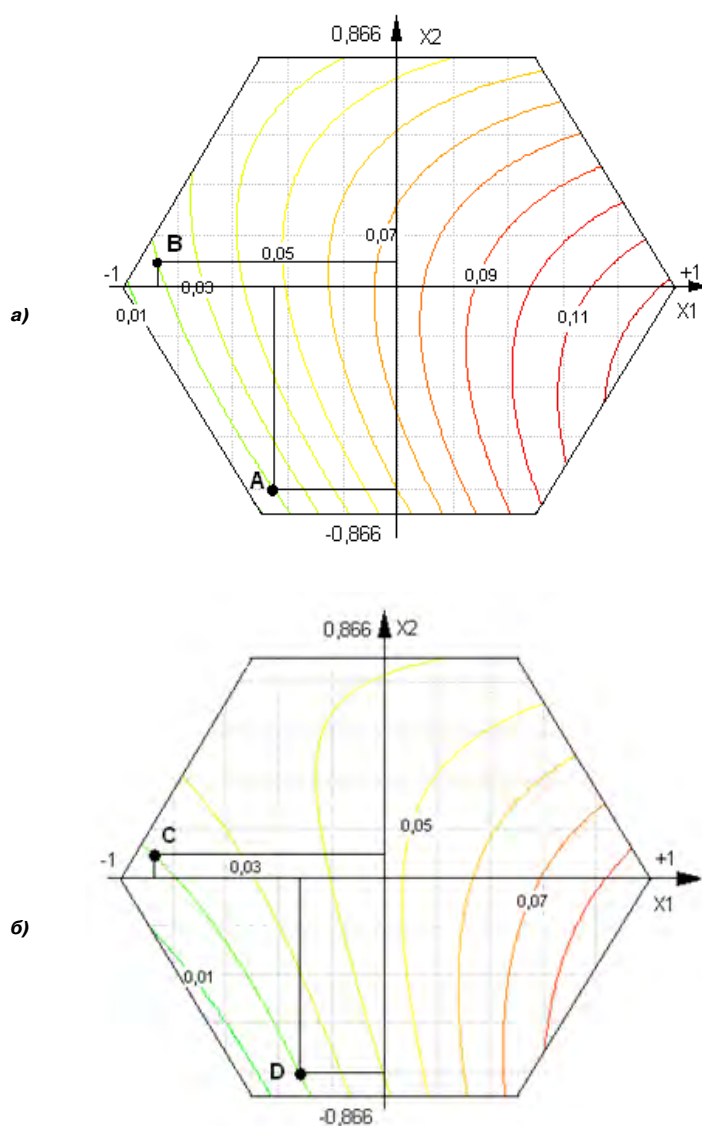


Рис. 3. Линии равного отклика износа колеса (а) и износа рельса (б).



уравнения регрессии можно использовать в качестве математической модели для определения износостойкости колеса и рельса [12].

Для графической интерпретации полученной модели были построены линии равного отклика (рис. 3а, б).

Используя линии равного отклика, можно подобрать значения скорости движения и вертикальной нагрузки, обеспечивающие минимальный износ и колеса, и рельса.

В натуральных значениях для точек А и В, которым соответствует значение износа 0,02 г (рис. 3а), получим:

Точка А:

$P = 841,2 \text{ Н}; V = 8,4 \text{ м/мин.}$

Точка В:

$P = 513,6 \text{ Н}; V = 19,2 \text{ м/мин.}$

С точки зрения увеличения нагрузки на ось, точка А является предпочтительнее, так как колесо выдерживает большую нагрузку при одном и том же значении износа, но точка В является предпочтительнее в связи с тенденцией увеличения скоростей движения грузовых вагонов.

На линиях равного отклика износостойкости рельса (рис. 3б) отметим две точки С(-0,88; 0,1) и D(-0,33; -0,8), соответствующие величине износа рельса 0,02 мм.

Для точки С получим:

$P = 513,6 \text{ Н}; V = 19,2 \text{ м/мин.}$

Для точки D:

$P = 942,6 \text{ Н}; V = 8,4 \text{ м/мин.}$

Сравнительный анализ контурных кривых поверхностей равного отклика по износу колеса и рельса показал, что снижение интенсивности изнашивания колёсной и рельсовой стали твёрдостью 440 НВ достигается при значениях скорости $V = 7,6\text{--}28,4 \text{ м/мин}$ и значениях нагрузки $P = 474,6\text{--}989,4 \text{ Н}$ (износ колеса 0,02 г, рельса 0,02 мм). Самый минимальный износ достигается при соотношениях нагрузки и скорости:

для колеса:

$P_{\max} = 482,4 \text{ Н}; P_{\min} = 443,4 \text{ Н};$
 $V_{\max} = 18,36 \text{ м/мин}; V_{\min} = 16,2 \text{ м/мин};$

для рельса:

$P_{\max} = 864,6 \text{ Н}; P_{\min} = 505,8 \text{ Н};$
 $V_{\max} = 15,24 \text{ м/мин}; V_{\min} = 7,61 \text{ м/мин.}$

ВЫВОД

Автором было показано, как практически применить методы некомпозицион-

ного планирования при математическом описании интенсивности изнашивания пары трения «колесо—рельс». В результате были получены математические модели, при помощи которых можно определять оптимальный износ в системе «колесо—рельс». Решение проблемы уменьшения износа колеса и рельса путём подбора рационального соотношения твёрдости проводилось с учётом эксплуатационных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунькова Т. Г. Об оптимальном соотношении твёрдости цельнокатаного колеса грузового вагона и железнодорожного рельса // Научно-технический вестник Поволжья. — 2011. — № 1. — С. 86–90.
2. ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200105520>. Доступ 01.10.2019.
3. ГОСТ 10791-2011 «Колёса цельнокатаные. Технические условия». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200085777>. Доступ 01.10.2019.
4. Разжковский А. А., Бунькова Т. Г., Петракова А. Г., Гателюк О. В. Оптимизация соотношения твёрдости пары трения «колесо—рельс» // Трение и износ / Международный научный журнал. — 2015. — № 4. — С. 433–442.
5. Razhkovskiy, A. A. Bunkova, T. G., Petrakova, A. G., Gateluk, O. V. Optimization of hardness ratio in rail-wheel friction pair. Journal of Friction and Wear, 2015, Vol. 36, Iss. 4, pp. 334–341.
6. Пат. 98070. Российская федерация, МПК G 01 М 17/10 (17/00) Устройство для имитации процесса движения колеса по рельсу / А. А. Разжковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. — № 2011125268; заявл. 20.06.2011; опубл. 20.11.2011. — 2 с.
7. Пат. 113839. Российская федерация, МПК G 01 М 17/10 Устройство для имитации процесса нагружения колеса на рельс / А. А. Разжковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. — № 2011131543/11; заявл. 27.07.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. — 2 с.
8. Марков Д. П. Закалка гребней колёс подвижного состава на высокую твёрдость для снижения бокового износа // Вестник ВНИИЖТ. — 1997. — № 1. — С. 45–51.
9. Богданов В. М., Марков Д. П., Пенькова Т. И. Оптимизация триботехнических характеристик гребней колёс подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. — 1998. — № 4. — С. 3–9.
10. Moreau, A. Characteristics of wheel/rail contact. Rail Engineering International, 1992, Iss. 3, pp 15–22.
11. Stone, D. H., Sawley, K. J., Kelly, D., Shust, W. Wheel/rail Materials and Interaction: North American Heavy Haul Practices. INHA 1999 STS Conference on Wheel/Rail Interaction, Moscow 1999, pp. 155–168.
12. Спиридонов А. А., Васильев Н. Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов: Учеб. пособие; Уральск. политехн. ин-т им. С. М. Кирова. — Свердловск, УПИ, 1975. — 140 с.



Mathematical Description of Wheel–Rail Wear Process



Bunkova, Tamara G., Omsk State Transport University, Russia.*

Tamara G. BUNKOVA

ABSTRACT

The article covers one of the most pressing challenges for the railways, namely, the identification of the optimum hardness ratio within the wheel–rail couple. The duration of the service life of wheels and rails is largely determined by the hardness of the steel used for their manufacturing. It is confirmed by rather numerous studies carried out in different countries, as well as in Russia. Nevertheless, during many studies on the dependence of the wear-resistance on hardness only specimens of wheel or rail steel were tested without a proper assessment of the influence of the one element hardness on the wear-

resistance of the other within the couple simulating the wheel and rail operation.

The objective of the paper was to identify the optimum relation between strength characteristics of railway wheel and rail, considering operating conditions. The wheel–rail couple is considered as a system. A mathematical model of wheel–rail friction wear process has been developed. Mathematical simulation used the non-compositional second-order rotatable design.

The article presents the results of the study on the intensity of wear of wheels and rails and recommendations regarding choice of axle load and rolling stock speed.

Keywords: *transport, railways, wheel–rail couple, mathematical simulation, hardness ratio, wear.*

*Information about the author:

Bunkova, Tamara G. – engineer at the Department of Mechanical Engineering and Rolling Stock Maintenance Technology, lecturer at the Department of Railway Wagons and Wagon Facilities of Omsk State Transport University (OSTU), Russia, bunkovatg@mail.ru.

Article received 02.05.2019, updated 20.09.2019, accepted 17.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 6.

Introduction

The problem of identification of the optimal ratio of the hardness within the wheel–rail system has existed since the very birth of railways. It is known from the engineering tribology that metals with roughly the same hardness show the best wear resistance in a friction couple. But during many years the ratio of the hardness of wheel and rail materials has been changing, e.g. in Russia. So, the experimental study in that field is still required.

As for the railway practices, the author’s analysis of the current hardness of the whole-rolled wheel and rail according to domestic and foreign articles shows that maximum wheel hardness is observed in the USA, Brazil, Canada (390 HB) and the maximum rail hardness is in Russia (401 HB [Brinell hardness; hardness according to Brinell scale]). Optimum wheel and rail material hardness ratio in Russia is minimum (0,86) and in Europe it attains the maximum (1,1) [1].

Pic. 1 shows international comparisons of the wheel and rail strength properties.

Previously a series of experimental studies using the device based on the sliding-and-screw-cutting lathe 1K62 had been held to identify the efficient rail–wheel couple hardness ratio. Rollers made of the whole-rolled wheel material were used as wheel specimens and a disk made of R65 rail material was used as a rail sample. The rail specimen’s hardness remained constant and equal to 401 HB corresponding thus to the upper

hardness value according to GOST R51685-2013 [Russian state standard], and the wheel specimen hardness varied from 293 to 363 HB according to GOST 10791-2011 [2; 3].

The experimental studies considered three most important factors affecting the wheel–rail friction couple wear, namely: HB_w which is wheel material hardness; P_1 – vertical axle payload; P_2 – horizontal axle payload.

The experiment was made for the car operation within the curved tracks.

Experimental studies have determined HB_w , P_1 and P_2 values that provide the minimum values of wheel and rail wear. The optimum rail–wheel hardness ratio $HB_w/401 = 0,91$ was also determined.

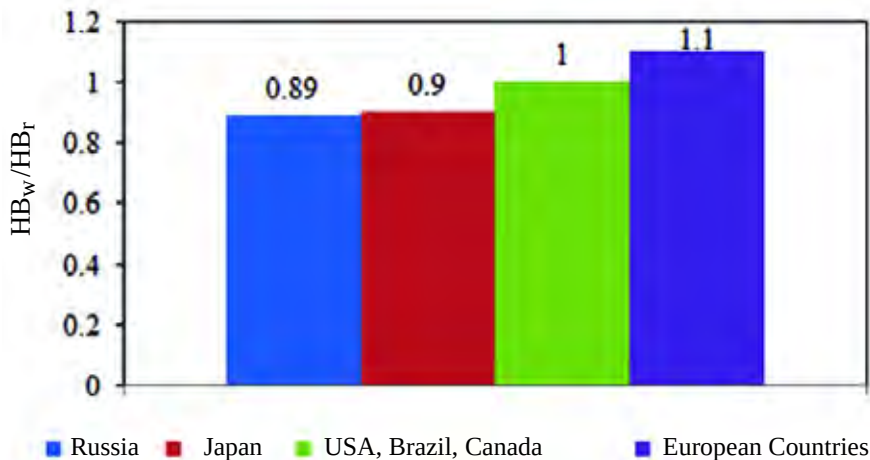
However, to clarify the results obtained, there was a need for additional experimental research [4; 5].

The objective of the research was to optimize the railway wheel and rail strength properties considering the operating conditions using the *mathematical simulation* based on the non-compositional second-order rotatable design.

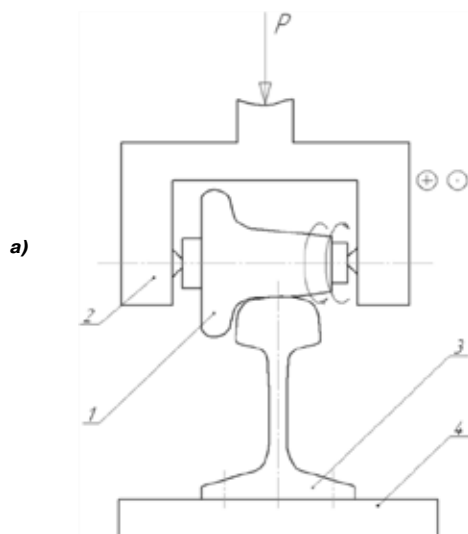
Results

Under operation conditions the wheel changes its speed from zero to maximum when moving and from maximum to zero when train is braking. To consider these features as well as conditions of jointed track, a new test unit consisting of two devices was developed [6; 7].

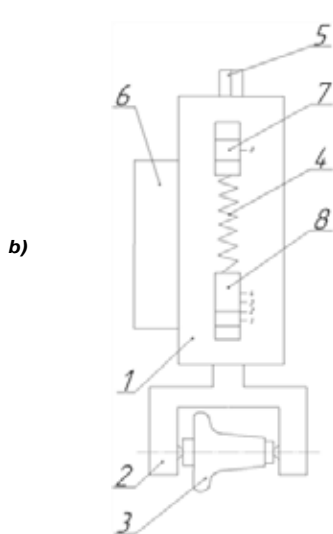
The experimental unit has been designed using a horizontal shaping machine (Pic. 2). The device (Pic. 2a) consists of the wheel



Pic. 1. International comparisons of the ratio of the wheel to rail strength properties [the calculations are made by the author].



1 – wheel specimen; 2 – fork-type holder;
3 – rail specimen; 4 – plate.



1 – case; 2 – fork-type holder; 3 – wheel specimen;
4 – calibrated spring; 5 – positioning screw; 6 – shelf;
7 – pin; 8 – marking pin.

Fig. 2. Device for simulating wheel motion along the rail (a) and of a wheel load on a rail (b).

specimen 1, kept in the fork-type holder 2, fixed on the device placed on the saddle of the horizontal shaping machine, and the rail specimen 3. The wheel specimen is made of wheel steel, the profile of which corresponds to the wheel rolling profile. The rail specimen is made of rail steel, mounted rigidly to the horizontal shaping machine using the plate 4. The rail specimen profile corresponds to the real rail profile. To simulate the rail joints, a saw-cut is made in the middle of the rail specimen, so that it is parallel to the rotation axis of the wheel specimen. Vertical loads can be applied to the wheel specimen (Pic. 2b) that can be relocated along the rail specimen. The dimensions of the wheel and rail specimens are reduced by a scale factor of 1/3.

Based on an analysis of global expertise and experimental studies the papers [8; 9] concluded that increasing the Brinell hardness of the wheel by one unit within the operational hardness interval increases their wear-resistance by 1–2 %. Besides, the wheel contact fatigue life increases as the square of their hardness increment [10; 11].

Using the above-designed unit, experiments were carried out based on non-compositional rotatable design to consider the wheel and rail wear provided that their hardness was equal.

In this case, the mathematical model of the process under the study is selected starting with

the simple linear equation sequentially increasing the polynomial degree to obtain an adequate model. In that case the process of obtaining a mathematical model is as follows. First, a complete factorial experiment 2^k or a fractionally replicated experiment 2^{k-p} should be implemented, where p is the number of interaction effects replaced by new variables [12].

It should be noted that the process under the study can often be described by a second-order polynomial. If the second-order polynomial is inadequate, then one can proceed with the planning of the third-order polynomial and describe the process under the study using the third-degree polynomial.

The hardness of the wheel and rail specimens is assumed to be 440 Brinell units. The values of speed and load are taken considering scale factors: $P_{\max} = 27$ tf as limits of load, $V_{\max} = 140$ km/h as the speed.

Planning matrix and test results are shown in the Table 1.

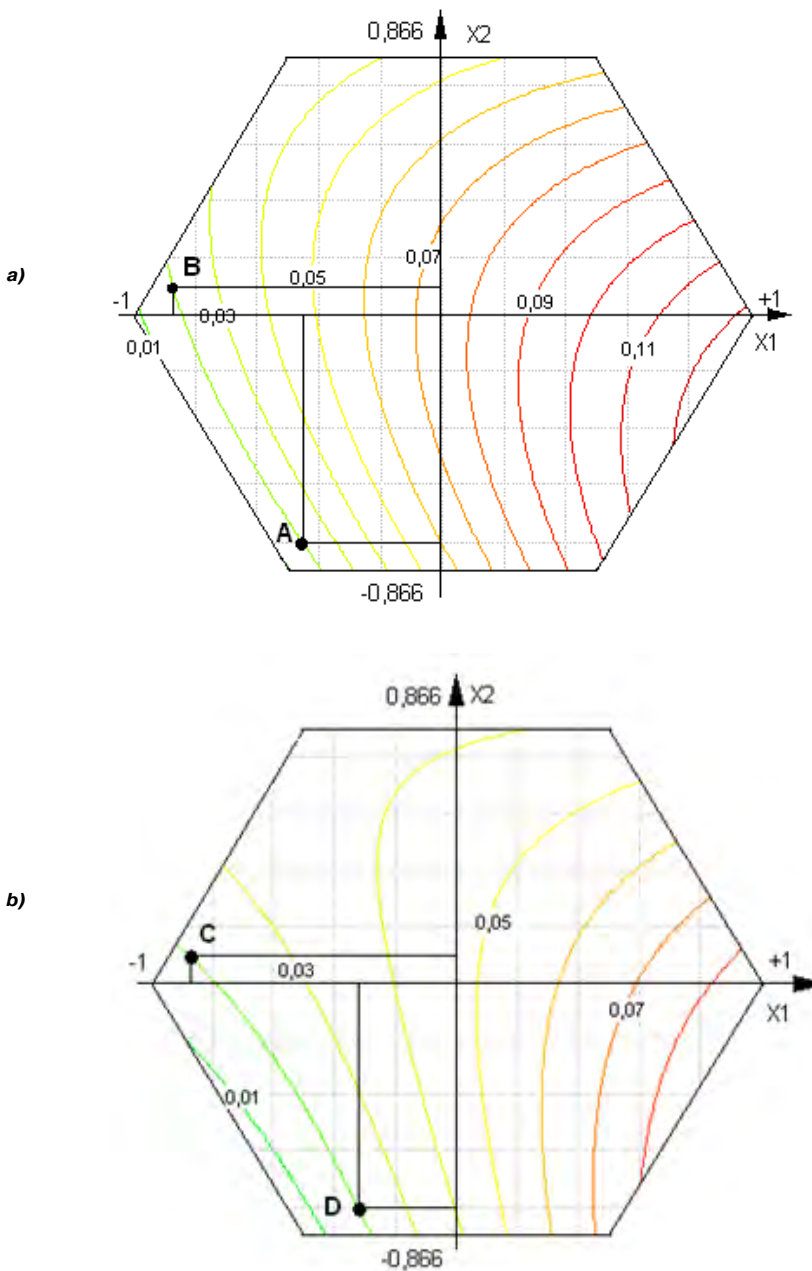
Regression equations describing the influence of load and speed on the wear resistance of the wheel Ya and of the rail Yb:

$$Y_a = 0,075 + 0,0567x_1 - 0,0058x_2 - 0,01x_1^2 - 0,03x_2^2 - 0,346x_1x_2, \quad (1)$$

$$Y_b = 0,0475 + 0,0367x_1 + 0,0025x_1^2 - 0,0108x_2^2 - 0,346x_1x_2. \quad (2)$$

Since the hypothesis of adequacy is not rejected (the condition $F_p < F_{\text{table}}$ holds), the





Pic. 3. Lines of equal distribution (response) of the wheel wear (a) and the rail wear (b).

regression equations can be used as a mathematical model to determine the wheel and rail wear resistance [12].

For a graphical interpretation of the model obtained, lines of equal distribution were built (Pic. 3a, b).

Using lines of equal distribution contour plots, it is possible to find the values of the speed and vertical load that ensure minimum wear of both the wheel and the rail.

In terms of natural values for the points A and B with corresponding wear value of 0,02 g (Pic. 3a), we get:

For the point A:

$P = 841,2 \text{ H}$; $V = 8,4 \text{ m/min}$.

For the point B:

$P = 513,6 \text{ H}$; $V = 19,2 \text{ m/min}$.

From the point of view of increase in axle load, point A is preferable since the wheel can withstand a large load at the same wear value

Table 1

Planning matrix and test results

Test No.	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	P, H	V, m/min	Ya, g	Yb, mm
1	+1	+1	0	0	+1	0	1980	18	0,12	0,09
2	+1	-1	0	0	+1	0	420	18	0,01	0,01
3	+1	0,5	0,866	+0,433	+0,25	+0,75	1590	28,4	0,06	0,04
4	+1	0,5	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	1590	7,6	0,10	0,07
5	+1	-0,5	0,866	-0,433	+0,25	+0,75	810	28,4	0,03	0,04
6	+1	-0,5	-0,866	+0,433	+0,25	+0,75	810	7,6	0,01	0,01
7	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,08	0,05
8	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,07	0,04
9	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,07	0,05
10	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,08	0,05

but point B is preferable thanks to the trend of increase in freight wagon speed.

On the lines of equal distribution of response of the rail wear resistance (Pic. 3b) we can mark two points: C (-0,88; 0,1) and D (-0,33; -0,8) corresponding to the rail wear value of 0,02 mm.

For the point C we get:
 $P = 513,6 \text{ H}$; $V = 19,2 \text{ m/min}$.
For the point D we get:
 $P = 942,6 \text{ H}$; $V = 8,4 \text{ m/min}$.

A comparative analysis of the curved surfaces on the contour plot of the wheel and rail wear shows that decrease in the wear rate of wheel and rail steel of 440 HB is achieved at the speed values $V = 7,6\text{--}28,4 \text{ m/min}$ and with load values $P = 474,6\text{--}989,4 \text{ H}$ (wheel wear is 0,02 g, rail wear is 0,02 mm). The smallest wear is achieved with load-to-speed ratio:

For the wheel:
 $P_{\max} = 482,4 \text{ H}$; $P_{\min} = 443,4 \text{ H}$;
 $V_{\max} = 18,36 \text{ m/min}$; $V_{\min} = 16,2 \text{ m/min}$.
For the rail:
 $P_{\max} = 864,6 \text{ H}$; $P_{\min} = 505,8 \text{ H}$;
 $V_{\max} = 15,24 \text{ m/min}$; $V_{\min} = 7,61 \text{ m/min}$.

Conclusion

The study has shown practical application of the methods of non-compositional designing for mathematical representation of the wheel–rail friction couple wear rate. It has resulted in mathematical models for determining the optimum wear within wheel–rail system. The process of solution of the problem of the wheel and rail wear reduction by selecting a rational hardness ratio has thus been conducted considering the operating conditions.

REFERENCES

1. Bunkova, T.G. About optimum ratio of the hardness of the whole-rolled wheel of the freight wagon and of the rail [Ob optimalnom sootnosheniyi tverdsti tselnokatanogo

kolesa gruzovogo vagona b zheleznodorozhnogo rel'sa]. Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Povolzh'ye Scientific and Technical Bulletin], 2011, Iss. 1, pp. 86–90.
2. GOST R51685-2013 [Russian state standard]. Railway rails. General Specifications. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200105520>. Last accessed 01.10.2019.
3. GOST 10791-2011 [Russian state standard]. Whole-rolled wheels. Specifications. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200085777>. Last accessed 01.10.2019.
4. Razhkovskiy, A. A. Bunkova, T. G., Petrakova, A. G., Gateluk, O. V. Optimization of hardness ratio in rail–wheel friction pair [Original version in Russian]. Trenie i iznos [Friction and Wear], 2015, Iss. 4, pp. 433–442.
5. Razhkovskiy, A. A. Bunkova, T. G., Petrakova, A. G., Gateluk, O. V. Optimization of hardness ratio in rail–wheel friction pair. Journal of Friction and Wear, 2015, Vol. 36, Iss. 4, pp. 334–341.
6. Patent 98070 of the Russian Federation, IPC G 01 M 17/10 (17/00). Device for simulating wheel motion along the rail. Razhkovskiy, A. A., Petrakova, A. G., Bunkova, T. G.; Omsk State Transport University is an applicant and patentee. No. 2011125268; appl. 20.06.2011; publ. 20.11.2011, 2 p.
7. Patent 113839 of the Russian Federation, IPC G 01 M 17/10. Device for simulating wheel loading on the rail. Razhkovskiy, A. A., Petrakova, A. G., Bunkova, T. G.; Omsk State Transport University is an applicant and patentee. No.2011131543/11; appl. 27.07.2011; publ. 27.02.2012, Bulletin No. 6, 2 p.
8. Markov, D. P. Hardening of wheel flanges of rolling stock intended for high speed to reduce side wear [Zakalka grebney kolyos podvizhnogo sostava na vysokuyu skorost' dlia snizheniya bokovogo iznosa]. VNIIZhT Bulletin, 1997, Iss. 1, pp. 45–51.
9. Bogdanov, V. M., Markov, D. P., Penkova, T. I. Optimization of RS wheel flange tribotechnical characteristics [Optimizatsiya tribotekhnicheskikh kharakteristik grebney kolyos podvizhnogo sostava]. VNIIZHT Bulletin, 1998, Iss. 4, pp. 3–9.
10. Moreau, A. Characteristics of wheel/rail contact. Rail Engineering International, 1992, Iss. 3, pp 15–22.
11. Stone, D. H., Sawley, K. J., Kelly, D., Shust, W. Wheel/rail Materials and Interaction: North American Heavy Haul Practices. IHHA 1999 STS Conference on Wheel/Rail Interaction, Moscow, 1999, pp. 155–168.
12. Spiridonov, A. A., Vasiliev, N. G. Experimental design when investigating and optimizing technological processes: Study Guide [Planirovanie experimenta pri issledovanii i optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov]. Sverdlovsk, Kirov UPI publ., 1975, 140 p.



Критические технологии в системе научно-технологических приоритетов железнодорожной отрасли: мировой опыт



Максим ЖЕЛЕЗНОВ



Олег КАРАСЕВ



Сергей ТРОСТЬЯНСКИЙ



Егор ШИТОВ

Железнов Максим Максимович – Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия.

Карасев Олег Игоревич – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия.

Трост'янский Сергей Сергеевич – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия.

Шитов Егор Александрович – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*.

Критические технологии являются ключевыми элементами стратегии развития любой компании для построения эффективной долгосрочной научно-технологической системы. Цель статьи – анализ критических технологий в системе научно-технологических приоритетов железнодорожных корпораций.

Описаны подходы к трактовке понятия «критические технологии», кроме контент-анализа используется инструментарий, связанный с использованием кривой Гартнера.

Приводятся примеры наиболее ярких кейсов внедрения критических технологий в железнодорожных компаниях, а также определяются кластеры наиболее востребованных критических технологий, способных в среднесрочной перспективе кардинально изменить

железнодорожную отрасль. К их числу относятся: автоматизация и механизация производственных процессов; организация высокоскоростных пассажирских и грузовых перевозок; управление ресурсами, безопасностью, рисками и надёжностью на всех этапах жизненного цикла объектов железнодорожного транспорта и инфраструктуры; развитие транспортно-логистических систем в едином транспортном и информационном пространстве; организация грузового тяжеловесного движения.

Подтверждается необходимость проведения регулярного мониторинга и совершенствования эффективности организации технологической инновационной деятельности железнодорожных компаний в целях сохранения ими ведущих позиций по уровню конкурентоспособности.

Ключевые слова: транспорт, железные дороги, критические технологии, цифровые технологии, научно-технологические приоритеты, научно-технологическое развитие, кривая Гартнера.

*Информация об авторах:

Железнов Максим Максимович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия, M.Zheleznov@mail.ru.

Карасев Олег Игоревич – кандидат экономических наук, директор центра научно-технологического прогнозирования экономического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, oikarashev@econ.msu.ru.

Трост'янский Сергей Сергеевич – магистр по направлению «Экономика», заместитель директора Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова, strostiansky@yandex.ru.

Шитов Егор Александрович – магистр по направлению «Менеджмент», ведущий специалист Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова, egor.shitov29@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 18.08.2019, актуализирована 15.10.2019, принята к публикации 21.10.2019.

For the English text of the article please see p. 27.

ВВЕДЕНИЕ

Базовым элементом организации инновационной и технологической деятельности железнодорожных компаний является определение критических технологий и решений (приоритетов технологического развития) в системе сквозных приоритетов научно-технологического развития. Точность и качество планирования дорожных карт по их разработке, внедрению и коммерциализации в значительной степени предопределяют успешность и уровень конкурентоспособности в долгосрочной перспективе [1].

В мировой практике существуют различные подходы к определению понятия критических технологий. Появление самого термина обычно связывают с критическими материалами, которыми в США в XX веке называли не производившиеся в этой стране, но характеризовавшиеся максимальной эффективностью в аспекте функционирования вооружённых сил стратегические ключевые товары и технологии. Во Франции ключевые (критические) технологии представляют собой стратегические для французской экономики научные направления, определяющие национальные научно-технологические приоритеты и задающие ориентиры для научно-технической и инновационной политики [2–4].

Задача их разработки заключается в определении перечня технологий, крайне необходимых для эффективного функционирования компании, отрасли или страны в целом.

В Российской Федерации перечень критических технологий является инструментом государственного стратегического планирования: под критическими технологиями понимаются национальные приоритеты научно-технологического развития на среднесрочную перспективу (от трёх до десяти лет) [5, с. 64].

Также под критическими технологиями могут понимать комплекс межотраслевых (междисциплинарных) решений, формирующих предпосылки и основы для долгосрочного развития технологических траекторий и характеризующихся наличием обширного спектра потенциально значимых и экономически целесообразных путей последующего применения данных решений на практике [6, с. 49]. Критические технологии обладают существенным потенциальным

влиянием на уровень конкурентоспособности различных отраслей экономики и социальной сферы.

Появление критических технологий традиционно связано с переходом (отказом) от одной технологии к принципиально новой, основанной на ином принципе функционирования, физическом эффекте или другом значимом параметре, характеризующем данную технологию. Эффективность и качество (технические характеристики, параметры и доступный функционал) критических технологий предопределяют их значимость, обуславливая необходимость уделения им первостепенного внимания в разрезе организации технологической (инновационной) деятельности.

Обычно под критическими технологиями понимают прорывные инновации и технологии (см., напр., [7]), обладающие потенциалом открытия принципиально нового технологического цикла. Они направлены не на улучшение ситуации, но на принципиальное изменение сложившегося рынка и замену существующей технологии.

Целью исследования является анализ критических технологий в системе научно-технологических приоритетов железнодорожных компаний с использованием *методов* контент-анализа и инструментария кривой Гартнера.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И КРИВАЯ ГАРТНЕРА

В мировой практике в качестве модели критических технологий в условиях полномасштабной цифровизации всех аспектов экономики и социальной сферы зачастую используется кривая (hype cycle) Гартнера, представляющая собой цикл зрелости ключевых новых (возникающих) технологий (см., напр., [8, с. 223–224; 9, с. 78]). Этот инструмент демонстрирует как их зрелость, так и общую логику их развития в разрезе следующих основных стадий:

- технологический прорыв (начало развития технологии);
- пик завышенных ожиданий (огромный интерес к технологии определяет крайне высокое предложение, сопровождающееся существенным количеством обмана и неудач);
- пропасть разочарования (технологии не достигают ранее заявленных эффектов



Рис. 1. Кривая Гартнера по состоянию на август 2018 года. Источник: Международная исследовательская и консалтинговая компания Gartner [10].

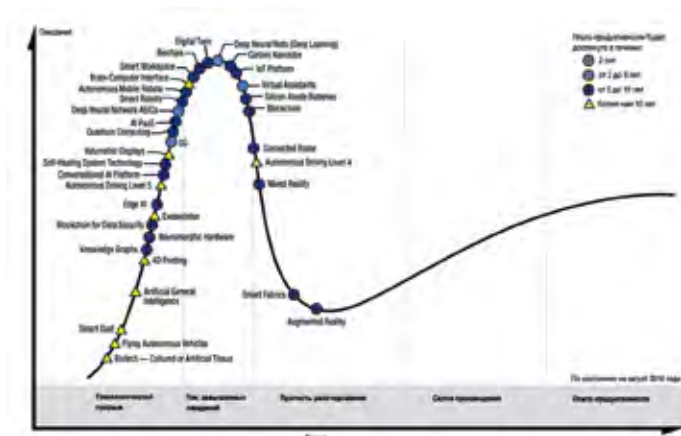
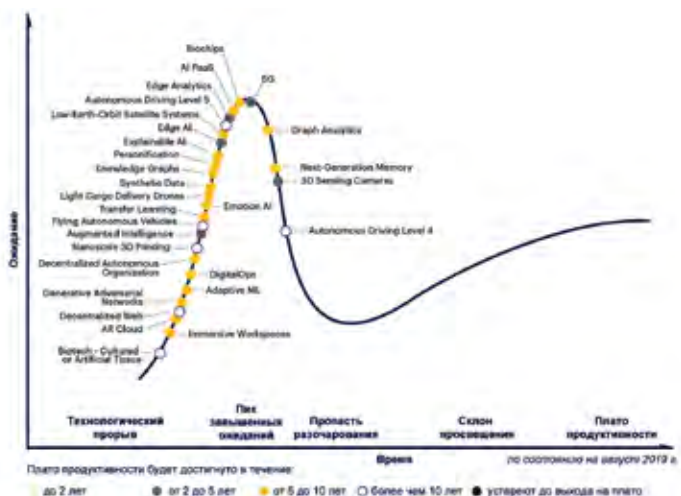


Рис. 2. Кривая Гартнера для новых возникающих технологий, 2019 год [11].



или параметров; технологические компании терпят неудачу в процессе развития технологий);

- склон просвещения (совершенствование и адаптация технологии, период её кардинального пересмотра и смены фокуса в рамках направления её развития);
- плато продуктивности (преимущества технологии становятся очевидными и признаются всеми, актуальность технологии подтверждается её востребованностью и высоким спросом).

Особенностью данного инструментария является его позиционирование в качестве дескриптора жизненного цикла технологий, которые, однако, не обладают абсолютной гарантией достижения конечной стадии — плато продуктивности. Большинство технологий не имеет необходимого потенциала для преодоления пропасти разочарования, что определяется отсутствием реального эффекта для экономики и бизнеса.

В 2018 году кривая Гартнера (рис. 1) в числе находящихся на пике востребованности и характеризующихся завышенными ожиданиями относительно значимости и эффективности для различных отраслей экономики выделяла среди прочих следующие цифровые технологии:

- искусственный интеллект, машинное и глубокое обучение;
- робототехника;
- промышленный интернет и цифровые двойники;
- цифровые помощники и прочие.

В 2019 году кривая Гартнера претерпела изменения, в частности, продвинулись от технологического прорыва к пику завышенных ожиданий технологии биочипирования, 5G, пятого поколения беспилотных транспортных средств (рис. 2).

Информационные технологии, определяющие возможности осуществления цифровой трансформации, сегодня выделяются

большинством отраслевых компаний, в том числе железнодорожных, в качестве критических. Согласно мнению международного консалтингового агентства McKinsey, цифровые технологии направлены на преобразование каждого звена производственной цепи компании: от исследований и разработок до продаж и обслуживания [12].

В соответствии с данными консалтинговой компании PWC, значимая доля инвестиций компаний в развитие критических цифровых технологий нацелена на повышение операционной эффективности, включая (но не ограничиваясь) следующие направления: сенсорика и устройства связи, платформенные цифровые решения и интеллектуальные системы управления производством [13].

В железнодорожной отрасли критические цифровые технологии находят широкое распространение в рамках реализации концепций «цифровых» железных дорог, в частности, для решения задач содержания инфраструктуры (см., напр., [14; 15]), организации высокоскоростных железнодорожных и мультимодальных (интермодальных) перевозок (см., напр., [16]).

КРИТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Ведущие зарубежные железнодорожные компании в качестве критических цифровых технологий, определяемых в рамках приоритетов долгосрочного научно-технологического развития, выделяют различные «сквозные» цифровые технологии, используемые как для эксплуатации подвижного состава, так и для строительства и содержания инфраструктурных объектов. Ключевыми направлениями использования критических цифровых технологий в железнодорожной отрасли являются [17]:

- автоматизация и механизация производственных процессов;
- организация высокоскоростных пассажирских и грузовых перевозок;
- развитие транспортно-логистических систем в едином транспортном и информационном пространстве (развитие интероперабельности);
- управление ресурсами, безопасностью, рисками и надёжностью на всех этапах жизненного цикла объектов железнодорожного транспорта и инфраструктуры;

- организация грузового тяжеловесного движения.

Учитывая стремительное развитие технологий, что, в частности, наглядно показывает динамика ежегодных изменения кривой Гартнера, данная классификация предлагается авторами как исходная на данный момент, что не исключает возможности её модификации, актуализации, адаптации и детализации, использования других подходов на фоне наличия множества таковых¹, в том числе и в целях решения стратегических управленческих задач применительно к отдельным компаниям или процессам.

Эффективное управление подвижным составом и инфраструктурой в современных условиях развития информационных технологий предполагает активное применение автоматизированных и интеллектуальных систем. Различные ведущие зарубежные железнодорожные компании, включая (но не ограничиваясь) такие, как Китайская государственная группа железнодорожных компаний (China State Railway Group Co., Ltd., KHP, далее — CR), Немецкие железные дороги (Deutsche Bahn Group AG, Германия, далее — DB), Японские железные дороги (Japan Railways Group, Япония, далее — JR), Национальная компания французских железных дорог (Группа SNCF, Société Nationale des Chemins de Fer Français, Франция, далее — SNCF), Швейцарские федеральные железные дороги (Swiss Federal Railways, Швейцария, далее — SBB), Австрийские федеральные железные дороги (Austrian Federal Railways, Австрия, далее — ÖBB), Корейская железнодорожная корпорация (Korean Railway Corporation, Республика Корея, далее — Korail), Канадская национальная железно-

¹ См., например, совместный документ Международного союза железных дорог и ряда организаций Евросоюза A Roadmap for Digital Railways [Электронный ресурс]: <http://www.cer.be/sites/default/files/publication/A%20Roadmap%20for%20Digital%20Railways.pdf>; многочисленные публикации в рамках проекта EC Shift2Rail [Электронный ресурс]: <https://shift2rail.org/>, например, отчёт Digital Transformation of Railways [Электронный ресурс]: https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2018/04/DIGITAL_TRANSFORMATION_RAILWAYS_2018_web.pdf и другие; публикацию группы компаний Thales на тему цифровой трансформации железнодорожной отрасли Digital Transformation in The Railway Industry [Электронный ресурс]: <https://www.thalesgroup.com/en/germany/magazine/digital-transformation-railway-industry>; и многие другие.



Таблица 1

Пилотная система автоведения скоростных электропоездов

CR (Китай)	 中国国家铁路集团有限公司 CHINA RAILWAY	Система автоведения скоростных электропоездов	
Интеллектуальная система управления скоростными электропоездами CR представляет собой новейшую систему оптимизации маршрута и скорости в режиме реального времени на основании значительного количества внешних параметров. Первые успешные тестовые испытания в полевых условиях указанной системы были проведены в июне 2018 г. на участке «Пекин—Шеньян»: максимальная скорость подвижного состава во время испытания составила 350 км/ч. УГТ8¹ (Верификация технологии/ пилотирование)			
Функционал	Данная система позволяет осуществлять автоматическое начало движения, поддержание заданной скорости и совершение остановок на платформе, включая автоматическое открытие/закрытие дверей.		
Эффекты	• улучшение потребительского опыта; • повышение уровня безопасности железнодорожного движения; • повышение производительности труда.		
Аналогичные кейсы			

дорожная компания (Canadian National Railway Company, Канада, (далее – CN), Network Rail (Великобритания, далее – NR), FS Italiane (the Ferrovie dello Stato Italiane Group, Италия, далее – FS), а также транспортные подразделения австралийско-британского транснационального горнодобывающего концерна Rio Tinto, на регулярной основе реализуют инновационные проекты, направленные на внедрение передовых технологий и решений в целях повышения качества обслуживания пассажиров, содержания подвижного состава и инфраструктурных объектов.

Описываемые далее кейсы в рамках предложенной классификации основаны в основном на информации, размещённой на сайтах указанных компаний.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И МЕХАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Преследуя цели повышения операционной эффективности и увеличения конкурентоспособности, железнодорожные компании проводят мероприятия по повышению уровня технологического развития в аспекте различных направлений деятельности. Одним из наиболее востребованных в среднесрочной перспективе направлений научно-технологического развития железнодорожной отрасли в области автоматизации производственных процессов является разработка и внедрение интеллектуальных

технологий информационно-управляющей поддержки управления подвижным составом [18; 19] и системы дистанционного диспетчерского управления. В таблице 1 представлен один из наиболее ярких примеров внедрения систем автоведения подвижного состава.

Системы автоматизации и механизации производственных процессов также оказывают значимый положительный эффект на уровень безопасности и надёжности путём снижения влияния человеческого фактора в различных процессах, в том числе характеризующихся большим количеством повторяющихся алгоритмизированных действий, которые могут быть заменены передовыми автоматизированными технологическими решениями. Одним из актуальных кейсов подобных технологий является внедрение систем дополнительного контроля за обслуживающим персоналом, а также применение многофункциональных систем интервального регулирования движения поездов (таблица 2).

Активное применение технологий автоматизации в железнодорожной отрасли осуществляется в том числе в целях:

- контроля за перевозками грузов (в том числе, контейнерных и контейнерных перевозок);
- предупреждения бригад и управления работой путевой ремонтной техники;
- оперативной передачи информации в случае чрезвычайных ситуаций.

¹ Здесь и далее: уровень готовности технологий согласно ГОСТ Р 58048-2017.

Таблица 2

Многофункциональная система интервального регулирования движения поездов

DB (Германия)		Многофункциональная система интервального регулирования движения поездов
Немецкая железнодорожная компания DB внедрила европейскую систему управления движением поездов (далее – ETCS), представляющую собой комплекс единых стандартов, разработанных в рамках международного сотрудничества для железнодорожной автоматики, телемеханики, связи и диспетчерского контроля. ETCS позволяет ликвидировать различия в несовместимых друг с другом системах сигнализации, централизации и блокировки, обеспечивая беспрепятственное и безопасное железнодорожное сообщение. Указанная система является облачной инфраструктурной системой управления железнодорожной сетью.		
УГТ9 (Внедрение технологии в производство)		
Функционал	Основными компонентами ETCS являются: а) евробализы – автономные приемопередающие устройства (транспондеры) с энергонезависимой памятью, устанавливаемые между рельсами и предназначенные для обмена данными с подвижным составом; б) «европетля» (EuroLoop) – кабельная система передачи данных; в) путевой электронный блок; г) бортовое оборудование. В алгоритмах интервального регулирования используется координата с учетом максимального доверительного интервала. Для увеличения точности определения местоположения подвижного состава Международным союзом железных дорог и Европейским космическим агентством была разработана и внедрена технология комплексирования данных, полученных от бализ и от навигационных спутников.	
Эффекты	• повышение эффективности операционной деятельности; • повышение уровня безопасности железнодорожного движения; • повышение качества обслуживания; • снижение стоимости жизненного цикла подвижного состава и инфраструктурных объектов.	
Аналогичные кейсы		

**ОРГАНИЗАЦИЯ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ПАССАЖИРСКИХ И ГРУЗОВЫХ
ПЕРЕВОЗОК**

Организация высокоскоростного железнодорожного движения сопряжена с использованием отличных от традиционных перевозок технологий и платформенных решений. Цифровизация и передовые информационные разработки позволяют повысить эффективность и рентабельность подобного типа пассажирских и грузовых перевозок, которые ассоциируются с высокими издержками.

Перспективы оптимизации интегрированной сети высокоскоростного сообщения непосредственно связаны с точностью, полнотой и достоверностью информации о каждой высокоскоростной или скоростной магистрали. Оптимальное использование имеющихся ресурсов возможно лишь при исчерпывающих данных об объекте исследования, что достигается посредством внедрения различных технологических решений, например [16; 17], техно-

логии комплексного оперативного мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры высокоскоростного движения с использованием спутниковых и геоинформационных технологий (таблица 3).

При помощи применения подобных систем железнодорожные компании учитывают загрузку участков, находят и используют свободные мощности, выявляют взаимосвязи между различными элементами перевозочного процесса. Одним из эффектов является оперативное обнаружение технических неполадок, что положительно влияет на сокращение времени простоя подвижного состава.

Цифровая трансформация и активное развитие цифровых технологий также определяют возможность повышения энергетической эффективности организации высокоскоростных железнодорожных перевозок. Значимое влияние на развитие подобных технологий оказывают достижения в области беспроводной связи и передачи данных, позволяющие обрабатывать информацию на



Таблица 3

Комплексный оперативный мониторинг состояния подвижного состава и инфраструктуры высокоскоростного движения

CR (Китай)	 中国国家铁路集团有限公司 CHINA RAILWAY	Технологии комплексного оперативного мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры высокоскоростного движения с использованием спутниковых и геоинформационных технологий	
CR совместно с китайской телекоммуникационной компанией Huawei апробируют платформенную систему, функционирующую по принципам промышленного интернета, на железнодорожном пути «Пекин-Тяньцзинь»: планируется оборудование наиболее затруднённых участков системами беспроводной передачи данных LTE от компании Huawei и их последующая интеграция с сенсорными модулями и метками радиочастотной идентификации.			
УГТ8 (Верификация технологии/пилотирование)			
Функционал	Применение алгоритмов машинного обучения и предиктивной аналитики позволяет проводить сценарное моделирование в целях прогнозирования ошибок и неисправностей для планирования технического обслуживания и ремонта подвижного состава и инфраструктурных объектов.		
Эффекты	• повышение уровня безопасности железнодорожного движения; • повышение качества обслуживания; • повышение производительности труда; • снижение стоимости жизненного цикла подвижного состава и инфраструктурных объектов.		
Аналогичные кейсы			

высоких скоростях. В таблице 4 представлен кейс использования технологий имитационного моделирования взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры высокоскоростного движения для обеспечения энергоэффективности и безопасности.

РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЕДИНОМ ТРАНСПОРТНОМ И ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Информационные системы и платформенные решения, интегрирующие различные базы данных и предоставляющие условия для организации перевозок с применением различных категорий транспорта, оказывают существенное влияние в целом на транспортную отрасль. Подобные технологические решения в значительной степени ускоряют процессы организации, бронирования и отслеживания в рамках осуществления перевозок. Элементы сенсорики в совокупности с технологиями беспроводной связи и промышленного интернета позволяют в режиме реального времени осуществлять мониторинг актуального состояния и статуса всех элементов транспортной экосистемы.

Указанные технологии являются критическими для различных сегментов транспортной отрасли, включая железнодорожные перевозки. В частности, особое внимание уделяется процессам развития и внедрения единых информационно-коммуникационных систем управления процессами перевозок (таблица 5).

В процессе внедрения подобных систем реализуются процессы автоматизации и упрощения диспетчерской работы, благодаря которым повышаются скорость обработки запросов, точность анализа поступающей информации и безопасность управления процессами перевозок [19].

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ, БЕЗОПАСНОСТЬЮ, РИСКАМИ И НАДЁЖНОСТЬЮ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА И ИНФРАСТРУКТУРЫ

Ведущие компании-перевозчики на регулярной основе совершенствуют существующие системы управления, непосредственно связанные с управлением и мониторингом безопасности и надёжности железнодорожных перевозок. Исследования и разработки более совершенных

Таблица 4

Имитационное моделирование взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры высокоскоростного движения

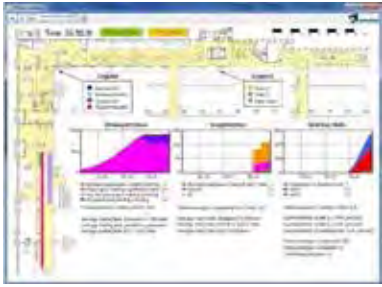
SNCF (Франция)		Технологии имитационного моделирования взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры высокоскоростного движения для обеспечения энергоэффективности и безопасности
«SNCF Gares&Connexions» поручила своей дочерней компании AREP и фирме EMSYSS, занимающейся консалтингом в области имитационного моделирования, разработать модель для оптимизации использования терминала «Transmanche» северного вокзала Парижа. Техническая реализация модели легла на компанию AnyLogic. Основной целью проекта являлось сокращение времени ожидания в точках контроля пассажиров. Разработанная и внедрённая модель позволяет оценивать возможные затруднения в подобных зонах и предлагать различные сценарии их предотвращения.		
УГТ9 (Внедрение технологии в производство)		
Функционал	Моделирование различных процессов в зонах контроля терминала стало возможным благодаря уникальным техническим и функциональным свойствам программного обеспечения компании AnyLogic. Моделирование подобных процессов позволяет найти решение для такой задачи, как оптимизация затрат на использование терминала при одновременном улучшении качества обслуживания пассажиров	
Эффекты	• повышение качества обслуживания; • повышение безопасности перевозок.	
Аналогичные кейсы		

Таблица 5

Единая информационно-коммуникационная система управления перевозочным процессом

ДВ (Германия)		Единые информационно-коммуникационные системы управления процессом перевозок	
Система планировщика маршрутов ТЕР предназначена для упрощения краткосрочного планирования графика. Она представляет собой интеллектуальную комплексную систему управления железнодорожной сетью, функционирующую с применением различных цифровых технологий, включая большие данные, облачные вычисления, искусственный интеллект и т.д. УГТ9 (Внедрение технологии в производство)			
Функционал	Внедрение данной системы обеспечивает операторов поездов быстрыми решениями в ответ на запросы машинистов и позволяет оперативно предоставлять информацию о предполагаемом времени транзита.		
Эффекты	• повышение уровня безопасности железнодорожного движения; • повышение качества обслуживания; • снижение стоимости жизненного цикла подвижного состава и инфраструктурных объектов		
Аналогичные кейсы			

технологических решений ведутся научными институтами и R&D-подразделениями постоянно. В рамках указанного направления научно-технологического развития в число критических технологий входят комплексные системы поддержки принятия управленческих решений по обеспечению требований надёжности и безопасности функционирования тех-

нических средств на железнодорожном транспорте.

Большинство передовых железнодорожных компаний акцентирует своё внимание на вопросах применения системы контроля и ремонта технических средств по фактическому состоянию исходя из прогнозирования их эксплуатационного ресурса на основе предик-



Таблица 6

Многофункциональная система контроля технических средств по фактическому состоянию

NR (Великобритания)		БПЛА для мониторинга состояния инфраструктуры
NR использует дронов для оценки состояния железнодорожного полотна и повышения скорости и эффективности поиска повреждённых участков.		
УГТ8 (Верификация технологии/пилотирование)		
Функционал	Установленные на применяемых дронах камеры обладают углом обзора 360°	
Эффекты	• повышение уровня безопасности железнодорожного движения; • оптимизация процессов технического обслуживания и ремонта; • повышение производительности труда.	
Аналогичные кейсы		

Таблица 7

Автоматизированный тяжеловесный подвижной состав

RioTinto		Автономный грузовой тяжеловесный подвижной состав
Концерн RioTinto в рамках реализации программы AutoHaul (автоматизация поездов, перевозящих железную руду) успешно внедрил полностью автоматизированный дальнемагистральный тяжеловесный подвижной состав в регионе Пилбара (Западная Австралия), осуществляющий грузовые перевозки в режиме автопилотирования.		
УГТ9		
Функционал	Подвижной состав, состоящий из трёх локомотивов, перевозит 28 тыс. т железной руды на дистанцию более 280 км. Локомотивы оснащены бортовыми камерами, позволяющими осуществлять непрерывный мониторинг за движением поезда из центра управления.	
Эффекты	• повышение уровня безопасности железнодорожного движения; • снижение стоимости жизненного цикла подвижного состава и инфраструктурных объектов; • повышение производительности труда.	
Аналогичные кейсы	—	

тивного моделирования [20]. В частности, развиваются технологии мониторинга с применением беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) (таблица 6).

ОРГАНИЗАЦИЯ ГРУЗОВОГО ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ

Одним из перспективных направлений развития железнодорожной отрасли является организация грузового тяжеловесного движения, предполагающее применение как модифицированных технических решений, так и информационных технологий. Одним из мировых лидеров в области тяжеловесных железнодорожных перево-

зок является горнодобывающая компания RioTinto, эксплуатирующая полностью автоматизированный тяжеловесный подвижной состав, функционирующий с применением технологий автоведения (таблица 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ведущие зарубежные железнодорожные компании в рамках своей деятельности разрабатывают и применяют различные критические цифровые технологии, которые могут быть систематизированы по ключевым группам цифровых решений, при этом большинство технологий и решений обладает междисциплинарным характером.



Рис. 3. Критические цифровые технологии железнодорожной отрасли, разрабатываемые и/или применяемые в ведущих зарубежных компаниях.

Следует выделить ряд наиболее востребованных критических цифровых решений, применяемых в железнодорожной отрасли:

- технологии интернета вещей для диагностики состояния подвижного состава и инфраструктуры и предиктивной аналитики с целью повышения эффективности технического обслуживания и содержания;
- машинное зрение для обнаружения различных препятствий и аварий на пути следования подвижного состава вдоль железнодорожного полотна;
- технологии больших данных для оптимизации железнодорожной сети;
- чат-боты для повышения качества обслуживания пассажиров и улучшения потребительского опыта;
- цифровизация (автоматизация) операционных и бизнес-процессов, включая:
 - а) облачную инфраструктуру управления железнодорожной сетью и инфраструктурными объектами;
 - б) автоматизацию управления и обслуживания подвижных составов;
- цифровизация контейнерных грузовых перевозок;
- процедурные тренажёры для обучения сотрудников компании, включая машинистов.

На рис. 3 представлены наиболее востребованные критические цифровые технологии, способные в средне- и долгосрочной перспективе кардинально изменить железнодорожную отрасль [16; 17; 21–23]. Большинство подобных решений соответствует парадигме цифровой трансформации деятельности компаний, а также новым и перспективным рынкам с высокой долей добавленной стоимости, в том числе рынкам НТИ.

Указанные критические цифровые решения характеризуются следующими параметрами:

- применение «сквозных» цифровых технологий;
- автоматизация производственных и бизнес-процессов;
- повышение надёжности и безопасности;
- повышение операционной эффективности деятельности.

В условиях сокращённого технологического цикла перечень прорывных, потенциально критических и критических цифровых технологий постоянно обновляется. Указанный факт определяет необходимость проведения регулярного мониторинга и совершенствования эффективности организации



технологической (инновационной) деятельности железнодорожных компаний в целях сохранения ими ведущих позиций по уровню конкурентоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fagerberg, J. Technology and competitiveness. Oxford review of economic policy, 1996, Vol. 12, Iss. 3, pp. 39–51. DOI: 10.1093/oxrep/12.3.39.
2. Louvet, J. P. Les principaux résultats de l'étude «Technologies clés 2005». Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie de la République Française, Paris, 2000. [Электронный ресурс]: https://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/infopres/presse/si_tech3.html.
3. Rapport public. Technologies clés 2010. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie de la République Française, Direction générale des Entreprises, 2006. [Электронный ресурс]: <https://www.vie-publique.fr/rapport/28624-technologies-cles-2010>.
4. Rapport public. Technologies clés 2015. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie de la République Française, 2011. [Электронные ресурсы]: <https://www.viepublique.fr/rapport/31652-technologies-cles-2015>; <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/114000139.pdf>.
5. Соколов А. В. Метод критических технологий // Форсайт. – 2007. – Т. 1. – № 4. – С. 64–74.
6. Шашнов С. А., Позняк А. Ю. Научно-технологические приоритеты для модернизации российской экономики // Форсайт. – 2011. – Т. 5. – № 2. – С. 48–56.
7. Данилин И. В., Мамедяров З. А., Кобринская И. Я. Прогнозирование технологических тенденций на основе социально-экономических факторов // М.: Национальный исследовательский институт мировой экономики и международных отношений им. Е. М. Примакова Российской академии наук, 2016. – 21 с. [Электронный ресурс]: <https://www.imemo.ru/files/File/ru/Projects/ONI/2016/2016-DYNKIN-REP-RFFI-001.pdf>. Доступ 21.10.2019.
8. Бойченко А. В., Корнеев Д. Г., Казаков В. А., Лукинова О. В. Инжиниринг предприятий на основе технологий интернета вещей // Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2017): Сб. науч. трудов XX юбилейной Всероссийской научной конференции. 26–28 апреля 2017 г. / Под науч. ред. Ю. Ф. Тельнова: в 2 т. – М.: РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2017. – Т. 1. – 452 с. – С. 218–224.
9. Кононов В. Н., Замбрицкая Е. С., Дема Р. Р., Харченко М. В. Управление жизненными циклами промышленных технологий // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». – 2018. – № 1. – С. 76–87. – DOI: 10.25513/1812-3988.2018.1.76-87.
10. 5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018>. Доступ 29.07.2019.
11. 5 Trends Appear on the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>. Доступ 14.10.2019.
12. Hartmann, B., King, W. P., Narayanan, S. Digital manufacturing: The revolution will be virtualized. McKinsey Quarterly, Aug. 2015. [Электронный ресурс]: <https://www.mckinsey.com/business-functions/>

operations/our-insights/digital-manufacturing-the-revolution-will-be-virtualized. Доступ 21.10.2019.

13. Industry 4.0: Building the digital enterprise. 2016 Global Industry 4.0 Survey [Электронный ресурс]: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4-0/landing-page/industry-4-0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>. Доступ 14.10.2019.

14. Nyikes, Z., Tokody, D., Kovács, T. In situ testing of rail damages in accordance with Industry 4.0. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, Vol. 1045, Iss. 1, p. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1045/1/012032.

15. Гринин В. Н., Доенин В. В., Панищев В. С., Бысов И. Д. Нейронная сеть для прогнозирования нагрузок энергопотребления сортировочного узла // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 6–15. – DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-6-15.

16. Розенберг Е. Н., Дзюба Ю. В., Батраев В. В. О направлениях развития цифровой железной дороги // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 1. – С. 9–13.

17. Розенберг Е. Н., Коровин А. С. Глобальные тренды развития интеллектуальных транспортных систем // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 12. – С. 14–19.

18. Wang, Y., De Schutter, B., Boom van den, T., Ning, B. Optimal trajectory planning for trains under a moving block signaling system. Proceedings of the 2013 European Control Conference, Zurich, Switzerland, 2013, pp. 4556–4561.

19. Розенберг Е. Н., Батраев В. В. Инновационное развитие систем интервального регулирования // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 7. – С. 5–9.

20. Розенберг Е. Н., Коровин А. С. Управление функциональной безопасностью железнодорожного транспорта // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО РЖД. – 2018. – Т. 3. – С. 23–35.

21. Asaul, A., Malygin, I., Komashinskiy, V. The project of intellectual multimodal transport system. Transportation Research Procedia, Vol. 20, 2017, pp. 25–30. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.006.

22. Consortium for ITS Training and Education (CITE). [Электронный ресурс]: <http://www.citeconsortium.org/partners/resources/>. Доступ 21.10.2019.

23. Intelligent Transportation Systems (ITS) Professional Capacity Building (PCB) Strategic Plan, 2017–2021. [Электронный ресурс]: https://www.pcb.its.dot.gov/strategic_plan/toc.aspx. Доступ 21.10.2019. ●

Благодарности

Авторы выражают признательность коллегам, принимавшим участие в исследованиях, результаты которых были использованы при подготовке данной статьи: Белошицкому Алексею Валерьевичу, магистру по направлению «Экономика», заместителю директора Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова; Буровой Анастасии Сергеевне, магистру по направлению «Физика наносистем», инженеру лаборатории биоорганической структуры ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»; Ракову Дмитрию Александровичу, магистру по направлению «Экономика», ведущему специалисту Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова; Смирнову Роману Геннадьевичу, магистру по направлению «Экономика», ведущему специалисту Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова; Смирновой Татьяне Викторовне, аспиранту кафедры статистики, ведущему экономисту экономического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова; Терещенко Игорю Александровичу, магистру по направлению «Юриспруденция», ведущему специалисту Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова; Титовой Юлии Александровне, магистру по направлению «Менеджмент», ведущему специалисту Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова.



Critical Technologies in the System of Science and Technology Priorities of the Railway Industry: Global Experiences

**Maxim M. ZHELEZNOV****Oleg I. KARASEV****Sergey S. TROSTYANSKY****Egor A. SHITOV**

*Zheleznov, Maxim M., Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russia.
Karasev, Oleg I., Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.
Trostyansky, Sergey S., Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.
Shitov, Egor A., Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*.*

ABSTRACT

Critical technologies constitute key elements of any corporate development strategy for building an effective long-term research and technology system. The objective of the article is to analyze critical technologies in the system of science and technology priorities of railway companies. Besides describing the approaches to interpretation of the concept of «critical technology», the research based on the instruments of Gartner hype cycle, content analysis, case study, analyzes examples of the most significant cases of implementation of critical technologies in railway companies, reveals clusters of the most demanded critical technologies that can dramatically

change the railway industry in the medium and long term. Those technologies comprise automation and mechanization of production processes; high-speed passenger and cargo transportation; resource, safety, risk and reliability management at all stages of the life cycle of railway transport facilities and infrastructure; development of transport and logistics systems within the single transport and information space; organisation of heavy haul cargo transportation.

The results confirm the need for regular monitoring and improving efficiency of organisation of technological (innovation) activity of railway companies in order to maintain their leading positions in terms of competitiveness.

Keywords: transport, railway, critical technologies, digital technology, science and technology priorities, science and technology development, Gartner hype cycle.

*Information about the authors:

Zheleznov, Maxim M. – D.Sc. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Civil Engineering of Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russia, M.Zheleznov@mail.ru.

Karasev, Oleg I. – Ph.D. (Economics), Director of the Center for Science and Technology Forecasting of the Faculty of Economics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, oikarasev@econ.msu.ru.

Trostyansky, Sergey S. – Master in Economics, Deputy Director of the Center of Storage and Analysis of Big Data of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, strostiansky@yandex.ru.

Shitov, Egor A. – Master in Management, leading specialist of the Center of Storage and Analysis of Big Data of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, egor.shitov29@gmail.com.

Article received 18.08.2019, revised 15.10.2019, accepted 21.10.2019.

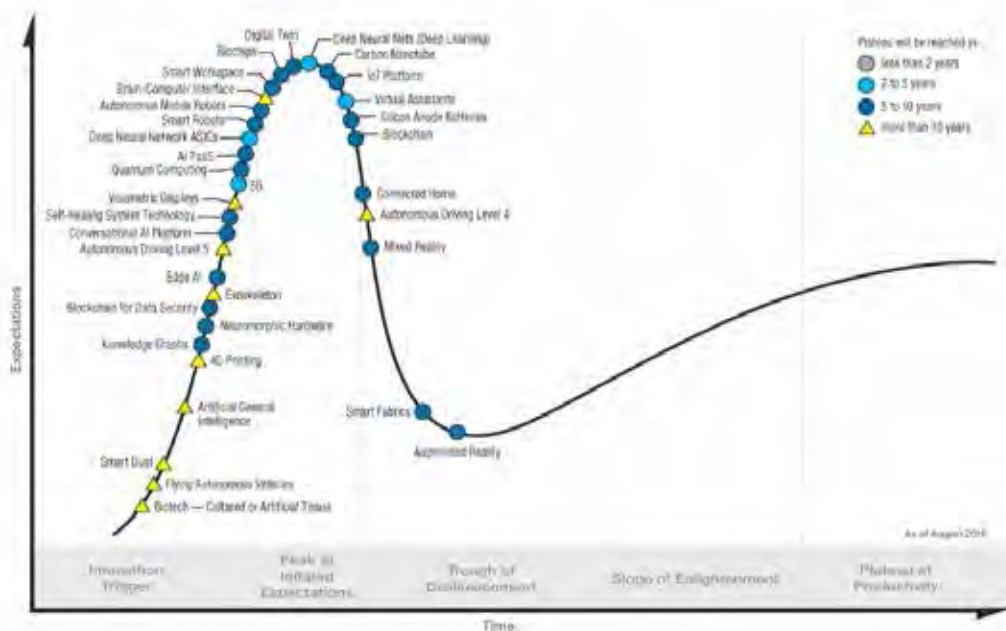
For the original Russian text of the article please see p. 16.

science and technology development priorities for the medium term (from three to ten years) [5, p. 64].

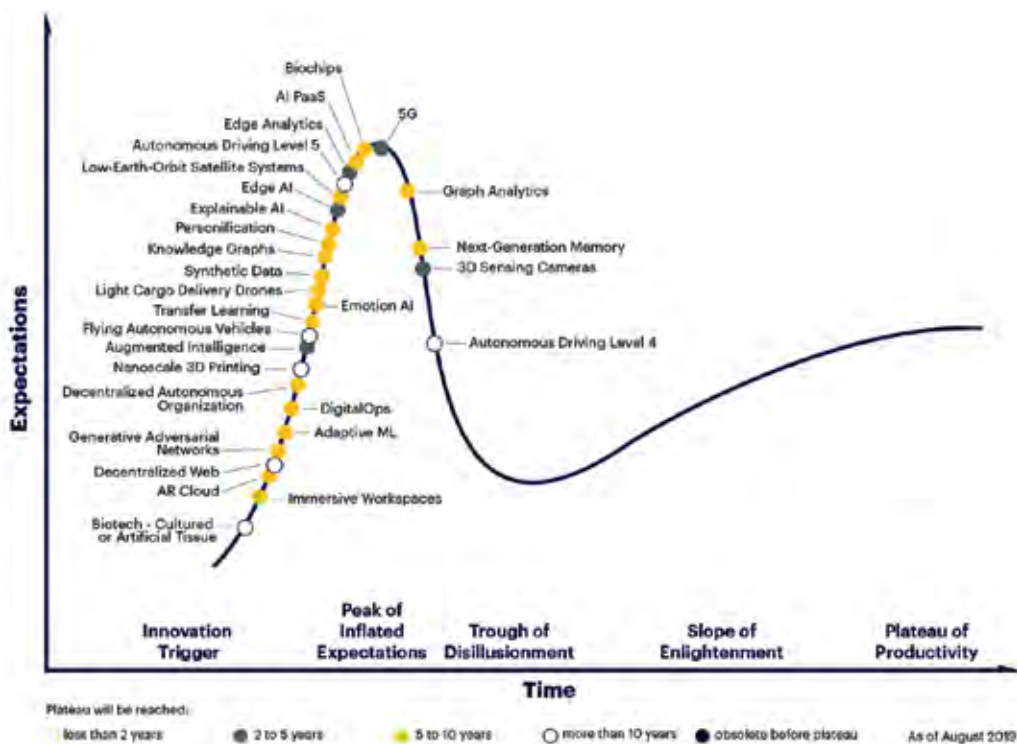
Critical technologies can also mean a complex of intersectoral (interdisciplinary) solutions that form prerequisites and foundations for long-term development of technology trajectories, characterized by the presence of an extensive spectrum of potentially significant and economically feasible ways of subsequent implementation of those solutions [6, p. 49]. Critical technologies have a significant potential impact on competitiveness of various sectors of the economy and the social sphere.

The emergence of critical technologies is traditionally associated with transition from a technology (renunciation of a technology) to a fundamentally new one, based on a different principle of operation, a physical effect, or other significant parameter characterizing this technology. Efficiency and quality (technical features, parameters and available functionality) of critical technologies predetermine their importance, making it necessary to give them paramount attention in the context of organizing technological (innovative) activities.

Usually, critical technologies mean breakthrough innovations and technologies (see, e.g. [7]) owing a potential to start a



Pic. 1. Gartner hype cycle for Emerging Technologies, as of August 2018. Source: Gartner, Inc. Website [10].



Pic. 2. 2019 Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies. Source: Gartner, Inc. Website [11].

fundamentally new technology life cycle. Breakthrough innovations are not aimed at mere improving the existing situation, but at fundamentally changing the current market and replacing the existing technology.

The *objective* of the study is to analyze critical technologies within the system of science and technology priorities of railway companies using the *methods* of content analysis, case study, and Gartner hype cycle tools.

Results.

Digitalization and Gartner hype cycles

Global practices frequently depict the model of critical technologies in the context of full-scale digitalization of all aspects of the economy and social sphere with the help of Gartner hype cycle methodology, which represent a maturity cycle of key (emerging) technologies [see, e.g. [8, pp. 223–224; 9, p. 78]]. This tool demonstrates maturity of digital technologies, as well as the general logic of their development in the context of the following key stages:

- innovation trigger (technological breakthrough, beginning of a technology development);

- peak of inflated expectations (a huge interest in a technology determines an extremely high offer, accompanied by a significant amount of fraud and failure);

- trough of disillusionment (technologies do not achieve the previously announced effects or parameters; technology companies fail in the process of a technology development);

- a slope of enlightenment (improvement and adaptation of technology, period of its cardinal revision and change of its focus within the framework of its development trajectory);

- a plateau of productivity (advantages of a technology become obvious and are recognized by all, the relevance of a technology is confirmed by the fact that a technology is in high demand).

A feature of this methodology is its positioning as of a descriptor of the life cycle of technologies, while the latter are not provided with absolute guarantee that all of them will finally reach the productivity plateau. Most digital technologies do not have the necessary potential to overcome the trough of disillusionment, which is determined by the lack of a real effect for the economy and business.



In 2018, Gartner hype cycle (Pic.1) depicted among other technologies approaching the peak of demand and characterized by inflated expectations regarding the significance and effectiveness for various sectors of the economy the following digital technologies:

- artificial intelligence, deep learning;
- robotics;
- industrial internet of things (IIoT) and digital twin;
- virtual assistants, etc.

The 2019 Gartner hype cycle has been updated, namely biochips, 5G, autonomous driving level 5 technologies have advanced on their route from innovation trigger phase to the peak of inflated expectations (Pic. 2).

Information technologies that determine possibilities of digital transformation are highlighted today by most industry companies, including railway ones, as critical. According to McKinsey, an international consulting agency, digital technologies are aimed at transforming every link in the company's production chain, from research and development to sales and service [12].

According to PWC consulting company, a significant share of companies' investments in development of critical digital technologies is aimed at improving operational efficiency, including (but not limited to) the fields of sensorics and communication devices, platform digital solutions, and intelligent production management systems [13].

In the railway industry, critical digital technologies are widely used in the framework of implementation of the concepts of «digital» railways, particularly for the tasks of infrastructure maintenance (see, e.g. [14; 15]), of high-speed rail and multimodal (intermodal) transportation (see, e.g. [16]).

Railway critical digital technologies

Leading railway companies identify various cross-cutting digital technologies used both for rolling stock operation and infrastructure facilities construction and maintenance as critical digital technologies defined within the framework of priorities for long-term science and technology development. The key areas of implementation of critical digital technologies in the railway industry are as follow [17]:

- automation and mechanization of production, operations and service processes;
- organisation of high-speed passenger and cargo transportation;
- development of transport and logistics systems within the single transport and information space (development of interoperability);
- resource, safety, risk and reliability management at all stages of the life cycle of railway transport facilities and infrastructure;
- organisation of heavy haul cargo transportation.

Considering fast development of technology, demonstrated particularly by annual changes in Gartner hype cycles, the above classification is suggested by the authors as an initial reference point, that does not exclude its further modification, updating, adaptation and specification, the use of other multiple existing approaches¹, particularly for solving strategic management tasks with regard to individual companies and processes.

Effective management of rolling stock and rail infrastructure under current conditions of development of information technology suggests the active use of automated and intelligent systems. Various leading railway companies, including (but not limited to) particularly China State Railway Group Co., Ltd. (China, hereinafter called CR), Deutsche Bahn Group AG (Germany, hereinafter – DB), Japan Railways Group (Japan, hereinafter – JR), Groupe SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français, France, hereinafter – SNCF), Swiss Federal Railways (Switzerland, hereinafter – SBB), Austrian Federal Railways (Austria, hereinafter – ÖBB), Korean Railway Corporation (Republic of Korea, hereinafter – Korail), Canadian National Railway Company

¹ See, e.g., A Roadmap for Digital Railways, prepared in collaboration between the UIC and several European agencies and bodies. [Electronic resource]: <http://www.cer.be/sites/default/files/publication/A%20Roadmap%20for%20Digital%20Railways.pdf>; numerous valuable publications in the framework of EU Shift2Rail project. [Electronic resource]: <https://shift2rail.org/>, e.g., the report Digital Transformation of Railways. [Electronic resource]: https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2018/04/DIGITAL_TRANSFORMATION_RAILWAYS_2018_web.pdf and other papers; the Thales group publication on Digital Transformation in The Railway Industry. [Electronic resource]: <https://www.thalesgroup.com/en/germany/magazine/digital-transformation-railway-industry>; and many other publications.

Table 1

Pilot system of automated driving for high-speed electric trains

CR (China)		Automated driving system for high-speed electric trains	
Intelligent control system for high-speed electric trains of CR is the latest system to optimize route and speed in real time based on a significant number of external parameters. The first successful field test trials of the system were carried out in June 2018 at Beijing–Shenyang section: the maximum rolling stock speed during the test attained 350 km/h. Technology readiness level (TRL) – 8¹ (Technology verification/driving)			
Functionality	This system allows to automatically start movement, maintain given speed and make stops at a platform, including automatic opening/closing of doors.		
Effects	• improved consumer experience; • increased railway safety; • increased labour productivity.		
Similar cases	   		

Table 2

Multifunctional interval train traffic control system

DB (Germany)		Multifunctional interval train traffic control system
The DB has introduced the European train control system (hereinafter – ETCS), which is a set of common standards developed as part of international cooperation for railway automation, telemechanics (teleautomatics, automatic remote control), communications and dispatch control. ETCS eliminates differences in incompatible signaling, interlocking and block control systems, providing unhindered and safe rail transportation. The system is a cloud infrastructure railway network management system.		
TRL 9 (Introduction of the technology in operations)		
Functionality	The main components of ETCS are: a) eurobalises – autonomous transceiver devices (transponders) with non-volatile memory, placed between rails and designed to exchange data with rolling stock; b) Euroloop – cable data transmission system; c) track electronic unit; d) on-board equipment. Interval control algorithms use a coordinate considering the maximum confidence interval. To increase the accuracy of positioning of rolling stock, the International Union of Railways (UIC) and the European Space Agency have developed and implemented a technology for combining data received from balises and from navigation satellites.	
Effects	• improved operational efficiency; • increased railway safety; • improved service quality; • reduced costs of the life cycle of rolling stock and infrastructure facilities.	
Similar cases	   	



¹ Here and below: technology readiness (maturity) level as estimated according to GOST R [Russian state standard] 58048–2017.

Table 3

Integrated operational monitoring of rolling stock and high-speed traffic infrastructure

CR (China)	 中国国家铁路集团有限公司 CHINA RAILWAY	Technologies for integrated operational monitoring of rolling stock and high-speed traffic infrastructure using satellite and geoinformation technologies
CR together with Huanwei telecommunications company are testing the platform system built following the principles of industrial Internet of things on Beijing–Tianjin railway: it is planned to equip the most loaded sections with Huawei's wireless LTE data transmission systems and to subsequently integrate them with sensor modules and RFID tags.		
TRL 8 (Technology verification/piloting)		
Functionality	The use of machine learning algorithms and predictive analytics allows scenario-based simulating to predict errors and malfunctions for planning maintenance and repair of rolling stock and infrastructure facilities.	
Effects	• increased railway safety; • improved service quality; • increased labour productivity; • reduced costs of the life cycle of rolling stock and infrastructure facilities.	
Similar cases		

(Canada, hereinafter – CN), Network Rail (the United Kingdom, hereinafter – NR), the Ferrovie dello Stato Italiane (Italy), as well as transportation units of the Rio Tinto Corporation, regularly implement innovative projects aimed at introducing advanced technologies and solutions in order to improve quality of passenger service, maintenance of rolling stock and infrastructure facilities.

The cases described further on in the framework of suggested classification are mainly based on the information retrieved from the websites of the mentioned companies.

Automation and mechanization of operations processes

Pursuing the goals of increasing operational efficiency and competitiveness, railway companies are taking measures to increase the level of technological development in various areas of activity. Thus, development and implementation of intelligent technologies for information and control support for rolling stock management [18; 19] and of remote dispatch control systems is among most highly demanded science and technology developments for the railway industry in the field of automation of operations processes in the

medium term. The Table 1 depicts one of the most significant examples of introduction of autonomous driving systems for the rolling stock.

Automation and mechanization systems for operations processes also have a significant positive effect on the level of safety and reliability by reducing influence of the human factor on various processes, including those characterized by a large number of repetitive algorithmized actions that can be replaced by advanced automated technological solutions. Relevant cases regarding such technologies can be illustrated at the example of introduction of additional systems of control of maintenance employees, as well as of the use of multi-functional systems for interval regulation of trains traffic (Table 2).

Active use of automation technologies in the railway industry is carried out, inter alia, for the following purposes:

- control over transportation of goods (including container and piggyback (contrailer) transportation);
- alerting of teams and management of track repair machinery operation;
- prompt transmission of information in case of emergency.

Table 4

Simulation modelling of interaction of rolling stock and high-speed traffic infrastructure

SNCF (France)		Simulation technologies with regard to interaction of rolling stock and high-speed traffic infrastructure to ensure energy efficiency and safety	
SNCF Gares & Connexions commissioned its subsidiary AREP and EMSYSS simulation consultancy company, to develop a model to optimize the use of Transmanche terminal at Paris North Station. Technical implementation of the model fell on AnyLogic company. The main objective of the project was to reduce waiting time at passenger checkpoints. The developed and implemented model allows to assess possible difficulties in such zones and to propose various scenarios for their prevention.			
TRL 9 (Introduction of technology into operations)			
Functionality	Modelling of various processes at the terminal checkpoints became possible thanks to the unique technical and functional properties of AnyLogic software. Simulation of such processes allows to find a solution for the problem of optimizing the cost of terminal operations while improving quality of services provided to passengers.		
Effects	• improved of passenger service quality; • improved transportation safety.		
Similar cases	  		

High-speed passenger and cargo transportation

Organisation of high-speed rail traffic involves the use of technologies and platform solutions that are different from those used for traditional transportation. Digitalization and advanced information developments can increase efficiency and profitability of this type of passenger and cargo transportation, which has been till now associated with high costs.

The prospects for optimizing an integrated high-speed rail network are directly related to accuracy, completeness and reliability of information about each fast speed or high-speed main line. The optimal use of available resources is only possible through availability of comprehensive data on the object of study, which is achieved through introduction of various technology solutions, for example [16; 17] of the technology for integrated operational monitoring of rolling stock and high-speed

Table 5

Single information and communication system for managing the transportation process

DB (Germany)		Single information and communication systems for managing the transportation process
Route planner system is designed to simplify short-term schedule planning. It is an intelligent integrated rail network management system that operates using a variety of digital technologies, including big data, cloud computing, artificial intelligence, etc.		
TRL 9 (Introduction of technology into operations)		
Functionality	The introduction of this system provides train operators with quick solutions in response to requests from drivers and allows to quickly provide information about the estimated transit time.	
Effects	• increased railway safety; • improved service quality; • reduced costs of the life cycle of rolling stock and infrastructure facilities	
Similar cases	      	



Table 6

Multifunctional system of control of technical equipment on the basis of the assessment of its actual condition

NR (Great Britain)		UAV for infrastructure condition monitoring
NR uses drones to assess the condition of the railway track and increase promptness and efficiency of search for damaged sections.		
TRL 8 (Technology verification/piloting)		
Functionality	The cameras installed on the used drones have a viewing angle of 360°	
Effects	• increased railway safety; • optimized maintenance and repair processes; • increased labour productivity.	
Similar cases		

Table 7

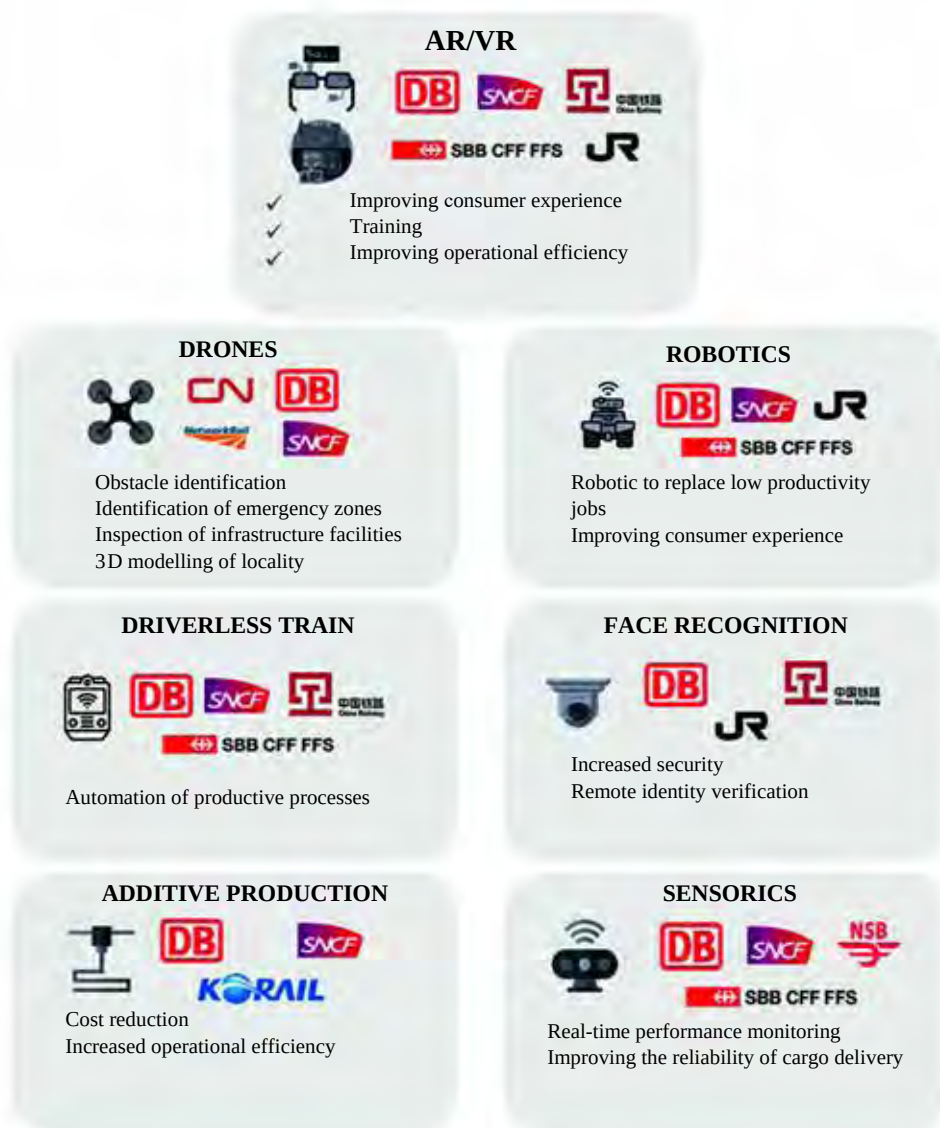
Automated heavyweight rolling stock

RioTinto (Australia)		Autonomous cargo heavyweight rolling stock
RioTinto corporation, as part of AutoHaul program (automation of trains carrying iron ore), has successfully introduced a fully automated long-haul heavy weight rolling stock in Western Australian Pilbara region, which carries out cargo transportation in the automated driving mode.		
TRL 9		
Functionality	Rolling stock, consisting of 3 locomotives, transports 28 thousand tons of iron ore over more than 280 km. Locomotives are equipped with on-board cameras allowing continuous monitoring of train movement from the control center.	
Effects	• increased railway safety; • reduced life cycle costs of rolling stock and infrastructure facilities; • increased labour productivity.	
Similar cases	—	

traffic infrastructure using satellite and geoinformation technologies (Table 3).

Such systems help railway companies to consider loading of sections, find and use free transit capacity, and identify the relationships between various elements of the transportation process. They also have as one of the effects the rapid troubleshooting regarding technical faults, which has a positive impact on reducing downtime of rolling stock.

Digital transformation and intensive development of digital technologies also predetermine the possibility to increase energy efficiency of high-speed railway transportation. The development of such technologies is significantly accelerated by advances in the field of wireless communications and data transmission, which allow high speed data processing. Table 4 presents the case of the use of technologies of simulation modelling of



Pic. 3. Critical railway digital technologies developed and/or implemented in leading companies.

interaction of rolling stock and high-speed traffic infrastructure to ensure energy efficiency and safety.

Development of transport and logistics systems within the single transport and information environment

Information systems and platform solutions that integrate various databases and provide conditions for organizing transportation using various modes and categories of transport have a significant impact on the whole transportation sector. Relevant technological solutions greatly accelerate organisation, booking and tracking processes within the framework of transportation.

Sensorics elements in conjunction with wireless technology and IIoT technology allow real-time monitoring of the current state and status of all the elements of the transport ecosystem.

These technologies are critical for various segments of the transport industry, including railway transportation. Particular attention is paid to the processes of development and implementation of single information and communication systems for managing transportation processes (Table 5).

The implementation of such systems comprises processes of automation and simplification of dispatching work, resulting

in increase in speed of processing requests, accuracy of analysis of incoming information and safety of traffic management [19].

Resource, safety, risk and reliability management at all stages of the life cycle of railway transport facilities and infrastructure

Leading transportation companies regularly improve existing management systems directly related to management and monitoring of safety and reliability of railway transportation. Research and developments aimed at achieving more advanced technological solutions are conducted by research institutes and R&D departments on a permanent basis. This field of science and technology development englobes critical technologies that comprise integrated support systems for making managerial decisions to meet reliability and safety requirements for operation of technical equipment in railway transport.

Most of leading railway companies focus their attention on implementation of systems for monitoring and maintenance of technical equipment based on their actual condition monitoring and on forecasting of their operational life using predictive modelling [20], particularly, developing monitoring technologies with the help of unmanned aerial vehicles (UAV) (Table 6).

Organisation of heavy haul cargo traffic

Heavy haul cargo transportation as a promising direction for development of the railways involves the use of both updated technical solutions and information technologies. The Rio Tinto corporation, one of the leaders in the field of heavy haul railway transportation, operates a fully automated heavy haul rolling stock using autonomous driving technologies (Table 7).

Conclusion

Leading railway companies, within the framework of their activity, develop and implement various critical digital technologies that can be systematized into key groups of digital solutions, most of the technologies and solutions are mainly of an interdisciplinary nature.

Most demanded railway critical digital solutions can be highlighted as follows:

- Internet of Things technologies used for condition monitoring of rolling stock and

infrastructure and for predictive analytics in order to increase efficiency of maintenance;

- machine vision used to detect various obstacles and accidents along the railway track;

- application of big data technologies in order to optimize the railway network;

- use of chat bots to improve quality of passenger service and improve consumer experience;

- digitalization (automation) of operational and business processes, including:

- a) cloud infrastructure for management of the railway network and infrastructure facilities;

- b) automation of control and maintenance of rolling stock;

- digitalization of container cargo transportation;

- use of procedures training devices for training corporate employees, including drivers.

Pic. 3 presents the most sought-after critical digital technologies that can dramatically change the railway industry in the medium and long term [16; 17; 21–23]. Most of these solutions correspond to the paradigm of digital transformation of companies, as well as of new and promising markets with a high share of added value, including the science, technology and innovation markets.

These critical digital solutions are characterized by the following parameters:

- use of «end-to-end» digital technologies;
- automation of productive and business processes;

- increased reliability and safety;
- improved operational efficiency.

In the context of the shortened technological cycle, a list of breakthrough, potentially critical and critical digital technologies is constantly updated. This fact determines the need for regular monitoring and improving efficiency of organisation of technological (innovation) activity of railway companies in order to maintain their leading positions in terms of competitiveness.

REFERENCES

1. Fagerberg, J. Technology and competitiveness. *Oxford review of economic policy*, 1996, Vol. 12, Iss. 3, pp. 39–51. DOI: 10.1093/oxrep/12.3.39.
2. Louvet, J. P. Les principaux résultats de l'étude «Technologies clés 2005». Ministère de l'Économie, des

Finances et de l'Industrie de la République Française, Paris, 2000. [Electronic resource]: https://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/infopres/presse/si_tech3.html.

3. Rapport public. Technologies clés 2010. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie de la République Française, Direction générale des Entreprises, 2006. [Electronic resource]: <https://www.vie-publique.fr/rapport/28624-technologies-cles-2010>.

4. Rapport public. Technologies clés 2015. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie de la République Française, 2011. [Electronic resources]: <https://www.vie-publique.fr/rapport/31652-technologies-cles-2015>; <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/114000139.pdf>.

5. Sokolov, A. V. Method of critical technologies [Metod kriticheskikh tekhnologiy]. *Foresight*, 2007, Vol. 1, Iss. 4, pp. 64–74.

6. Shashnov, S. A., Poznyak, A. Yu. Science and technology priorities for Modernization of Russian economy [Nauchno-tekhnologicheskie prioritety dlya modernizatsii rossiyskoy ekonomiki]. *Foresight*, 2011, Vol. 5, Iss. 2, pp. 48–56.

7. Danilin, I. V., Mamedyarov, Z. A., Kobrinskaya, I. Ya. Prediction of technological trends based on socio-economic factors [Prognozirovanie tekhnologicheskikh tendentsiy na osnove sotsialno-ekonomicheskikh faktorov]. Moscow, National Research Institute of World Economics and International Relations named after E. M. Primakov of the Russian Academy of Sciences, 2016, 21 p. [Electronic resource]: <https://www.imemo.ru/files/File/ru/Projects/ONI/2016/2016-DYNKIN-REP-RFFI-001.pdf>. Last accessed 21.10.2019.

8. Boychenko, A. V., Korneev, D. G., Kazakov, V. A., Lukinova, O. V. Enterprise Engineering based on IoT [Inzhiniring predpriyatiy na osnove interneta veshchey]. In: Enterprise engineering and knowledge management [Inzhiniring predpriyatiy i upravlenie znaniyami] (IP&UZ-2017): proceedings of 20th jubilee All-Russian scientific conference, 26–28 April 2017. Ed. by Telnov, Yu. F., in 2 vol., Moscow, Plekhanov REU, 2017, Vol. 1, pp. 218–224.

9. Kononov, V. N., Zambrzhitskaya, E. S., Dema, R. R., Kharchenko, M. V. Lifecycle management of industrial technologies [Upravlenie zhiznennymi tsiklami promyshlennyykh tekhnologiy]. Bulletin of Omsk University. Economics Series, 2018, Iss. 1, pp. 76–87. DOI: 10.25513/1812–3988.2018.1.76–87.

10. 5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018. [Electronic resource]: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018>. Last accessed 29.07.2019.

11. 5 Trends Appear on the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2019. [Electronic resource]: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>. Last accessed 14.10.2019.

12. Hartmann, B., King, W. P., Narayanan, S. Digital manufacturing: The revolution will be virtualized. McKinsey Quarterly, Aug. 2015. [Electronic resource]: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/digital-manufacturing-the-revolution-will-be-virtualized>. Last accessed 21.10.2019.

13. Industry 4.0: Building the digital enterprise. 2016 Global Industry 4.0 Survey. [Electronic resource]: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>. Last accessed 14.10.2019.

14. Nyikes, Z., Tokody, D., Kovács, T. In situ testing of rail damages in accordance with Industry 4.0. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2018,

Vol. 1045, Iss. 1, P. 012032. DOI: 10.1088/1742–6596/1045/1/012032.

15. Gridin, V. N., Doenin, V. V., Panishchev, V. S., Bysov, I. D. Neural Network for Forecasting Energy Consumption Load of a Railway Marshalling Yard. *World of Transport and Transportation*, Vol. 17, 2019, Iss. 3, pp. 6–15. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-6-15.

16. Rosenberg, E. N., Dzyuba, Yu. V., Batraev, V. V. On directions of development of digital railway [O napravleniyakh razvitiya tsifrovoy zheleznoy dorogi]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2018, Iss. 1, pp. 9–13.

17. Rosenberg, E. N., Korovin, A. S. Global trends of development of intelligent transport systems [Globalnie trendy razvitiya intellektualnykh transportnykh sistem]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2018, Iss. 12, pp. 14–19.

18. Wang, Y., De Schutter, B., Boom van den, T., Ning, B. Optimal trajectory planning for trains under a moving block signaling system. Proceedings of the 2013 European Control Conference, Zurich, Switzerland, 2013, pp. 4556–4561.

19. Rosenberg, E. N., Batraev, V. V. Innovative development of interval regulation systems [Innovatsionnoe razvitiye sistem intervalnogo regulirovaniya]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2018, Iss. 7, pp. 5–9.

20. Rosenberg, E. N., Korovin, A. S. Management of functional safety of railway transport [Upravlenie funktsionalnoy bezopasnostyu zheleznodorozhnogo transporta]. *Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways*, 2018, Vol. 3, pp. 23–35.

21. Asaul, A., Malygin, I., Komashinskiy, V. The project of intellectual multimodal transport system. *Transportation Research Procedia*, 2017, Vol. 20, pp. 25–30. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.006.

22. Consortium for ITS Training and Education (CITE). [Electronic resource]: <http://www.citeconsortium.org/partners/resources/>. Last accessed 21.10.2019.

23. Intelligent Transportation Systems (ITS) Professional Capacity Building (PCB) Strategic Plan, 2017–2021. [Electronic resource]: https://www.pcb.its.dot.gov/strategic_plan/toc.aspx. Last accessed 21.10.2019.

Acknowledgments

The authors are grateful to the colleagues who took part in the research, the results of which were used while preparing this article: Beloshitsky Alexey V., Master in Economics, Deputy Director of the Center of Storage and Analysis of Big Data of Lomonosov Moscow State University; Burova Anastasia S., Master in Physics of Nanosystems, Engineer of the Laboratory of Bioorganic Structure of Federal Research Center for Crystallography and Photonics; Rakov Dmitry A., Master in Management, leading specialist of the Center of Storage and Analysis of Big Data of Lomonosov Moscow State University; Smirnov Roman G., Master in Economics, leading specialist of the Center of Storage and Analysis of Big Data of Lomonosov Moscow State University; Smirnova Tatyana V., Ph.D. student of the Department of Statistics, leading economist of the Faculty of Economics of Lomonosov Moscow State University; Tereshchenko Igor A., Master in Law, leading specialist of the Center of Storage and Analysis of Big Data of Lomonosov Moscow State University; Titova Yulia A., Master in Management, leading specialist of the Center of Storage and Analysis of Big Data of Lomonosov Moscow State University.



Установление зависимости изменений нормальных напряжений от степени износа рельса



Анатолий БОНДАРЕНКО



Сергей ОРЛОВ



Владимир КАРАБАНОВ

Бондаренко Анатолий Николаевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Орлов Сергей Евгеньевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Карabanов Владимир Иосифович – ООО «ПроТермит», Тольятти, Россия.*

Безопасность эксплуатации железнодорожных путей связана с напряжённым состоянием в рельсах, зависящим от прикладываемой нагрузки (вертикальной и боковой) и изменений профиля, связанных с износом.

Целью настоящей работы является получение зависимости кромочных напряжений в рельсе как функции от величины износа. Полученная зависимость используется для определения максимальных напряжений. Методика заключается в построении сплайн-аппроксимации профиля изношенного рельса. Предложенный подход позволяет моделировать реальный износ рельса (вертикальный и боковой).

В работе применён практический алгоритм расчёта в среде MathCAD влияния степени износа

рельса на увеличение максимальных напряжений изгиба и снижение допускаемых нагрузок.

Разработана методика моделирования профиля и расчёта контурных нормальных напряжений при изгибе рельса с учётом степени износа. Рассматривается движение колёсной пары в рельсовой колее на прямом участке пути. В то же время методика допускает также учёт горизонтального бокового усилия от гребня колеса при движении различных видов подвижного состава в кривых участках пути. Проведены расчёты и получена нелинейная зависимость роста максимальных сжимающих и растягивающих нормальных напряжений от степени износа. Выделены три характерных диапазона и даны рекомендации по снижению разрушающей нагрузки с учётом износа рельса.

Ключевые слова: железная дорога, износ, моделирование, напряжения, нагрузка, оси инерции, схема, расчёт, рельс, боковая грань рельса, подошва рельса, головка рельса, косой изгиб.

*Информация об авторах:

Бондаренко Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, начальник отдела технологий ИВМ Учебно-научного центра (УНЦ) «МИИТ-эксперт» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, bond4@rambler.ru.

Орлов Сергей Евгеньевич – ведущий инженер Головного центра сварочных технологий транспорта (ГЦСТТ) Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, saintser@yandex.ru.

Карabanов Владимир Иосифович – заместитель генерального директора по науке ООО «ПроТермит», Тольятти, Россия, karabvi@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 18.02.2019, принята к публикации 11.09.2019.

For the English text of the article please see p. 48.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема интенсивного износа боковой грани рельсов, существенно влияющая на безопасность движения поездов и эксплуатационные расходы железных дорог, продолжает оставаться уже более 30 лет на сети железных дорог одной из приоритетных [1].

На безопасность эксплуатации рельсовых плетей влияют, в том числе, напряжения, возникающие в сварных соединениях, приводящие к преждевременному наступлению предельных состояний, например, по достижению допускаемых напряжений и возникновению трещин.

Возникновение растягивающих напряжений в области под головкой в результате локального изгиба вертикальной и боковой части рельса на железнодорожном полотне является значительным и может потенциально способствовать накоплению усталостных повреждений. Поэтому оценка напряжённого состояния в подошве рельса в отношении изменений профиля рельса из-за износа является актуальной задачей.

На конференции по железнодорожному машиностроению (CORE2012: Global Perspectives; 10–12 сентября 2012 года, Брисбен, Австралия) был представлен доклад [2], содержащий результаты применения МКЭ-модели к анализу напряженного состояния рельса в условиях тяжеловесных перевозок. Построенная МКЭ-модель учитывала изменение профиля рельса из-за износа. Эта модель была получена в результате довольно масштабного и трудоёмкого исследования, опирающегося на решение контактной задачи.

С практической точки зрения представляет интерес решение проблемы, связанной с эксплуатацией рельсов с фиксированной степенью износа, с использованием технических регламентов на основе известного подхода к определению внутренних усилий и напряжений в рельсах. В этом подходе изгибающие моменты от поездной нагрузки определяются как в балке на упругом основании и рассчитывается величина максимальных напряжений изгиба. Вычислительная среда MathCAD позволяет построить практический, легко реализуемый алгоритм такого расчёта с возможностью анализа, как влияет та или

иная степень износа на увеличение максимальных напряжений изгиба и, соответственно, на снижение допускаемых нагрузок.

Во всём мире, где интенсивно используются сети железных дорог для грузовых и пассажирских перевозок, возникают проблемы с износом рельсов, которые в свою очередь существенно влияют на безопасность движения и приводят к дополнительным расходам на содержание инфраструктуры. Только в Российской Федерации ОАО «РЖД» ежегодно расходует более 4 млрд руб. на предупреждение и устранение последствий износа рельсов [3].

Поскольку практически все эксплуатируемые железнодорожные пути имеют рельсы с той или иной степенью износа, и они могут быть использованы для изготовления бесстыкового пути, то актуальным является оценка прочности в зависимости от величины износа головки рельса.

Требования к безопасности в общем устанавливаются документами № 184-ФЗ [4] и № 16-ФЗ [5], а непосредственно — в ТР ТС 003/2011 [6]. В то же время в ГОСТ Р 57179 [7, таблица 1] допускается снижение разрушающей нагрузки на 2 % от 1 мм износа рельса, но не более 20 % при максимальном износе рельса выше 10 мм. Таким образом ГОСТ Р 57179 фиксирует установление предельного состояния от величины износа в виде линейной зависимости. Однако в работе [3] отмечается, что процесс изнашивания существенно отличается от линейного закона, а, следовательно, накопление повреждений и наступление предельного состояния в зависимости от величины износа тоже должны носить нелинейный характер.

В общем случае действующие напряжения σ складываются из напряжений σ_n , возникающих от эксплуатационных нагрузок, температурных напряжений σ_θ и остаточных напряжений $\sigma_{ост}$:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_\theta + \sigma_{ост}. \quad (1)$$

В свою очередь, остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ могут быть рассмотрены как сумма остаточных напряжений, полученных при изготовлении $\sigma_{о, из}$ и при сварке $\sigma_{о, св}$:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{о, из} + \sigma_{о, св}. \quad (2)$$

Все указанные напряжения в той или иной степени оказывают влияние на работоспособность рельсов.



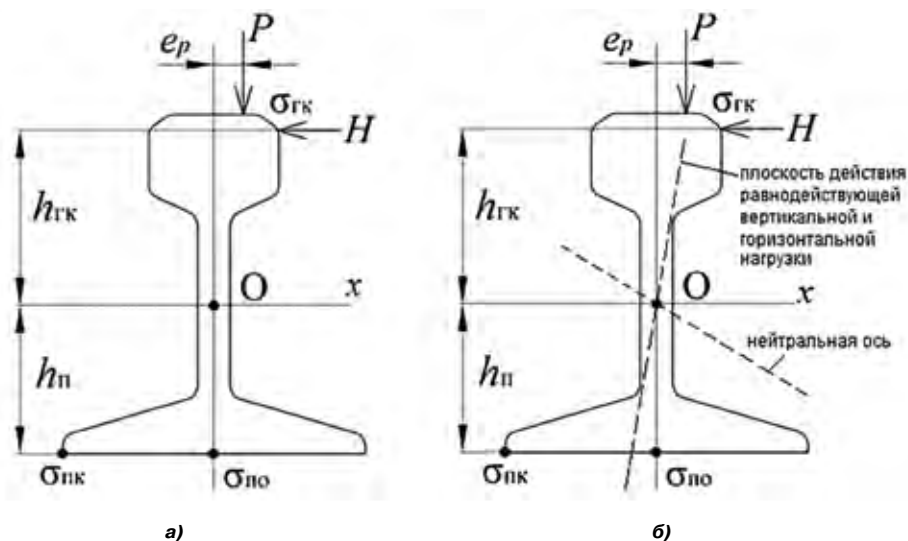


Рис. 1. Схема приложения сил на рельс
(а – вертикальная и горизонтальная нагрузки, б – положение нейтральной оси).

Однако наступление предельных состояний в рельсе при эксплуатации железнодорожного пути главным образом обуславливается приростом напряжения от нагрузок $\sigma_{н}$ вследствие изнашивания головки рельса. Поэтому в данном исследовании ограничимся рассмотрением изменения $\sigma_{н}$ в зависимости от величины износа.

Соответственно целью настоящей работы является получение зависимости напряжений в рельсе как функции от величины износа.

Работа основана на математическом моделировании напряжённо-деформированного состояния с учётом нелинейного изменения геометрии поперечного сечения рельса, связанного с износом рельса, как и в аналогичных работах зарубежных авторов [8–10]. Для этого была разработана геометрическая модель поперечного сечения рельса и использована расчётная схема (модель нагружения) согласно нормативным документам [11; 12]. Методика (функциональные зависимости) и последовательность силового расчёта приняты в соответствии с работой [13]. В этой работе для определения максимальных напряжений использован математический аппарат (в виде аналитических зависимостей) линий влияния изгибающих моментов в балке на упругом основании, реализуемый в вычислительной среде MathCAD. На начальном этапе расчёт

напряжений ограничивается рассмотрением износа стандартного профиля поперечного сечения рельса в прямых участках пути.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первоначально принимается, что вертикальная нагрузка P от колеса на рельс не имеет смещения относительно оси симметрии сечения рельса (рис. 1). Однако при износе сечение становится несимметричным, изменяется положение главных осей инерции, и исходный момент от вертикальной нагрузки должен быть разложен на составляющие моменты (M_z , M_x , M_y) относительно новых (главных) осей инерции. Вследствие чего возникает сложное напряжённое состояние, характеризующееся наличием нормальных и касательных напряжений.

Максимальные нормальные напряжения в подошве и головке рельса от изгиба при вертикальной нагрузке:

$$\sigma_{\max} = M_x / W_x, \quad (3)$$

где W_x – момент сопротивления поперечного сечения рельса, вычисленный относительно нейтральной оси для наиболее удалённого волокна;

M_x – изгибающий момент от вертикальной нагрузки.

На основании многочисленных расчётов и экспериментов получена и используется в прикладных расчётах формула для напряжений в кромке подошвы рельса [13]:

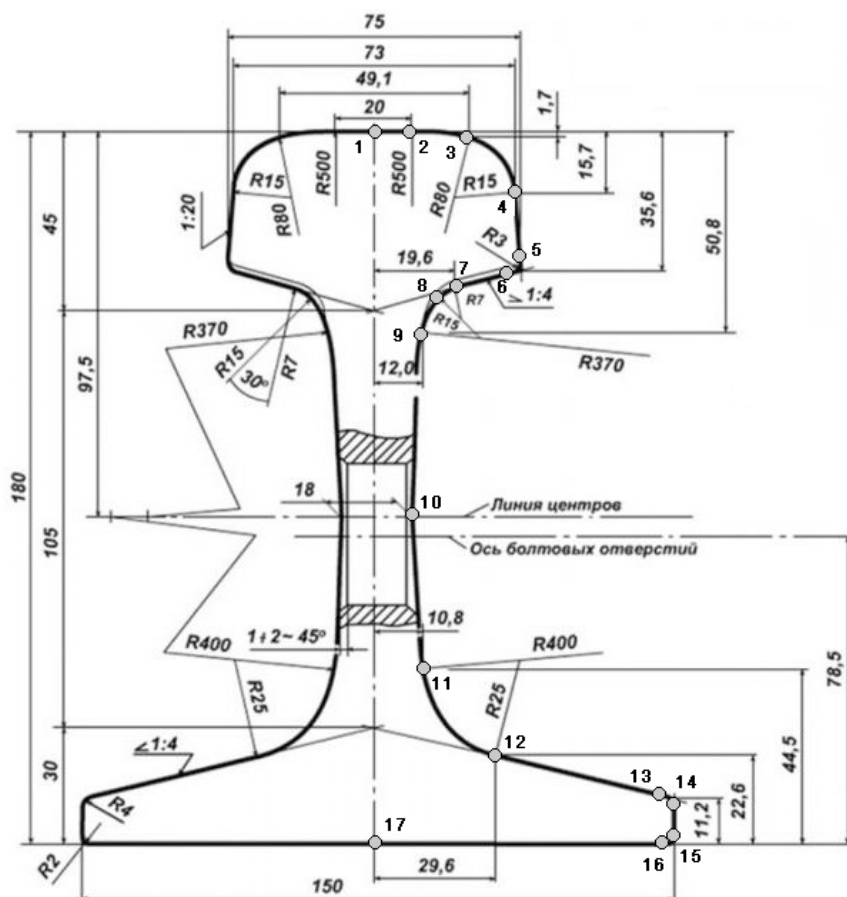


Рис. 2. Геометрические параметры поперечного сечения рельса Р65 и расчётные точки.

$\sigma_{\text{ПК}} = f \cdot \sigma_{\text{по}}$ (4)
 где f — коэффициент перехода к кромочным напряжениям, зависящий от типа экипажа, радиуса кривой, действия горизонтальных нагрузок (H на рис. 1), эксцентриситета приложения вертикальной нагрузки — e_p ; сезонности (лето, зима) и т.п.

Нормальные напряжения в поперечном сечении, возникающие от каждого из изгибающих моментов, складываются. При одновременном действии двух изгибающих моментов на нейтральную ось поперечного сечения при неравенстве моментов инерции сечения I_x и I_y возникает явление известное, как косой изгиб. Следовательно, при вычислении максимальных нормальных напряжений необходимо специально определять положение нейтральной оси и наиболее удалённых волокон от этой нейтральной оси.

Для построения математической модели описания профиля рельса Р65 исполь-

зован чертёж, представленный на рис. 2, как более информативный, чем приведённый в ГОСТ Р 51685-2013 [14]. Нет принципиальных трудностей для реализации в данной модели других профилей и марок рельсов.

Модель выделяет 17 узловых точек (рис. 2) и определяет аналитически в среде MathCAD их координаты в местах сопряжения кривых и прямых. Для построения профиля на кривых участках профиля, включая закругления с малыми радиусами, аналитически отыскиваются координаты центров кривизны, которые используются для ввода соответствующих угловых координат, чтобы получить равномерные распределения координат x , y по дугам этих кривых. На прямых участках (4–5, 6–7, 12–13 и 14–17) также производится разбиение (до 20 точек) с целью использования их в дальнейшем для численного интегрирования площади и моментов площади попе-



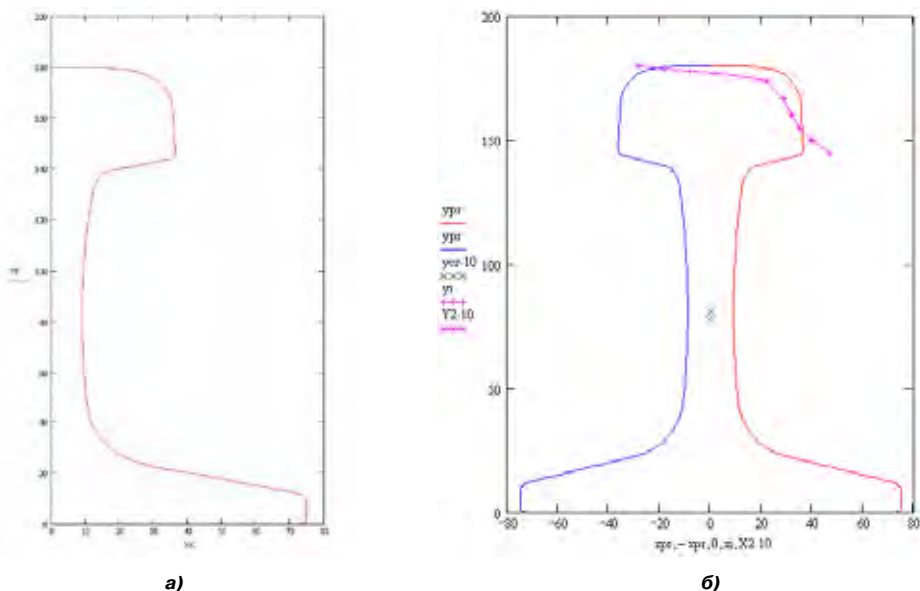


Рис. 3. Профиль поперечного сечения рельса Р65: а) сохраняемый как совокупность точек контура (координат x, y); б) шаблон профиля износа (отмечен кривой с крестиками).

речного сечения рельса на основе контура профиля, представляемого совокупностью точек, вместо использования непосредственно уравнений линий и окружностей. Всё это позволяет получить совокупность дискретных точек, описывающих профиль рельса, передаваемую в виде массива координат x, y в другой документ MathCAD для дальнейшей численной обработки (рис. 3а).

Для определения соответствующих геометрических характеристик сечения изношенного рельса во втором документе MathCAD присваиваются значения параметров, описывающих расчётный профиль (шаблон) износа головки рельса. Шаблон может перемещаться по вертикали и горизонтали с некоторым шагом относительно головки рельса (рис. 3б).

Характерный профиль определён на основании ранее выполненных измерений как некий шаблон, в данном случае — неизменяемый профиль износа, положение которого может изменяться заданием координат смещения по оси x и y (x_{iv}, y_{iv} , см. рис. 3б), например, с шагом — 1,6 и 1,1 мм. С уменьшением опорных координат x_{iv}, y_{iv} шаблон профиля износа перемещается влево и вниз относительно профиля поперечного сечения рельса. Шаблон может также поворачиваться на некоторый угол относительно своей левой базовой точки,

чтобы было возможным приспособить данный шаблон к реальному наблюдаемому износу рельса. Для этого вводится угол θ , который может быть использован для пересчёта координат по известным зависимостям:

$$x' = x \cdot \cos\theta - y \cdot \sin\theta, \quad (5)$$

$$y' = x \cdot \sin\theta - y \cdot \cos\theta. \quad (6)$$

Значение этого угла вычисляется по углу наклона первого участка шаблона и регулируется заданием коэффициента (от 0 до 1) в начале выражения, построенного для этого угла (0 представляет обычное положение шаблона с углом — 3,173°, 1 означает, что левая линейная часть шаблона располагается горизонтально).

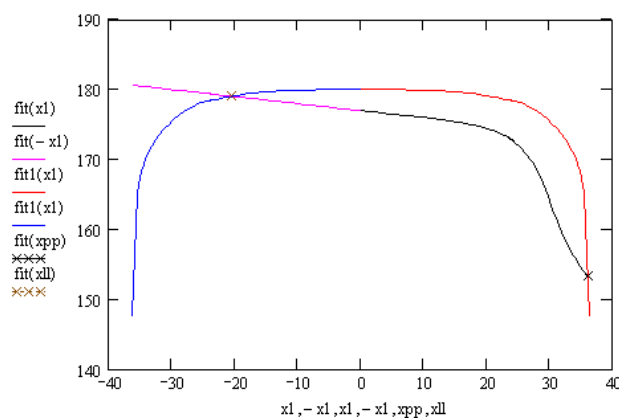
Для профиля износа и профиля головки рельса строятся сплайны, дающие возможность аналитического описания кривых, заданных совокупностью точек, что облегчает нахождение точек пересечения этих двух профилей и построение процедуры численного интегрирования по площади, заключённой между этими кривыми (рис. 4).

Общий алгоритм выполнения расчётов контурных нормальных напряжений в поперечном сечении рельса с учётом износа является следующим:

1. Вычисление координат точек, характеризующих геометрию поперечного сечения

Определение интервала интегрирования:

$x_p := 35$	Given	$fit1(x_p) = fit(x_p)$	$x_{pp} := Find(x_p)$	$x_{pp} = 36.048$
$x_l := -30$	Given	$fit(x_l) = fit1(-x_l)$	$x_{ll} := Find(x_l)$	$x_{ll} = -20.543$



$x_p := 35$	Given	$fit1(x_p) = fit(x_p)$	$x_{pp} := Find(x_p)$	$x_{pp} = 36.048$
$x_l := -30$	Given	$fit(x_l) = fit1(-x_l)$	$x_{ll} := Find(x_l)$	$x_{ll} = -20.543$

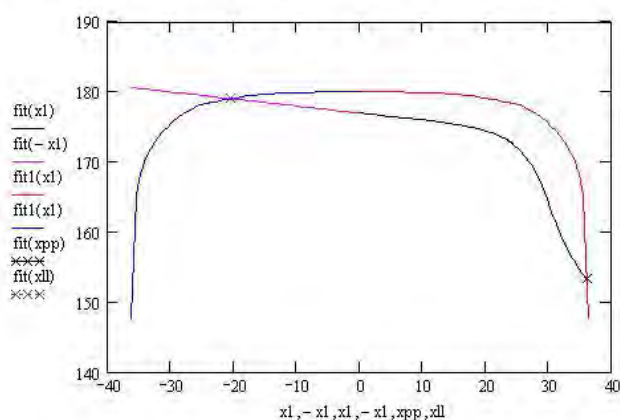


Рис. 4. Определение интервалов интегрирования как точек пересечения сплайнов по профилю износа и по профилю головки рельса.

(профиля) неизношенного рельса (координаты центра тяжести, моменты инерции).

Было использовано численное интегрирование по профилю неизношенного рельса (для отработки техники интегрирования), хотя могут быть использованы и известные справочные данные.

2. Вычисление координат точек, характеризующих геометрию шаблона (координаты x , y).

3. Позиционирование положения шаблона в зависимости от величины износа (трансляция и поворот), то есть создание модели шаблона износа.

4. Построение сплайнов профиля головки рельса и профиля шаблона износа.

5. Вычисление площади фигуры, соответствующей снятому материалу изношенной головки рельса

Эта фигура ограничивается кривыми сплайнов профиля головки рельса и профиля шаблона износа (рис. 5) и далее именуется «площадь износа».

6. Вычисление координат центра тяжести «площади износа».

7. Вычисление осевых и центробежного моментов инерции «площади износа» относительно собственных осей.

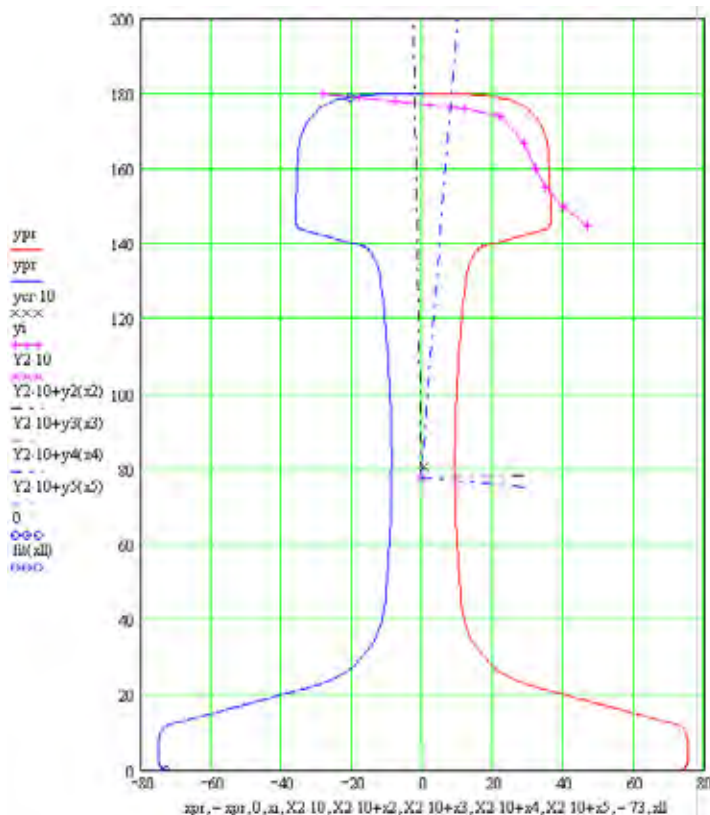


Рис. 5. Главные оси моментов инерции профиля изношенного рельса (наклонены влево); оси, ориентированные по отношению к нейтральной оси (наклонены вправо) и крайние точки, наиболее удалённые от нейтральной оси (отмечены кружочками).

8. Вычисление координат центра тяжести поперечного сечения изношенного рельса.

9. Вычисление осевых и центробежного моментов инерции поперечного сечения изношенного рельса.

10. Вычисление главных моментов инерции поперечного сечения изношенного рельса.

11. Вычисление угла наклона главных осей инерции поперечного сечения изношенного рельса.

12. Определение компонент изгибающего момента в главных осях инерции.

13. Определение положения нейтральной оси.

14. Определение максимально удалённых от нейтральной оси точек профиля 1 и 2 изношенного рельса и их координат (см. рис. 5).

15. Вычисление нормальных напряжений в этих точках.

Этим практически и исчерпывается расчёт максимальных нормальных напря-

жений для рассматриваемого положения шаблона износа. Далее расчёт повторяется с пункта 3 вышеуказанного алгоритма для следующего положения шаблона износа. Формулы для вычисления соответствующих величин, участвующих в расчёте достаточно известны (см. любой учебник по сопротивлению материалов или механике деформируемого тела), и здесь не приводятся.

Смещения шаблона по вертикали и горизонтали для рельса Р65 были приняты равными: с шагом 1,6 мм по горизонтали и 1,1 мм по вертикали (рис. 6).

Полученные результаты копируются в массивы и строятся графики изменения напряжений в зависимости от положения шаблона, регулирующего степень износа. В итоге результаты расчёта сведены в таблицу 1, а в графическом виде представлены на рис. 7.

Примечание. В качестве исходного значения изгибающего момента относительно

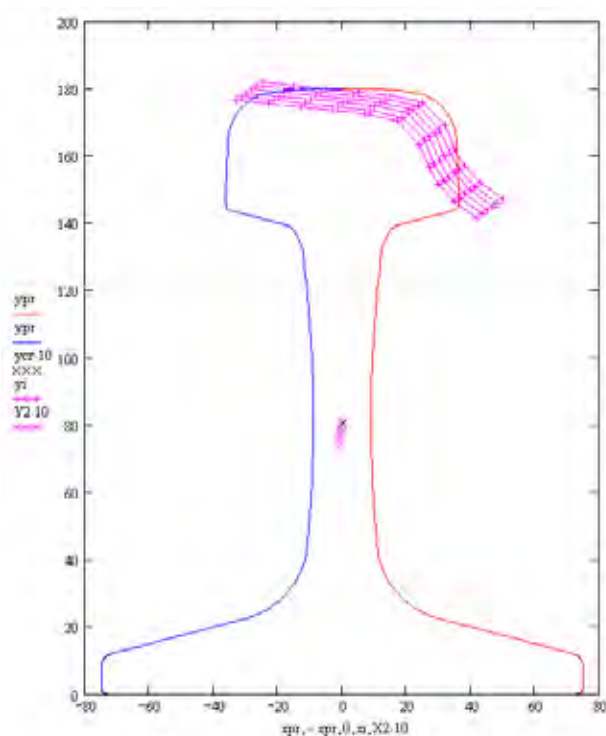


Рис. 6. Смещение шаблона профиля износа относительно профиля головки рельса (крестики в центральной части профиля рельса указывают смещение центра тяжести плоского сечения рельса с учётом износа, определяемого задаваемыми положениями шаблона).

Таблица 1

Зависимость нормальных напряжений от износа рельса

Растягивающие напряжения в подошве рельса, σ	Сжимающие напряжения в головке рельса, σ	Вертикальный износ рельса, Δh , мм
283,769	-230,369	0
280,282	-226,803	0,5
293,365	-233,093	1,6
308,448	-240,064	2,8
325,486	-247,765	3,9
344,648	-256,248	5
365,881	-265,481	6,2
389,45	-275,542	7,3
415,78	-286,609	8,4
445,029	-298,715	9,6

оси x принимается в качестве базовой приведённая величина $M = 10^5$. Таким образом, для получения реальных напряжений для конкретной нагрузки следует использовать поправочный коэффициент, учитывающий отличие рассматриваемого значения от базового.

На рис. 7 представлены зависимости изменений контурных нормальных напряжений по абсолютной величине в поперечном сечении изношенного рельса для подошвы (точка 1) и головки (точка 2) при

нагрузке $P = \text{const}$. Анализ зависимостей позволяет заключить, что:

- 1) независимо от знака (сжимающие или растягивающие) по мере увеличения износа величина напряжений растёт нелинейно;
- 2) темп роста напряжений на подошве больше, чем на головке рельса.

ГОСТ Р 57179 устанавливает снижение значения разрушающей нагрузки от величины износа в виде линейной зависимости в безразмерном виде (или в %). Поэтому представляется целесообразным определить подобным



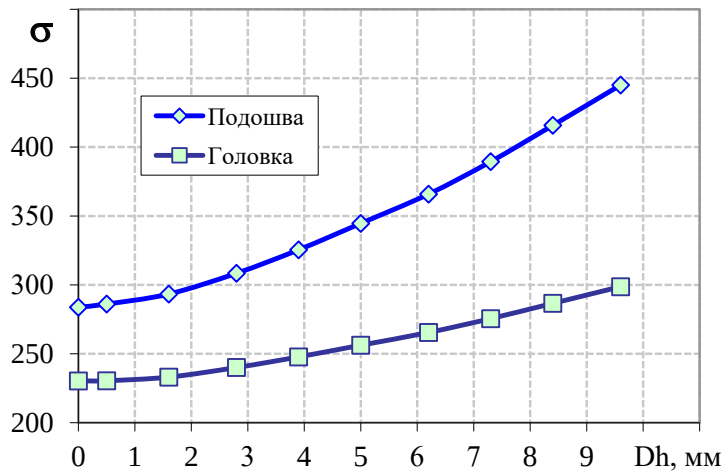


Рис. 7. Зависимость контурных напряжений от степени износа (напряжения взяты по абсолютной величине).

образом коэффициент повышения напряжений от износа как величину $\Delta k_{\text{и}}$:

$$\Delta k_{\text{и}} = \frac{\sigma_{\text{и}} - \sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{н}}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{и}}$ — нормальные напряжения с учётом износа рельса;

$\sigma_{\text{н}}$ — нормальные (действующие) напряжения без износа.

В соответствии с формулой (7) зависимости, представленные на рис. 7, пересчитаны и показаны в безразмерном виде на рис. 8. Для проведения анализа дополнительно представлен линейный график (показан красной сплошной линией), соответствующий ГОСТ Р 57179.

Анализ показывает, что коэффициент повышения напряжений от износа $\Delta k_{\text{и}}$ на подошве больше, чем в головке рельса. Поэтому необходимо дальнейшее рассмотрение проводить на основе зависимости $\Delta k_{\text{и}} = f(\Delta h)$ для подошвы рельса, где Δh — вертикальный износ рельса.

В результате можно констатировать, что график по ГОСТ Р и изменения напряжений на подошве до износа 2 мм практически совпадают, т.е. в диапазоне износа 0–2 мм ГОСТ Р 57179 корректно отражает наступление предельного состояния. Данный диапазон выделен на рис. 8 и обозначен цифрой I. При значениях износа более 2 мм наблюдается существенное увеличе-

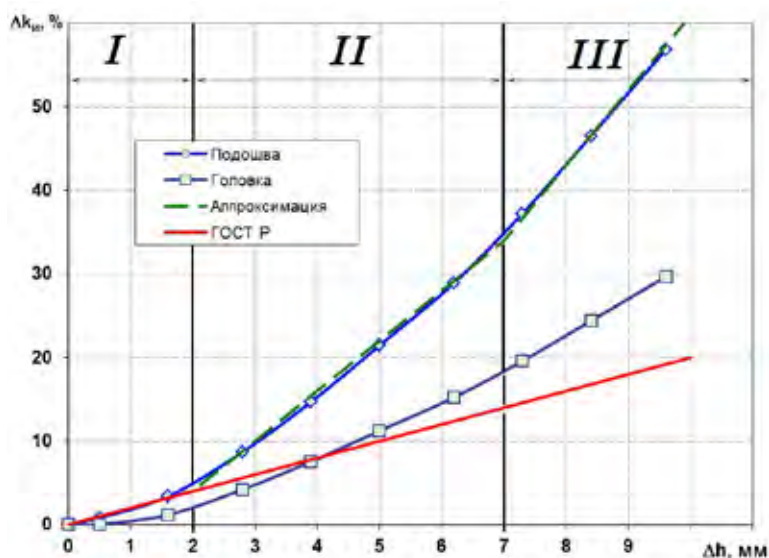


Рис. 8. Зависимость коэффициента повышения напряжений от степени износа.

ние напряжений, поэтому были выделены два диапазона — II и III (показаны пунктирными линиями). При этом во втором диапазоне величина износа меняется от 2 до 7 мм, а снижение разрушающей нагрузки должно составлять 6 % на 1 мм износа. В третьем диапазоне величина износа изменяется от 7 мм до предельно установленных ГОСТом 10 мм, при этом снижение разрушающей нагрузки должно составлять 9 % на 1 мм износа.

Таким образом, ГОСТ Р 57179 отражает правильную тенденцию, направленную на снижение разрушающей нагрузки в зависимости от величины износа, но даёт её менее жёсткую оценку, чем она должна быть для обеспечения безопасности эксплуатации пути.

ВЫВОДЫ

1. Анализ напряжённого состояния в условиях перевозок тяжеловесных составов, связанный с изменением профиля рельса в процессе изнашивания, является актуальной задачей для всех стран с развитым железнодорожным сообщением. Для решения задачи разрабатывают различные модели и проводят масштабные и трудоёмкие исследования. Оригинальность разработанной в Российском университете транспорта (МИИТ) модели состоит в том, что при принятых допущениях и схематизации она позволяет установить закономерность изменения контурных нормальных напряжений и коэффициента повышения напряжений Δk_n от износа Δh , которая носит нелинейный характер.

2. Вне зависимости от типа рельсов (P50, P65, P75, P75, UIC54 (54E1), UIC60 (60E1) и др.) применимость расчётной математической модели универсальна для всех типов рельсов, выпускаемых в мире. В частности, в России в ГОСТ Р 57179 нормировано значение разрушающей нагрузки в 2 % на каждый миллиметр износа рельса. В результате моделирования установлено, что необходимо выделить три диапазона в пределах от 0 мм до максимального установленного значения в 10 мм:

- от 0 мм до 2 мм: снижение должно составлять 2 % на 1 мм износа;
- от 2 мм до 7 мм: снижение должно составлять 6 % на 1 мм износа;

- от 7 мм до 10 мм: снижение должно составлять 9 % на 1 мм износа.

Указанные снижения могут быть использованы как для рельсов без сварных швов (старогодных-изношенных), так для сварных соединений рельсов, изготовленных, например, термитной сваркой.

3. Значения коэффициента повышения напряжений могут быть использованы как корректирующий коэффициент Δk_n (учитывающий износ) в практическом расчёте нормальных напряжений в рельсе любого типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гречнева М. В., Медведев С. И., Неживляк А. Е. Снижение бокового износа железнодорожных рельсов при помощи плазменного поверхностного упрочнения // Вестник ИРГТУ. — 2010. — № 6. — С. 29–34.
2. Ranjha, S. A., Ding, K., Mutton, P. J., Kapoor, A. Mechanical state of the rail underhead region under heavy haul operations. CORE2012: Global Perspectives; Conference on railway engineering, 10–12 September, 2012, Brisbane, Australia.
3. Показкий В. А., Тарасов А. В. Оценка интенсивности бокового износа различных типов рельсов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — № 3. — С. 1187–1188.
4. Федеральный закон от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
5. Федеральный закон от 9 февраля 2007 г. № 16-ФЗ «О транспортной безопасности».
6. Технический регламент ТС «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011).
7. ГОСТ Р 57179-2016 «Сварка рельсов термитная. Методика испытаний и контроля качества».
8. Jeong, D. Y., Tang, Y. H., Orringer, O. Estimation of rail wear limits based on rail strength investigations. Volpe center final report, 1998. DOT/FRA/ORD-98/07. [Электронный ресурс]: <https://www.fra.dot.gov/Elib/Document/2935>. Доступ 11.09.2019.
9. Jeong, D. Y. Analytical modeling of rail defects and its applications to rail defect management. Volpe center technical report for the UIC/WEC joint research project on rail defect management, 2003. [Электронный ресурс]: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/8995/dot_8995_DS1.pdf. Доступ 11.09.2019.
10. Lyons, M. L., Jeong, D. Y., Gordon, J. E. Fracture mechanics approach to estimate rail wears limits. Proceedings of the 2009 ASME rail transportation division, Fall technical conference RTDF 2009. October 20–22, 2009, Fort Worth, Texas, USA. [Электронный ресурс]: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.818.8345&rep=rep1&type=pdf>. Доступ 11.09.2019.
11. Правила производства расчётов верхнего строения железнодорожного пути на прочность. — М.: Трансжелдориздат, 1954. — 70 с.
12. Правила расчёта пути на прочность и надёжность в зависимости от класса линий (1-я редакция) / МПС ВНИИЖТ. — М., 1999. — 96 с.
13. Карпушенко Н. И., Бондаренко А. Н., Иванова Л. И. Расчёт железнодорожного пути на прочность и устойчивость: Учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2002. — 62 с.
14. ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия».





Determining Dependence of the Change in Normal Stresses in Rail on Its Wear Degree



Anatoly N. BONDARENKO



Sergey E. ORLOV



Vladimir I. KARABANOV

Bondarenko, Anatoly N., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Orlov, Sergey E., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Karabanov, Vladimir I., LLC ProTermit, Tolyatti, Russia.*

ABSTRACT

The safety of railway operation is associated with the stress state in rails, depending on the applied load (both vertical and lateral load) and on changes in the rail profile associated with wear.

The objective of this work is to obtain and describe the dependence of the edge stresses in a rail as a function of wear magnitude. The obtained dependence is used to determine the maximum stresses. The technique consists in constructing a spline approximation of a worn rail profile. The proposed approach allows simulating real rail wear (vertical and lateral wearing).

The work has applied in MathCAD environment a practical algorithm for calculating the influence of the degree of rail wear on the increase in the

maximum bending stresses and on decrease in permissible loads.

A technique has been developed for simulating the profile and calculating the normal contour stresses during rail bending, considering the wear magnitude. It is applied to the movement of a rail wheelset along the rail track in a straight section of the track. The technique also allows considering horizontal lateral force from the wheel flange during movement of various types of rolling stock in curved track sections. Calculations have been carried out and a nonlinear dependence of the growth of maximum compressive and tensile normal stresses on the degree of wear has been obtained. Three characteristic ranges have been identified and recommendations have been given for reducing the destructive load with regard to rail wear.

Keywords: railway, wear, simulation, stress, load, axis of inertia, chart, calculation, rail, rail side face, rail foot, rail head, unsymmetrical bending.

*Information about the authors:

Bondarenko, Anatoly N. – Ph.D. (Eng), Head of the IBM technology section of MIIT-Expert Training and Research Center of the Institute of Management, Control and Digital Technology of Russian University of Transport, Moscow, Russia, bond4@rambler.ru.

Orlov, Sergey E. – leading engineer of Leading Center of Welding Technology in Transport Sector of the Institute of Management, Control and Digital Technology of Russian University of Transport, Moscow, Russia, saintser@yandex.ru.

Karabanov, Vladimir I. – Deputy Director General for research of LLC ProTermit, Togliatti, Russia, karabvi@mail.ru.

Article received 18.02.2019, accepted 11.09.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 38.

Background. The problem of intensive rail side wear which significantly affects safety of train traffic and operating costs of railways, has been continuously one of the priorities for rail networks for more than 30 years [1].

Safety of operation of rail tracks is particularly affected by stresses arising in welded joints, leading to premature onset of limit states, for example, through achieving maximum permissible stresses and cracking conditions.

The occurrence of tensile stresses in the area under the rail head as a result of local bending of vertical and lateral parts of the rail on the railway track is significant and can potentially contribute to accumulation of fatigue damage. Therefore, assessment of the stress state in the rail foot regarding changes in the rail profile due to wear is amidst most pressing problems.

For example, the conference on railway engineering (CORE2012: Global Perspectives; September 10–12, 2012, Brisbane, Australia) comprised the report [2] containing the results of applying FEM model to the analysis of the stress state of a rail under heavy traffic conditions. The constructed FEM model considered the change in the rail profile due to wear. This model was obtained as a result of a rather large-scale and laborious study, based on the solution of the contact problem.

From a practical point of view, it is of interest to solve the problem associated with operation of rails with a fixed degree of wear using technical regulations based on the well-known approach to determining internal forces and stresses in rails. That approach determines bending moments from the train load as in a beam on an elastic foundation, and thus calculates the maximum bending stresses. MathCAD computing environment allows to build a practical, easily implemented, computation algorithm allowing to analyze how a degree of wear affects the increase in maximum bending stresses and, accordingly, the reduction of permissible loads.

All over the world, where railway networks are intensively used for cargo and passenger transportation, they experience problems due to rail wear, that consequently significantly affect traffic safety and cause additional infrastructure maintenance costs. In the Russian Federation alone, JSC Russian Railways spends more than 4 billion rubles

annually on prevention and elimination of the consequences of rail wear [3].

Since almost all operating railway tracks have rails with one or another wear magnitude, and the rails can be used to make a continuously welded track, it is relevant to assess the strength depending on the amount of rail head wear.

Safety requirements in Russia are generally established by documents [federal laws] No. 184-FZ [4], No. 16-FZ [5] and are directly regulated by TR TS [Technical Regulation of the Customs Union] 003/2011 [6]. At the same time, GOST [State standard] R57179 [7, Table 1] allows reducing breaking load rate by 2 % when rail wear is of 1 mm, but not more than by 20 % with a maximum rail wear of more than 10 mm. Thus, GOST R57179 stipulates linear dependence of the limit state on the wear magnitude. However, the work [3] notes that the wear process differs significantly from the linear law, and, therefore, accumulation of damage and the onset of the limit state depending on the wear value should also be non-linear.

In the general case, the acting stresses σ are composed of the stresses σ_o , arising from operational loads, temperature stresses σ_θ and residual stresses σ_{res} :

$$\sigma = \sigma_o + \sigma_\theta + \sigma_{res}. \quad (1)$$

In turn, the residual stresses σ_{res} can be considered as the sum of the residual stresses obtained in the process of manufacturing $\sigma_{res, man}$ and during welding $\sigma_{res, wel}$:

$$\sigma_{res} = \sigma_{res, man} + \sigma_{res, wel}. \quad (2)$$

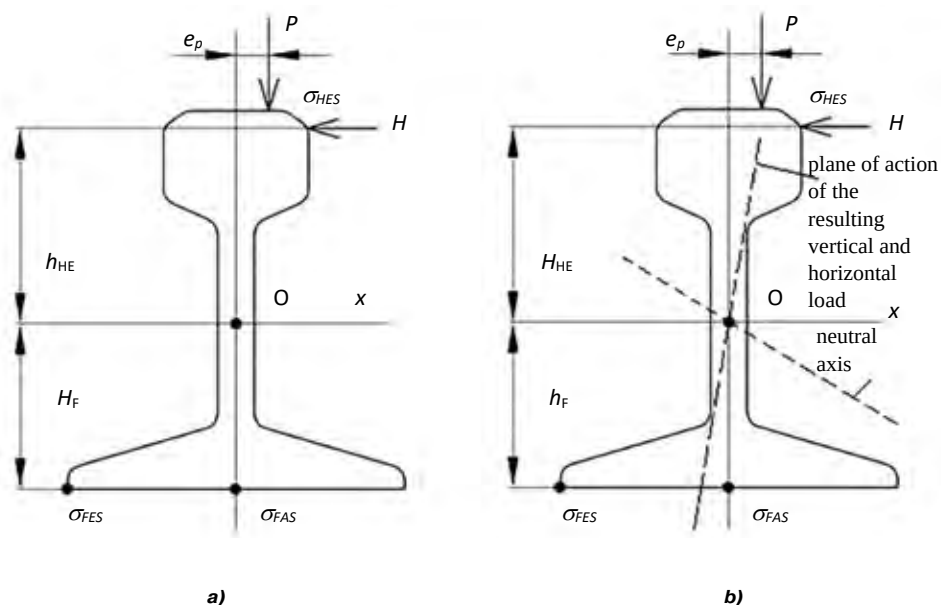
All these stresses have large, or lesser impact on performance of rails.

However, the onset of limit states in the rail during operation of the railway track is mainly caused by the increase in stress from loads σ_o due to wear of the rail head. Therefore, in this study we restrict ourselves to considering the change in σ_o depending on the wear magnitude.

Accordingly, the *objective* of this work is to obtain and describe the dependence of stresses in the rail as a function of the wear magnitude.

The research is based on the *methods* of mathematical simulation of the stress-strain state with allowance for nonlinear changes in geometry of the rail cross section associated with rail wear, as in similar works by foreign authors [8–10]. For this, a geometric model of the rail cross section has been developed and a design scheme (loading model) has been used in accordance with regulatory documents [11; 12].





Pic. 1. Scheme of application of forces on the rail
(a – vertical and horizontal loads, b – neutral axis position).

The methodology (functional dependencies) and the sequence of calculation of acting forces were adopted in accordance with [13]. This work, to determine the maximum stresses, uses the mathematical apparatus (in the form of analytical dependences) of the influence lines of bending moments in a beam on an elastic foundation, implemented in MathCAD computing environment. At the initial stage, stress calculation is limited to considering wear of the standard profile of the rail cross section in straight sections of the track.

Results.

It is initially assumed that the vertical load P from the wheel on the rail does not have a shift relative to the axis of symmetry of the rail section (Pic. 1). However, while wear is growing, the cross section becomes asymmetric, the position of the main axes of inertia changes, and the initial moment from the vertical load should be decomposed into component moments (M_z , M_x , M_y) relative to the new (main) axes of inertia. As a result, a complex stress state arises, characterized by the presence of normal and tangential stresses.

Maximum normal stresses in the foot and head of the rail from bending under vertical load are calculated as:

$$\sigma_{\max} = M_x / W_x, \quad (3)$$

where W_x is moment of resistance of the cross section of the rail, calculated relative to the neutral axis for the most distant fiber;

M_x is bending moment from vertical load.

Based on numerous calculations and experiments, the formula for stresses in the edge of the rail foot [FES] was obtained and used in applied calculations [13]:

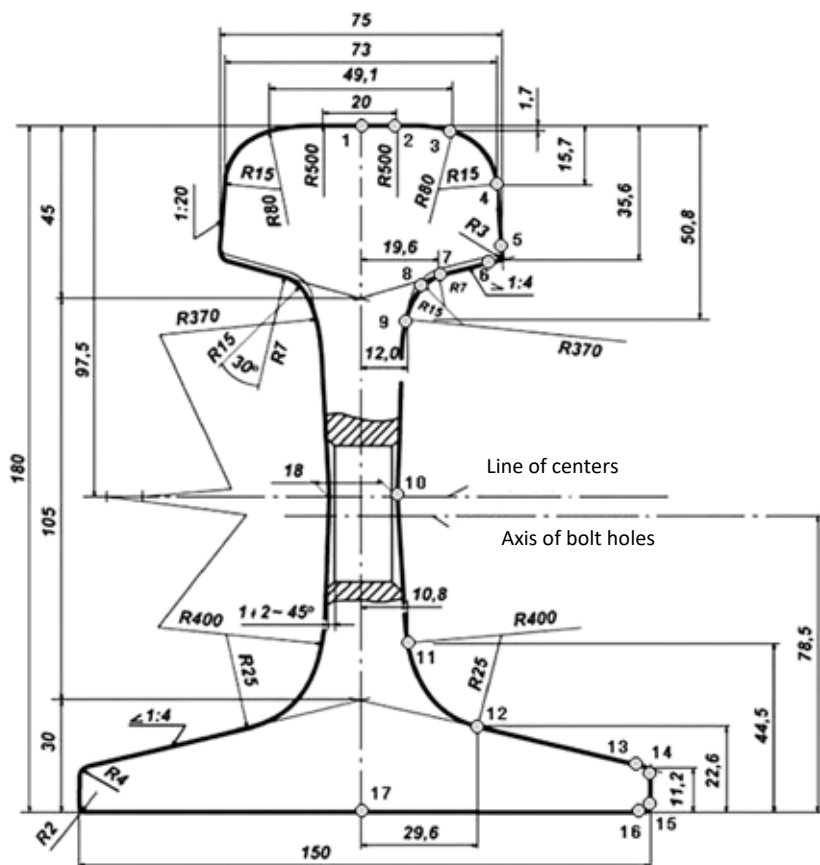
$$\sigma_{FES} = f \cdot \sigma_{FAS}, \quad (4)$$

where f is coefficient of transition to edge stresses, depending on the type of vehicle, the radius of the curve, the action of horizontal loads (H in Pic. 1), eccentricity of application of vertical load – e_p ; seasonality (summer, winter), etc.

Normal stresses in the cross section arising from each of the bending moments are summed up. Simultaneous action of two bending moments and inequality of the moments of inertia of the section I_x and I_y give rise to a phenomenon known as unsymmetrical bending regarding the neutral axis. Therefore, when calculating the maximum normal stresses, it is necessary to specifically determine the position of the neutral axis and of the fibers which are most distant from this neutral axis.

To build a mathematical model for description of the profile of the rail R65 the chart, presented in Pic. 2 was used, as more informative than that given in GOST R51685-2013 [14]. There are no fundamental difficulties for implementation in this model of other rail profiles and grades.

The model differentiates 17 nodal points (Pic. 2) and determines analytically in



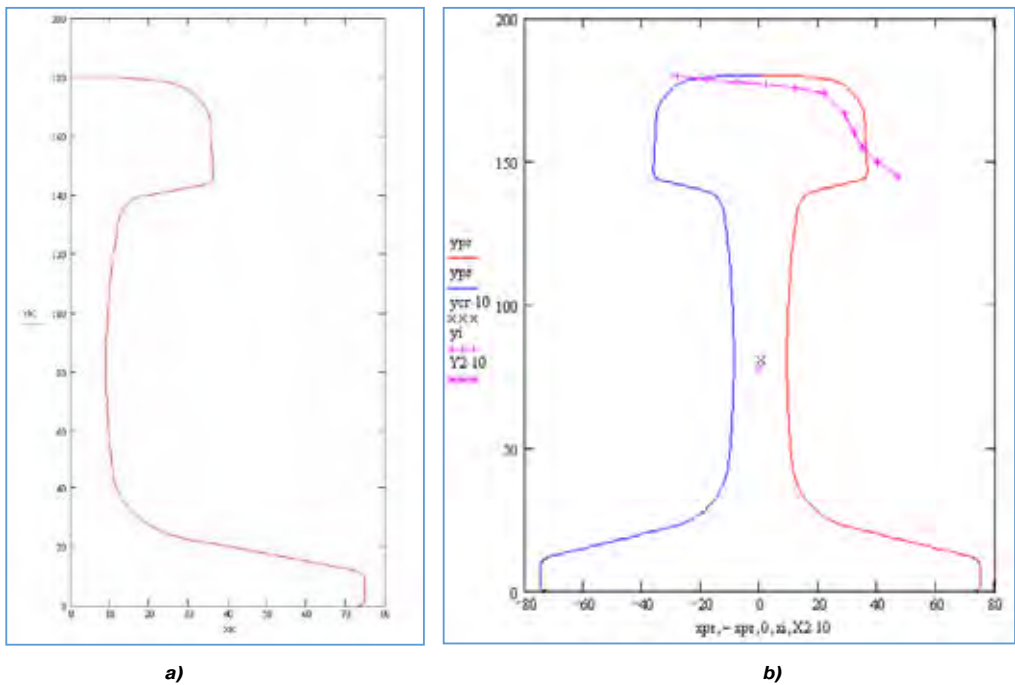
Pic. 2. Geometrical parameters of cross-section of the rail R65 and calculation points.

MathCAD environment their coordinates at the points where the curves and lines meet. To build a profile on the curved sections of the profile, including roundings with small radii, the coordinates of the centers of curvature are analytically found, which are further used to enter the corresponding angular coordinates in order to obtain uniform distribution of x , y coordinates along the arcs of these curves. Straight sections (4–5, 6–7, 12–13, and 14–17) are also partitioned (up to 20 points) in order to use them later for numerical integration of the area and of the moments of the cross-sectional area of the rail based on the profile contour represented as a set of points instead of using directly the equations of lines and circles. All this allows to get a set of discrete points describing the rail profile, transmitted as an array of x , y coordinates to another MathCAD document for further numerical processing (Pic. 3a).

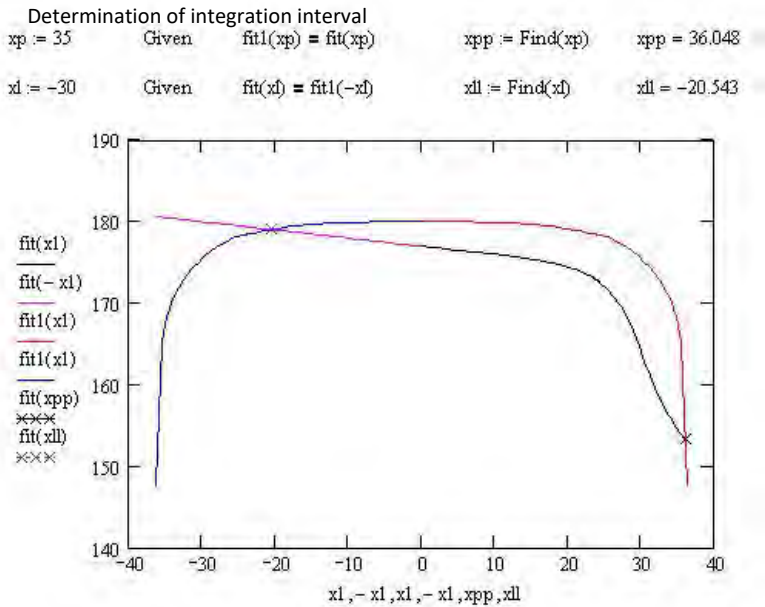
To determine the corresponding geometric characteristics of the section of a worn rail in

the second MathCAD document, parameter values are assigned that describe the calculated profile (pattern) of wear of the rail head. The pattern can be moved vertically and horizontally with a certain step relative to the rail head (Pic. 3b).

The characteristic profile is determined on the basis of previously performed measurements as a kind of a pattern, in this case, as an unchangeable wear profile, the position of which can be changed by setting the displacement coordinates along x and y axis (x_{iv} , y_{iv} , see Pic. 3b), for example, with a step of 1,6 and 1,1 mm. With a decrease in reference coordinates x_{iv} , y_{iv} , the wear profile pattern moves to the left and down relative to the rail cross-section profile. The pattern can also be rotated at some angle relative to its left base point, so that it is possible to adapt this template to the observed wear of the rail. For this, an angle θ is introduced, which can be used to recalculate coordinates according to known dependencies:



Pic. 3. The cross-sectional profile of the rail R65: a) stored as a set of contour points (x, y coordinates); b) the pattern of the wear profile (marked with a curve with crosses).



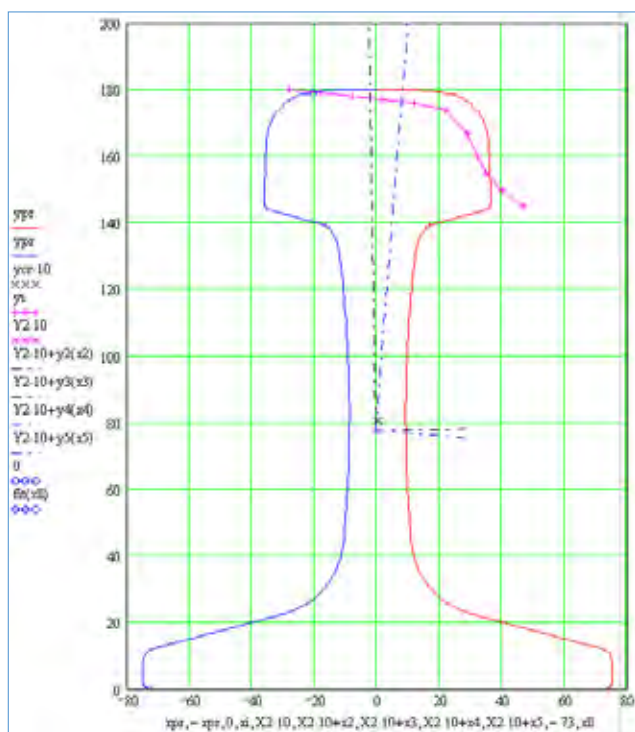
Pic. 4. Determination of integration intervals as intersection points of splines according to the wear profile and the profile of the rail head.

$$x' = x \cdot \cos\theta - y \cdot \sin\theta, \quad (5)$$

$$y' = x \cdot \sin\theta - y \cdot \cos\theta. \quad (6)$$

The value of this angle is calculated by the angle of inclination of the first section of the

pattern and is adjusted by setting a coefficient (from 0 to 1) at the beginning of the expression constructed for this angle (0 represents the usual position of the pattern with an angle of



Pic. 5. The main axes of inertia of the profile of the worn rail (tilted to the left); axes oriented with respect to the neutral axis (tilted to the right) and edge points farthest from the neutral axis (marked with circles).

3,173°, 1 means that the left linear part of the pattern is horizontal).

For the wear profile and rail head profile, splines are constructed that enable an analytical description of the curves defined by the set of points, which makes it easier to find the intersection points of these two profiles and to build a numerical integration procedure over the area enclosed between these curves (Pic. 4).

The general algorithm for calculating the normal contour stresses in the cross section of the rail, considering the wear, is as follows.

1. The calculation of coordinates of points characterizing the geometry of the cross section (profile) of the unworn rail (coordinates of the center of gravity, moments of inertia).

Numerical integration for the unworn (new) rail profile was used (for testing the integration technique), although well-known reference data can be used.

2. Calculation of coordinates of points characterizing the geometry of the pattern (x, y coordinates).

3. Positioning of the pattern location depending on the amount of wear (transmission and rotation), that is, creating a model of a wear pattern.

4. Construction of splines of rail head profile and wear pattern profile.

5. Calculation of the area of the figure corresponding to the captured material of the worn rail head.

This figure is limited by the spline curves of the rail head profile and the profile of the wear pattern (Pic. 5) and hereinafter referred to as the «wear area».

6. Calculation of coordinates of the center of gravity of the «wear area».

7. Calculation of axial and centrifugal moments of inertia of the «wear area» relative to its own axes.

8. Calculation of coordinates of the center of gravity of the cross section of a worn rail.

9. Calculation of axial and centrifugal moments of inertia of the cross section of a worn rail.

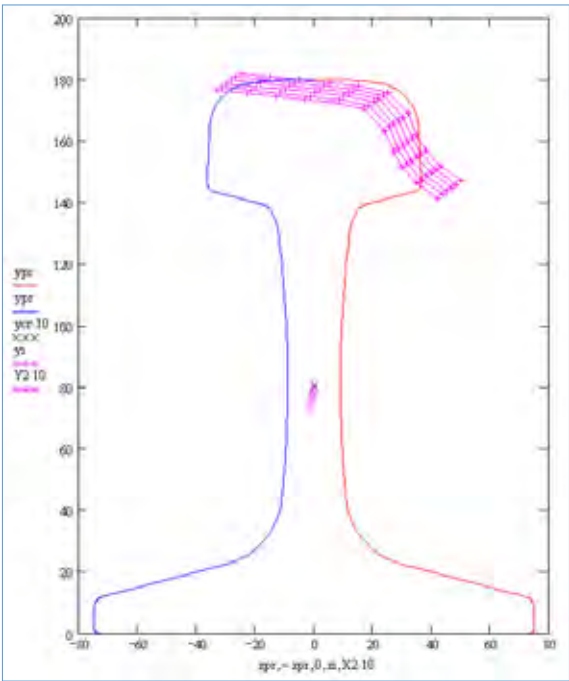
10. Calculation of main moments of inertia of the cross section of a worn rail.

11. Calculation of the angle of inclination of main axes of inertia of the cross section of a worn rail.

12. Determination of components of the bending moment in main axes of inertia.

13. Determination of the position of the neutral axis.





Pic. 6. The displacement of the wear profile pattern relative to the rail head profile (the crosses in the central part of the rail profile indicate the displacement of the center of gravity of the flat section of the rail, taking into account the wear determined by the pattern's preset positions).

Table 1
Dependence of normal stresses on rail wear

Tensile stresses in the rail foot, σ	Compressive stresses in the rail head, σ	Vertical rail wear, Δh , mm
283,769	-230,369	0
280,282	-226,803	0,5
293,365	-233,093	1,6
308,448	-240,064	2,8
325,486	-247,765	3,9
344,648	-256,248	5
365,881	-265,481	6,2
389,45	-275,542	7,3
415,78	-286,609	8,4
445,029	-298,715	9,6

14. Determination of the points 1 and 2 of the profile of the worn rail and their coordinates which are located as far as possible from the neutral axis (see Pic. 5).

15. Calculation of normal stresses at these points.

This practically exhausts the calculation of the maximum normal stresses for the considered position of the wear pattern. Further, the calculation is repeated from point 3 of the above algorithm for the next position of the wear pattern. The formulas for calculating the corresponding quantities involved in the calculation are well

known (one can see any textbook on resistance of materials or the mechanics of a deformable body) and are not given here.

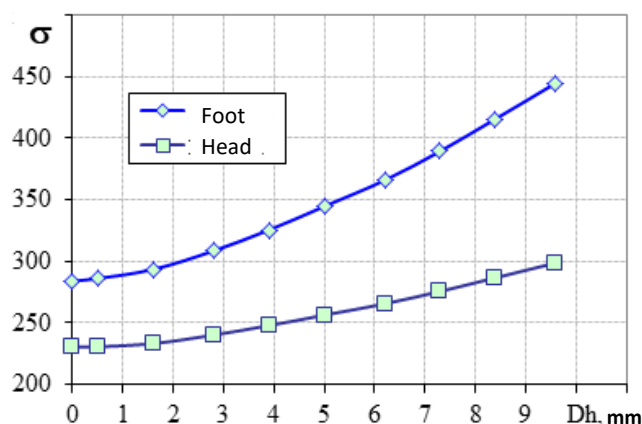
The vertical and horizontal displacements of the pattern for R65 rail were taken equal: with a pitch of 1,6 mm horizontally and 1,1 mm vertically (Pic. 6).

The results obtained are copied to arrays and graphs of stress changes are plotted depending on the position of the pattern that controls the degree of wear. As a result, the calculation results are summarized in Table 1, and in graphical form are presented in Pic. 7.

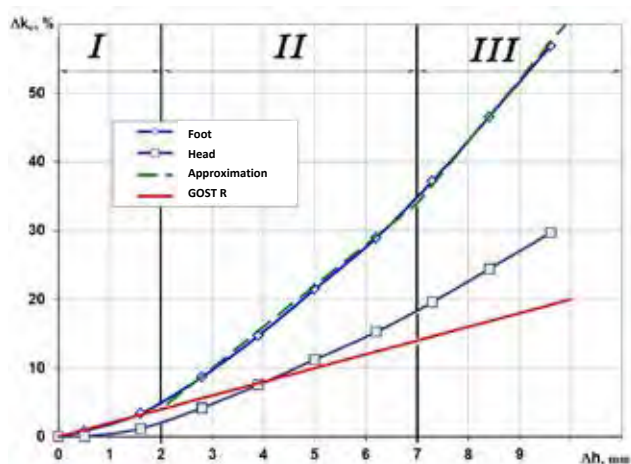
Note. The initial value of $M = 10^5$ is taken as the base value of the bending moment with respect to x axis. Thus, to obtain real stresses for a specific load, a correction factor should be used that takes into account the difference between the considered value and the base one.

Pic. 7 shows the dependences of changes in the normal contour stresses by absolute value in the cross section of a worn rail for the foot (point 1) and head (point 2) at a load $P = \text{const}$. The analysis of dependencies allows us to conclude that:

1) regardless of the sign (compressive or tensile), the magnitude of stresses grows nonlinearly as wear increases;



Pic. 7. The dependence of the contour stresses on the degree of wear (absolute values of stresses are shown).



Pic. 8. The dependence of the coefficient of increase in stress on the degree of wear.

2) the growth rate of stresses in the foot is greater than in the rail head.

GOST R57179 establishes a decrease in the value of the breaking load from the wear magnitude in the form of a linear dependence in the dimensionless form (or in %). Therefore, it seems appropriate to determine in a similar way the coefficient of increase in stress from wear as the value of Δk_w and:

$$\Delta k_w = \frac{\sigma_w - \sigma_o}{\sigma_o}, \quad (7)$$

where σ_w – normal stresses taking into account rail wear;

σ_o – normal (operating) stresses without considering wear.

In accordance with formula (7), the dependences presented in Pic. 7 are recounted and shown in dimensionless form in Pic. 8. For

the analysis, a linear graph is additionally presented (shown by a red solid line), corresponding to GOST R57179.

The analysis shows that the coefficient of increase in stress due to wear Δk_w in the rail foot is greater than in the rail head. Therefore, further consideration is necessary on the basis of the dependence $\Delta k_w = f(\Delta h)$ for the rail foot, where Δh is vertical rail wear.

A result, it can be stated that the graph according to GOST R and the changes in stresses in the foot till the wear of 2 mm practically coincide, i.e. in the wear range 0–2 mm GOST R57179 correctly reflects the onset of the limit state. This range is highlighted in Pic. 8 and is denoted by the number I. At wear values of more than 2 mm, a significant increase in stresses is observed, therefore, two ranges – II and III – are



shown (shown by dashed lines). Within the second range, the magnitude of wear varies from 2 to 7 mm, and the decrease in breaking load should be 6 % per 1 mm of wear. Within the third range, the wear magnitude varies from 7 mm to the maximum of 10 mm established by GOST, while the decrease in breaking load should be of 9 % per 1 mm of wear.

Thus, GOST R57179 reflects the correct trend aimed at reducing the breaking load depending on the wear magnitude but gives it a less rigorous assessment than it should be to ensure safe operation of the track.

Conclusions.

1. The analysis of the stress state under the conditions of transportation of heavy-haul trains, associated with a change in the rail profile during the wear process, is an urgent task for all countries with developed rail networks. To solve the problem, various models are developed and large-scale and labor-intensive studies are conducted. The originality of the model developed in Russian University of Transport is that, with the assumptions and simplifications made, the suggested model can determine regularity of the change in the normal contour stresses and the coefficient Δk_w of stress increase depending on wear Δh , which is non-linear.

2. Regardless of the type of rails (R50, R65, R75, R75, UIC54 (54E1), UIC60 (60E1), etc.), applicability of the calculated mathematical model is universal for all types of rails manufactured in the world. In particular, in Russia, GOST R57179 normalizes the value of the breaking load of 2 % per every millimeter of rail wear. As a result of the simulation, it was found that it is necessary to distinguish three ranges ranging from 0 mm to a maximum value of 10 mm:

- from 0 mm to 2 mm, decrease should be 2 % per 1 mm of wear;
- from 2 mm to 7 mm, decrease should be 6 % per 1 mm of wear;
- from 7 mm to 10 mm, decrease should be 9 % per 1 mm of wear.

These decreases can be used both for rails without welds (old and worn-out rails), and for those with welded joints, made, for example, by thermite welding.

3. The values of the coefficient of increase in stress can be used as a correction coefficient Δk_w (considering wear) in the practical

calculation of normal stresses in the rail of any type.

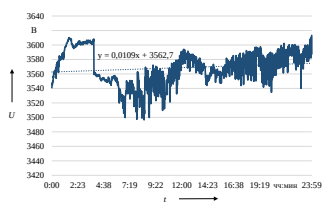
REFERENCES

1. Grechneva, M. V., Medvedev, S. I., Nezhivlyak, A. E. Reducing lateral wear of railway rails using plasma surface hardening [Snizhenie bokovogo iznosa zheleznodorozhnykh relsov pri pomoshchi plazmennogo poverkhnostnogo uprochneniya]. *Vestnik ISTU*, 2010, Iss. 6, pp. 29–34.
2. Ranjha, S. A., Ding, K., Mutton, P. J., Kapoor, A. Mechanical state of the rail underhead region under heavy haul operations. CORE2012: Global Perspectives; Conference on railway engineering, 10–12 September 2012, Brisbane, Australia.
3. Pokatsky, V. A., Tarasov, A. V. Assessment of intensity of lateral wear of various types of rails [Otsenka intensivnosti bokovogo iznosa razlichnykh tipov relsov]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, Iss. 3, pp. 1187–1188.
4. Federal Law of December 27, 2002 No. 184-FZ «On Technical Regulation» [Federal'nyi zakon ot 27 dekabrya 2002 goda No. 184-FZ «O tekhnicheskoy regulirovani»].
5. Federal Law of February 9, 2007 No. 16-FZ «On Transport Security» [Federal'nyi zakon ot 9 fevralya 2007 No. 16-FZ «O transportnoi bezopasnosti»].
6. Technical regulations of the Customs Union «On safety of railway transport infrastructure» (TR TS003/2011) [Tekhnicheskii reglament TS «O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta» (TR TS003/2011)].
7. GOST R57179-2016. Thermite rail welding. Testing and quality control procedure [GOST R57179-2016 «Svarka relsov termitnaya. Metodika ispytaniy i kontrolya kachestva»].
8. Jeong, D. Y., Tang, Y. H., Orringer, O. Estimation of rail wear limits based on rail strength investigations. Volpe center final report, 1998. DOT/FRA/ORD-98/07. [Electronic resource]: <https://www.fra.dot.gov/Elilib/Document/2935>. Last accessed 11.09.2019.
9. Jeong, D. Y. Analytical modeling of rail defects and its applications to rail defect management. Volpe center technical report for the UIC/WEC joint research project on rail defect management, 2003. [Electronic resource]: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/8995/dot_8995_DS1.pdf. Last accessed 11.09.2019.
10. Lyons, M. L., Jeong, D. Y., Gordon, J. E. Fracture mechanics approach to estimate rail wears limits. Proceedings of the 2009 ASME rail transportation division, Fall technical conference RTDF 2009. October 20–22, 2009, Fort Worth, Texas, USA. [Electronic resource]: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.818.8345&rep=rep1&type=pdf>. Last accessed 11.09.2019.
11. Rules for calculation of the strength of the track superstructure [Pravila proizvodstva raschehtov verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti na prochnost']. Moscow, Transzheldorizdat publ., 1954, 70 p.
12. Rules for calculating track regarding strength and reliability depending on the class of lines (1st edition) [Pravila rascheta puti na prochnost' i nadezhnost' v zavisimosti ot klassa linii (1-ya redaktsiya)]. MPS VNIIZhT. Moscow, 1999, 96 p.
13. Karpushchenko, N. I., Bondarenko, A. N., Ivanova, L. I. Calculation of the railway track for strength and stability: Study guide [Raschet zheleznodorozhnogo puti na prochnost' i ustoychivost': Ucheb. posobie]. Novosibirsk, Publishing House SGUPS, 2002, 62 p.
14. GOST R51685-2013 «Railway rails. General specifications» [GOST R51685-2013 «Relsy zheleznodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya»]. ●



ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ 58

Особенности систем накопления электроэнергии на городских железнодорожных линиях.



ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ВАГОН–ПУТЬ» 78

Моделирование многомассовой колебательной системы с различными параметрами подрельсового демпфирующего элемента.

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО 96

Напряжённо-деформированное состояние мёрзлых грунтов и использование столбчатых фундаментов.

МОРСКАЯ ТЕХНИКА 114

Мультимодульные плавсредства-трансформеры: жизнеспособна ли идея?

POWER SUPPLY 68

Features of electric energy storage systems at urban railways.

DYNAMICS OF INTERACTION WITHIN «WAGON–TRACK» SYSTEM 87

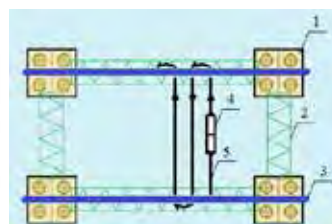
Simulation of multi-mass oscillatory system with different parameters of sub-rail damping elements.

TRANSPORT CONSTRUCTION 105

Stress-strain state of frozen soil and the use of pier foundations.

MARINE ENGINEERING 122

Multimodular transformer watercrafts: is the idea viable?





Эффективность применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце



Василий ЧЕРЕМИСИН



Владислав НЕЗЕВАК

Черемисин Василий Титович — Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия.

Незевак Владислав Леонидович — Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия.*

В мире получают всё большее распространение системы городских железных дорог, использующих современные технологии организации движения поездов, безопасности, тяги и инфраструктуры. Одним из примеров их интеграции в городскую транспортную систему мегаполиса стало создание Московского центрального кольца.

При этом создание и постоянная модернизация систем таких железных дорог в процессе эксплуатации генерируют новые инновационные подходы, в том числе и в сфере электроснабжения.

Электротяговая нагрузка системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца обладает рядом особенностей, связанных с преобладанием на участке пассажирского движения и частыми сменами режимов работы электропоездов. Высокая частота применения рекуперативного торможения на участке обуславливает постановку задачи о выработке комплекса мероприятий по повышению эффективности работы системы тягового электроснабжения по критерию снижения показателей нагрузочной способности и повышения показателей энергетической эффективности. Одним из мероприятий по решению задач указанной проблематики является приме-

нение в системе тягового электроснабжения систем накопления электроэнергии.

Целью представленных исследований является оценка эффективности применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца. В исследованиях используются методы статистической обработки данных измерений и имитационного моделирования. Имитационное моделирование взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения в условиях Московского центрального кольца позволяет получить характеристики графика нагрузки систем накопления электроэнергии и напряжения на шинах постов секционирования, оценить продолжительность эпизодов работы в режимах заряда и разряда, их количество и соответствующие суммарные объёмы электроэнергии за сутки.

Полученные результаты позволяют оценить технические характеристики различных видов накопителей электроэнергии применительно к условиям работы в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца и определить экономическую эффективность мероприятия.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, городской транспорт, электротехника, электропоезда, система тягового электроснабжения, Московское центральное кольцо, график электрической нагрузки, системы накопления электроэнергии, имитационное моделирование, напряжение стабилизации, степень заряженности, энергоёмкость.

*Информация об авторах:

Черемисин Василий Титович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой подвижного состава электрических железных дорог, директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, Cheremisinvt@gmail.com.

Незевак Владислав Леонидович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательской части, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, NezevakWL@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 26.06.2019, актуализирована 21.09.2019, принята к публикации 15.10.2019.

For the English text of the article please see p. 68.

ВВЕДЕНИЕ

Московское центральное кольцо (МЦК)¹ является участком железной дороги, на котором нашли применения передовые технологии, применяемые в России в области организации движения поездов, безопасности, тяги и инфраструктуры [1; 2]. В системе тягового электроснабжения МЦК на тяговых подстанциях нашли применение современные образцы силового и коммутационного оборудования: сухие преобразовательные трансформаторы, быстродействующие выключатели, распределительные устройства модульного исполнения, современные выпрямительные преобразователи и др. В состав системы тягового электроснабжения входят пять тяговых подстанций и четыре поста секционирования. На участке МЦК в пассажирском движении обращаются электропоезда серии ЭС2Г «Ласточка». Особенности организации пассажирского движения приводят к формированию графика электрической нагрузки, имеющего две области максимальных значений, соответствующих пикам пассажирских перевозок. Кроме того, к особенностям МЦК следует отнести и условия движения электропоездов, характеризующиеся частыми остановками, разгонами и торможениями.

Целью исследований является оценка эффективности применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца. Рассмотрение вопросов применения накопителей позволяет оценить влияние их работы на энергетические показатели системы тягового электроснабжения. Для исследований используются методы статистической обработки измерений электрических величин электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения и имитационного моделирования.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В условиях МЦК электропоезда серии ЭС2Г (Siemens Desiro Rus) позволяют эффективно применять рекуперативное торможение, создавая условия для энергообмена между смежным электроподвижным составом и способствуя повышению энер-

гетической эффективности перевозок. Результаты обработки данных регистраторов параметров движения «РПД МПСУ и Д» электропоездов на МЦК Дирекции скоростного сообщения ОАО «РЖД» (далее — ДСС) за сутки позволяют получить рабочие диапазоны тяговых токов и напряжений на токоприёмниках электроподвижного состава (рис. 1). Указанный график показывает диапазоны изменения напряжений в режимах тяги и рекуперативного торможения. Характер приведённого графика отличается от аналогичных графиков для участков с преобладанием грузового движения тем, что, во-первых, для условий МЦК усреднённый коэффициент наклона составляет $-0,17$ против коэффициентов $-0,068$ и $-0,14$, полученных для локомотивов серий 2ЭС6 и 2ЭС10 на участках с равнинным и горным типами профиля соответственно [3], во-вторых, диапазоны изменения напряжения на токоприёмниках электропоездов ЭС2Г значительно шире и составляют в режиме тяги — от 2900 В до 3800 В, в режиме рекуперативного торможения — от 3100 до 3900 В. Учитывая профиль пути участка, относящегося ко II типу (равнинный) [4], указанные отличия следует связывать с условиями организации движения, оказывающими влияние как на тяговое электропотребление, так и на уровень небаланса [5]. Частотные распределения для проведённых значений показывают, что распределение напряжения близко к нормальному закону распределения (среднее значение составляет около 3400 В), распределение тока близко к равномерному распределению в отрицательном и положительном диапазонах (для режимов рекуперативного торможения и тяги).

График тяговой нагрузки электропоездов, следующих по МЦК, характеризуется частым применением рекуперативного торможения. В качестве примера приведён график тяговой нагрузки и напряжения на токоприёмнике одного электропоезда за период следования по МЦК с 5:43 до 7:06 чч: мм (рис. 2). Особенностью электротяговой нагрузки МЦК является цикличность режимов тяги и рекуперативного торможения, сопоставимость уровней токов в режимах, характерное изменение уровня напряжения, соответствующее режимам работы

¹ [Электронный ресурс]: <https://www.mosmetro.ru/mcc/>.



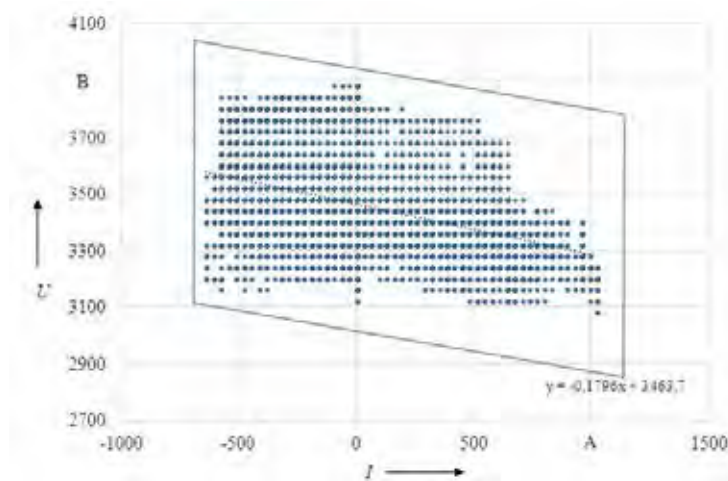


Рис. 1. График изменения токов и напряжений на токоприёмнике электропоездов серии ЭС2Г на МЦК (по данным ДСС).

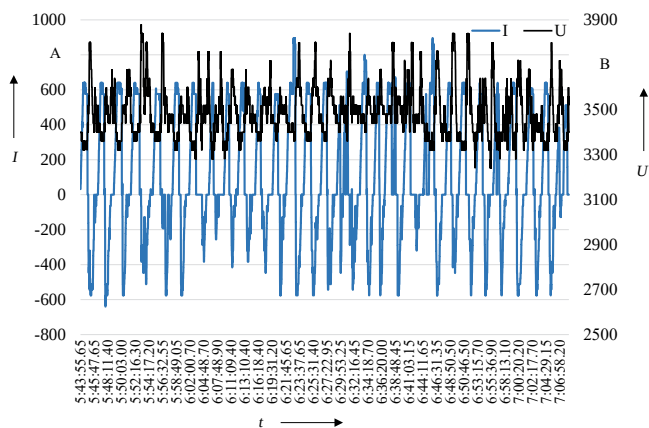


Рис. 2. График тяговой нагрузки электропоезда на МЦК (по данным ДСС).

электропоезда. Указанные особенности электротяговой нагрузки приводят к высокому уровню удельной рекуперации, наблюдающемуся в границах МЦК, и обуславливают актуальность вопросов регулирования энергообменных процессов в системе тягового электроснабжения.

Мировые тенденции в области управления энергообменными потоками в электрических сетях, создания устройств, обеспечивающих работу в буферном режиме, стабилизации напряжения и эффективности работы возобновляемых источников энергии привели к возникновению и развитию систем накопления электроэнергии [6–13]. Проблематика приведённых вопросов характерна и для электротяговой нагрузки, в частности, для условий МЦК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Одним из направлений повышения энергетической эффективности на МЦК является установка инверторов, позволяющих обеспечить приём энергии рекуперации и передачу её на шины переменного тока. Места размещения инверторов в границах МЦК определяются тяговыми и электрическими расчётами, по которым определяется объём энергии возврата [14]. Внедрение систем накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения является альтернативным вариантом, обладающим рядом преимуществ перед установкой инверторов на тяговых подстанциях, проявляющихся в возможности установки накопителей на линейных устройствах и улучшении показателей на-

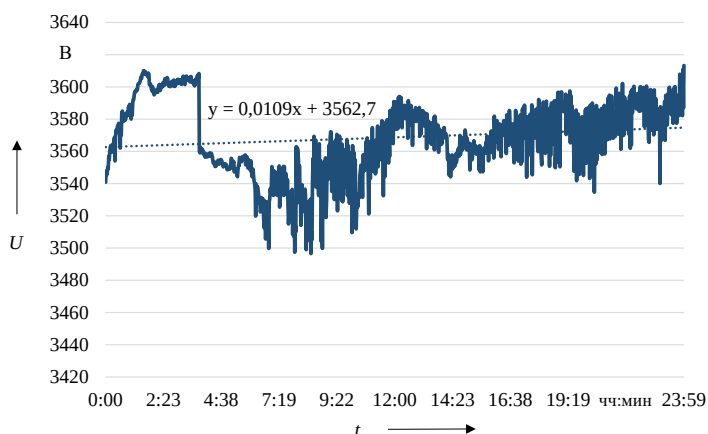


Рис. 3. График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ ст. Андроновка (по данным ТЭ).

грузочной способности системы тягового электроснабжения [15].

Проведение исследований в области изучения эффективности накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения следует выполнять для условий работы оборудования, принятых на МЦК. В частности, на тяговых подстанциях в качестве рабочего режима принята схема поочерёдной и параллельной работы преобразовательных агрегатов. Например, на тяговой подстанции ст. Андроновка Московской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго (далее — ТЭ) принят режим параллельной работы преобразовательных агрегатов. Указанное обстоятельство необходимо учитывать в расчётах, принимая допущение о том, что внешние характеристики агрегатов не являются идентичными [16]. Коэффициенты наклона внешних характеристик преобразовательных агрегатов подстанции составляют для рассматриваемого примера -0,03 и -0,06. Различие характеристик для целей моделирования энергообменных процессов в системах накопления не имеет существенного значения. В этом случае допустимо принять усреднённый коэффициент наклона внешней характеристики.

При проведении исследований следует учитывать сложившийся уровень напряжения на тяговых подстанциях, который может существенно отличаться в силу ряда причин. График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ, значения для которого пересчитаны по одноминутным интервалам усреднения для измерений на стороне высшего напряжения, приведён на рис. 3.

Для указанных случаев напряжение холостого хода следует определять при отсутствии тяговой нагрузки с последующим усреднением для целей моделирования.

Одними из наиболее эффективных мест размещения накопителей электроэнергии являются места расположения линейных устройств в системе тягового электроснабжения (посты секционирования или пункты параллельного соединения). Указанное обстоятельство обусловлено одновременным сокращением потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и повышением пропускной и провозной способности в межподстанционной зоне. Преобразование пассивных постов секционирования в активные путём размещения на них накопителей электроэнергии позволяет получить ряд положительных эффектов в системе тягового электроснабжения [17].

Исследования эффективности применения систем накопления электроэнергии выполнены с помощью имитационного моделирования в программном комплексе КОРТЭС на основе тяговых расчётов и графика исполненного движения МЦК. При моделировании учтено различие напряжений на шинах тяговых подстанций. С учётом того, что условия работы систем накопления подобны условиям работы выпрямительно-инверторных преобразователей, моделирование энергообменных процессов выполнено для инверторов при следующих значениях уставок по напряжению — 3600 В и 3550 В для режимов заряда и разряда соответственно. Для указанных условий с помощью мгновенных схем по-



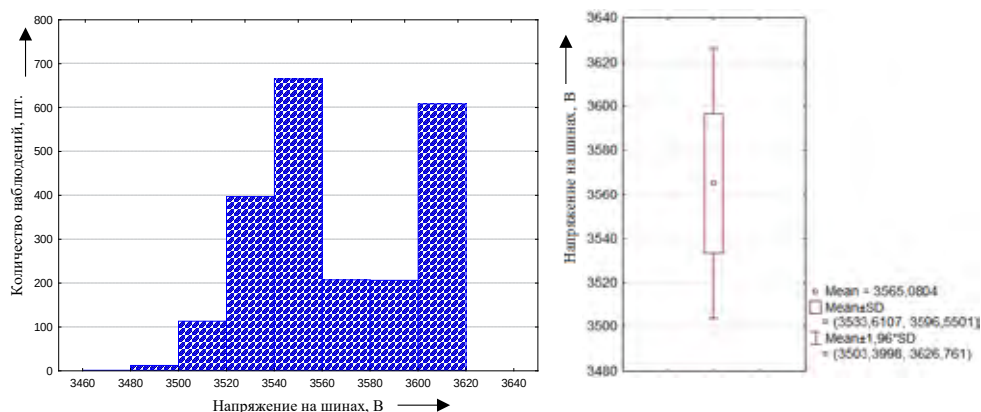


Рис. 4. Частотные гистограммы распределения напряжения на шинах поста секционирования ПСК 270 (результаты расчётов авторов).

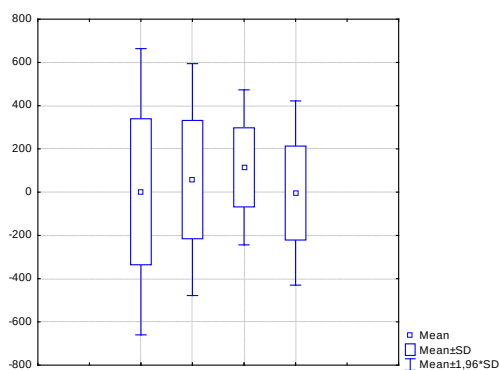


Рис. 5. Диапазон изменения нагрузки накопителей электроэнергии на шинах постов секционирования: 1 – ПСК 270, 2 – ПСК 445, 3 – ПСК-1, 4 – ПСК Черкизово (результаты расчётов авторов).

лучены графики электрической нагрузки и изменения напряжения на шинах постов секционирования.

Полученное по результатам моделирования частотное распределение напряжения на шинах поста секционирования показывает довольно узкий диапазон наблюдаемых значений (в качестве примера на рис. 4 приведено распределение для ПСК 270).

Результаты моделирования позволяют оценить диапазоны изменения токов накопителей электроэнергии на постах секционирования. Оценка диапазонов токов для условий размещения устройств на постах секционирования МЦК для полученных средних значений (mean) и среднеквадратичного отклонения (SD) приведена на рис. 5.

Режим работы накопителя электроэнергии характеризуется объёмами электроэнер-

гии в режимах заряда и разряда, продолжительностью эпизодов работы в указанных режимах. Расчётные характеристики для режимов разряда и заряда применительно к условиям работы накопителя на посту секционирования ПСК 270 представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Среднее количество эпизодов работы в режиме заряда и разряда накопителей электроэнергии для условий работы на постах секционирования для режима разряда составляет 542 эпизода, для режима заряда – 404 эпизода.

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РАБОТЫ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ

Одним из важнейших параметров, влияющих на энергетические характеристики накопителя, является напряжение стабилизации, определяющее его работу в режимах заряда, разряда и покоя. Для заданных условий по эпизодам работы накопителя [18–20] получено, что эпизоды работы накопителя в различных режимах не превышают пяти минут, в частности, для ПСК 270 – не более двух минут, а объём электроэнергии не превышает 50 кВт · ч для эпизода, т.е. энергообменные процессы являются кратковременными и с большим количеством повторений в течение суток.

Степень заряженности накопителей электроэнергии определяется рядом факторов: начальное напряжение, внутреннее сопротивление, количество электричества, ёмкость, ток разряда (заряда). В расчётах степени заряженности используют уравнения Шеферда, Хаскиной–Даниленко, Ро-

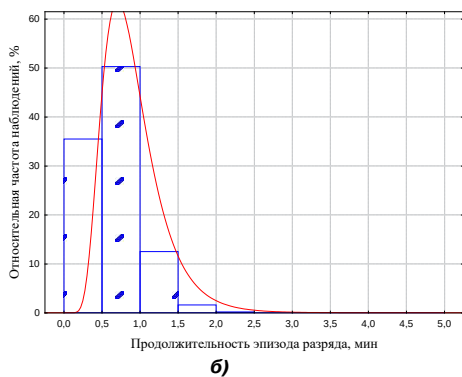
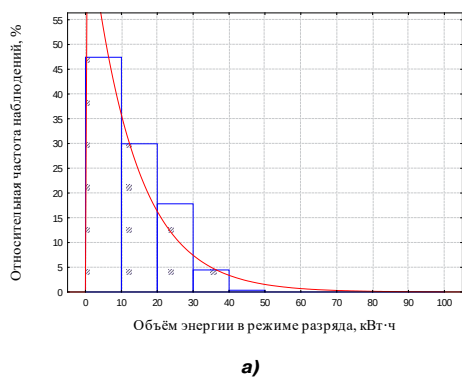


Рис. 6. Частотная гистограмма распределения объёма электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме разряда для ПСК 270 (результаты расчётов авторов).

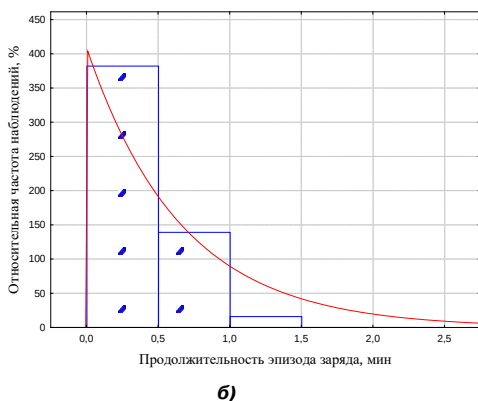
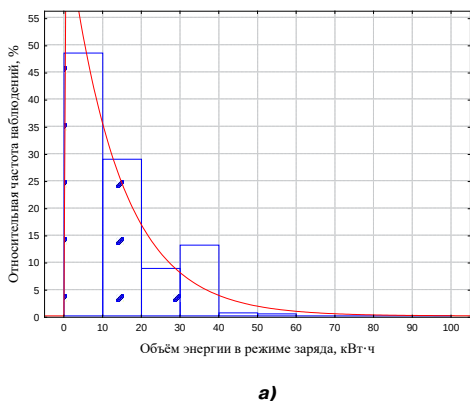


Рис. 7. Частотное распределение объёма электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме заряда для ПСК 270 (результаты расчётов авторов).

манова [21–23], другие эмпирические зависимости, уравнения, полученные с помощью аппарата регрессионного анализа или модели искусственных нейронных сетей. Одним из простых способов оценки степени заряженности является способ, основанный на счётчике А • ч или количестве электричества. Модификацией данного способа является способ, основанный на счётчике Вт • ч для режимов заряда и разряда, подходящий для оценки работы накопителя в общем виде. Указанный способ используется в дальнейшем для оценки энергообменных процессов в системе тягового электрообеспечения.

Построение графика изменения кумулятивного объёма энергии позволяет получить требуемый уровень полезной энергоёмкости $W_{\text{нээ}}$ как разницу между максимальным $W_{\text{макс}}$ и минимальным кумулятивным значением $W_{\text{мин}}$ за сутки. Указанный объём $W_{\text{нээ}}$ позволяет оценить степень

заряженности накопителя на k -м шаге расчётов по следующей формуле:

$$SoC_k = \frac{\sum_{t_0}^{t_k} u_k \cdot i_k \cdot \Delta t_k}{W_{\text{нээ}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где u_k , i_k – значения напряжения и тока для k -го интервала времени; Δt_k – шаг времени.

Результаты имитационного моделирования взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электрообеспечения показывают, что при отсутствии ограничений на значение энергоёмкости накопителя электроэнергии для условий ПСК 270 требуемая полезная энергоёмкость $W_{\text{нээ}}$ достигает уровня 1185 кВт • ч. Применительно к полезной энергоёмкости график изменения степени заряженности при допущении того, что начальная степень заряженности $SOC_0 = 50 \%$, приведён



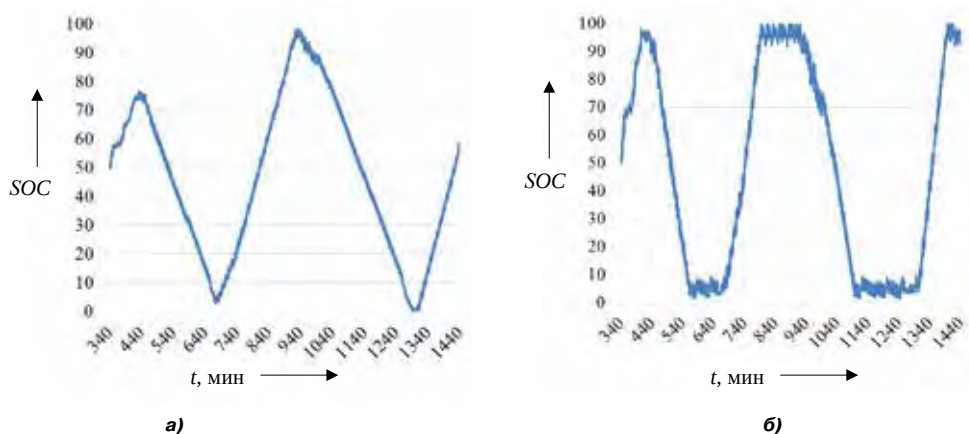


Рис. 8. График изменения SOC для накопителя на ПСК 270:

а – без ограничений на энергоёмкость, б – с ограничением 500 кВт·ч (результаты расчётов авторов).

на рис. 8а. При введении ограничений на полезную энергоёмкость в размере 500 кВт·ч график изменения показывает, что SOC не изменяет цикличность в течение рассматриваемых суток и существенно не меняет свой характер (рис. 8б). Суммарный объём электроэнергии за сутки в режиме разряда во втором случае падает относительно первого с 7054 кВт·ч до 5920 кВт·ч, то есть на 16,1 %, в режиме заряда – с 7166 кВт·ч до 6168 кВт·ч, то есть на 13,9 %. При введении ограничений на энергоёмкость до 300 кВт·ч и 200 кВт·ч наблюдается снижение объёмов для режима разряда на 22,2 % и 24,9 % соответственно, режима заряда – на 21,6 % и 24,7 % соответственно. Графики изменения степени заряженности показывают, что эпизоды заряда/разряда на некоторых отрезках суток не чередуются, а следуют подряд, что определяет характерный вид суточного графика, обусловленный цикличностью перевозок.

ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ

Размещение накопителей электроэнергии на постах секционирования позволяет улучшить показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения и повысить энергетическую эффективность перевозочного процесса.

Рассмотрим результаты расчёта показателей нагрузочной способности для базового варианта, в качестве которого принимается существующий вариант, в котором

отсутствуют системы накопления электроэнергии или другие приёмники энергии рекуперативного торможения электроподвижного состава.

В качестве показателей нагрузочной способности рассмотрим два – коэффициент нагрузки выпрямителей тяговых подстанций и минимальный уровень напряжения на токоприёмнике электроподвижного состава.

Коэффициент нагрузки выпрямителей, определяется по формуле:

$$k_{н.вт} = \frac{I_{dt}}{\sum I_{в.ном} k_{доп.вт}}, \quad (2)$$

где I_d – наибольшее среднее значение тока за период t , А;

$I_{в.ном}$ – номинальный ток выпрямительных агрегатов, определяемый по количеству включённых под нагрузку агрегатов, А;

$k_{доп.вт}$ – коэффициент допустимой нагрузки (для интервалов усреднения 0,25 мин – 1,9; 2 мин – 1,5; 15 мин – 1,25; 30 мин и более – 1,0).

Изменение коэффициента нагрузки выпрямителей тяговых подстанций, %, определяется по формуле:

$$\Delta k_{н.вт} = \frac{k_{н.вт}^{баз} - k_{н.вт}^{вар}}{k_{н.вт}^{баз}} \cdot 100, \quad (3)$$

где $k_{н.вт}^{баз}$, $k_{н.вт}^{вар}$ – коэффициенты загрузки выпрямителей тяговых подстанций при периоде усреднения t для базового и рассматриваемого варианта соответственно.

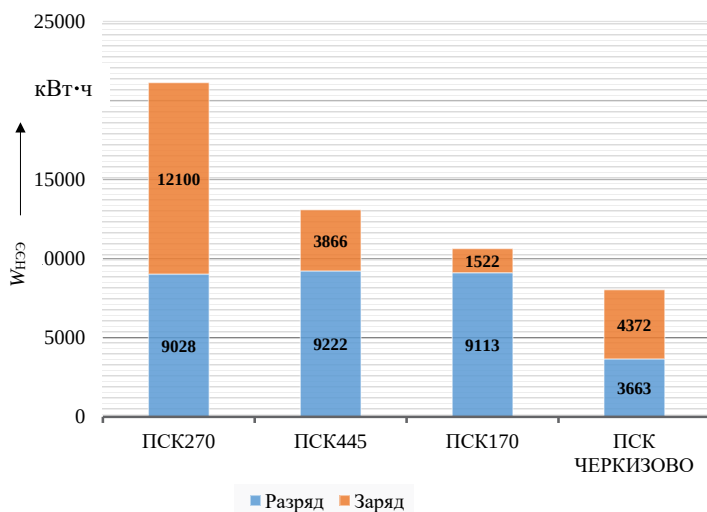


Рис. 9. Гистограмма объёмов электроэнергии накопителей электроэнергии по режимам работы (результаты расчётов авторов).

Наибольшее сокращение коэффициента нагрузки выпрямителей отмечено на подстанциях ст. Покровское-Стрешнево и ст. Андроновка, снижение уровня коэффициента нагрузки выпрямителей составляет свыше 25 % и 35 % соответственно.

Оценка суммарных объёмов электроэнергии в режимах разряда и заряда проводится для условий размещения накопителей электроэнергии на постах секционирования МЦК. Сравнение объёмов электроэнергии накопителя $W_{нээ}$ по постам секционирования показывает необходимость балансировки объёмов электроэнергии (рис. 9) путём реализации подзаряда в режиме ожидания при напряжениях на шинах поста секционирования, близких к напряжению холостого хода тяговых подстанций для накопителей, размещаемых на постах секционирования ПСК 445 и ПСК 170.

Сравнение вариантов по величине минимального и одноминутного напряжения с целью оценки эффекта накопителя по стабилизации напряжения на шинах поста секционирования показывает, что для варианта расстановки накопителей электроэнергии относительно базового варианта минимальное напряжение на токоприёмнике электроподвижного состава оказывается выше в среднем на 1,5 % или на 50 В.

Работа накопителей электроэнергии приводит к снижению коэффициента нагрузки выпрямителей на тяговых подстан-

циях МЦК в среднем за сутки – от 12,5 % до 28,6 %. Наибольшие объёмы энергии в режимах заряда и разряда накопителя наблюдаются для условий поста секционирования ПСК 270, для которого объёмы энергии разряда и заряда относятся друг к другу как 1/1,3.

Сравнение показателей нагрузочной способности системы тягового электропитания для вариантов применения накопителей электроэнергии и инверторов показывает, что в первом случае наблюдается снижение коэффициента нагрузки выпрямительных преобразователей подстанций в среднем за сутки на 22,5 %, повышение среднего минимального напряжения на токоприёмниках электропоездов на 4,1 % или около 150 В.

Сравнение вариантов размещения выпрямительно-инверторных преобразователей и накопителей электроэнергии по уровню энергетической эффективности показывает незначительное расхождение значений. Для варианта с применением выпрямительно-инверторных преобразователей на тяговых подстанциях повышение энергетической эффективности перевозок составит 11,97 %, для варианта с применением накопителей электроэнергии на постах секционирования – 11,94 %. Уровень потерь в тяговой сети для варианта с инвертором составляет 3,68 % против 3,14 % для варианта с размещением накопителей на постах секционирования (таб-



Таблица 1

Электропотребление на тягу для различных вариантов (результаты расчётов авторов)

Вариант	Сальдированное электропотребление на тягу, кВт • ч	Потери в тяговой сети, кВт • ч	Объём возврата (заряда), кВт • ч
Вариант базовый	181 116	6011	0
Вариант с ВИП	159 424	5 874	16 717
Вариант с накопителями	159 490	5 014	21 862

лица 1). Объём электроэнергии для режимов возврата и заряда для рассмотренных вариантов составляет 10,5 % и 13,7 % соответственно.

По критерию энергетической эффективности лучшим вариантом является вариант, соответствующий размещению инвертора на тяговой подстанции ст. Андроновка и накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, ограничивающих подстанции с обеих сторон. В этом случае потенциальная экономия электроэнергии за сутки для пассажирского движения составит около 24,6 тыс. кВт • ч, уровень потерь электроэнергии – 3,4 %. Альтернативным вариантом является размещение накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, в этом случае потенциал экономии электроэнергии составляет 24,6 тыс. кВт • ч в сутки, уровень потерь электроэнергии – 3,6 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) объёмы энергии, реализуемые накопителями электроэнергии на постах секционирования МЦК для режимов заряда и разряда по эпизодам работы не превышают 50 кВт • ч. При этом в большинстве случаев продолжительность эпизодов работы в различных режимах не превышает трёх минут. Количество эпизодов работы в режимах разряда и заряда достигает 600 случаев в сутки;

2) график степени заряженности накопителей электроэнергии на постах секционирования МЦК показывает ярко выраженную цикличность работы (на графике степени заряженности наблюдаются два

цикла в сутки), связанную с особенностями формирования графика движения электропоездов, в частности, утренним и вечерним пиком перевозок. Полезная энергоёмкость для накопителей электроэнергии оценивается в диапазоне 950–1300 кВт • ч. Для двух постов секционирования (ПСК 445 и ПСК-1) график заряженности не является уравновешенным и требует реализации подзаряда в режиме ожидания (в диапазоне напряжений 3550–3600 В). Сокращение полезной энергоёмкости до 200–300 кВт • ч приводит к потере объёма энергии при рекуперативном торможении величиной около 30 %;

3) работа накопителей электроэнергии на постах секционирования в отличие от применения выпрямительно-инверторных преобразователей позволяет снизить коэффициент нагрузки выпрямителей на тяговых подстанциях МЦК в среднем за сутки до 28,6 %, повысить минимальное напряжение в среднем на 1,5 %. По критерию энергетической эффективности лучшим вариантом является вариант, соответствующий размещению инверторов на тяговой подстанции ст. Андроновка и накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово и позволяющий повысить уровень энергетической эффективности на 13,3 %. В этом случае потенциальная экономия электроэнергии за сутки для пассажирского движения составит около 24,6 тыс. кВт • ч, уровень потерь электроэнергии в тяговой сети – 3,4 %. Альтернативным вариантом является размещение накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, в этом случае потенциал экономии электроэнергии равен предыдущему, уровень потерь электроэнергии – 3,6 %.

Применение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца позволяет выровнять график нагрузки, стабилизировать напряжение на шинах постов секционирования и повысить эффективность применения рекуперации.

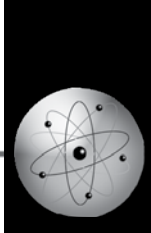
Предложенные подходы и методика проведения исследования могут быть применены при соответствующей их адаптации к условиям эксплуатации для анализа возможностей повышения эффективности систем тягового электроснабжения на городских железных дорогах других городов и стран, а также в целом — для железнодорожного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Е. Н. Московское центральное кольцо: инновационные решения // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2016. — № 4. — С. 42–45.
2. Агафонов Е. В. Новые технические средства ЖАТ на МЦК // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 2. — С. 12–14.
3. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. — 2018. — № 2. — С. 84–94.
4. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Перестенко А. Е. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 2. — С. 118–128.
5. Незевак В. Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей // Вестник транспорта Поволжья. — 2017. — № 6. — С. 34–44.
6. Wanzhong Zhao, Gang Wu, Chunyan Wang, Leiyan Yu, Yufang Li. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system. *Journal of Power Sources*, 2019, Vol. 427, pp. 174–183.
7. Caralis, G., Christakopoulos, T., Karellas, S., Gao Zhiqiu. Analysis of energy storage systems to exploit wind energy curtailment in Crete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 103, pp. 122–139. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.017.
8. Cabello, J. M., Roboam, X., Junco, S., Turpin, C. Direct sizing and characterization of energy storage systems in the energy-power plane. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2019, Vol. 158, pp. 2–17. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.04.002.
9. Jiang, Haoran & Wei, Lei & Fan, XinZhuang & Xu, Jianbo & Shyy, Wei & Zhao, Tianshou. A novel energy storage system incorporating electrically re-chargeable liquid fuels as the storage medium. *Science Bulletin*, 2019, Vol. 64, Iss. 4, pp. 270–280. DOI: 10.1016/j.scib.2019.01.014.
10. Hejun Yang, Yeyu Zhang, Yinghao Ma, Ming Zhou, Xi Yang. Reliability evaluation of power systems in the presence of energy storage system as demand management resource. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, Vol. 110, pp. 1–10.
11. Shevlyugin, M. V., Korolev, A. A., Golitsyna, A. E., Pletnev, D. S. Electric stock digital twin in a subway traction power system. *Russian Electrical Engineering*, 2019, Vol. 90, Iss. 9, pp. 647–652. DOI: 10.3103/s1068371219090098.
12. Гречишников В. А., Шевлюгин М. В. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене // Мир транспорта. — 2013. — № 5. — С. 54–58.
13. Титова Т. С., Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителем энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — № 2. — С. 200–210.
14. Вильгельм А. С., Незевак В. Л., Черемисин В. Т. Пути повышения энергоэффективности на малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов // Транспорт Урала. — 2014. — № 3. — С. 90–94.
15. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителем электрической энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — № 10. — С. 54–64.
16. Комьяков А. А., Эрбес В. В., Незевак В. Л. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 2. — С. 137–143.
17. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Эрбес В. В. Результаты оценки режимов работы активных и пассивных постов секционирования в системе тягового электроснабжения с целью выбора параметров накопителей электроэнергии // Известия Транссиба. — 2017. — № 3. — С. 132–143.
18. Незевак В. Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 4. — С. 159–170.
19. Nezevak, V., Shatokhin, A. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 410–416. DOI: 10.1109/uralcon.2019.8877672.
20. Незевак В. Л. Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2018. — № 3. — С. 47–57.
21. Язвинская Н. Н. Моделирование работы щелочных аккумуляторов // Научный альманах. — 2016. — № 8–1. — С. 314–319.
22. Галушкин Н. Е., Кукоз Ф. И., Язвинская Н. Н. и др. Моделирование работы аккумуляторов // Шахты: ЮРГУЭС. — 2009. — 199 с.
23. Галушкин Н. Е., Кукоз Ф. И., Язвинская Н. Н. и др. Структурное моделирование работы электрохимических аккумуляторов // Шахты: ЮРГУЭС. — 2009. — 192 с.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 17-20-01148 офи_м_РЖД/18.





Efficiency of Electric Energy Storage Systems on the Moscow Central Circle



Vasily T. CHEREMISIN



Vladislav L. NEZEVAK

*Cheremisin, Vasily T., Omsk State Transport University, Omsk, Russia.
Nezevak, Vladislav L., Omsk State Transport University, Omsk, Russia*.*

ABSTRACT

The urban railway systems using state-of-the-art technologies for train traffic, safety, traction and rail infrastructure are becoming increasingly widespread in the world. The Moscow Central Circle railroad is an example illustrating their integration into the urban transportation system of a megacity.

Development and continuous modernization of such railroad systems during their operation generate new innovative approaches, particularly in the field of electric power supply.

Electric traction load on the traction electric power supply system of the Moscow Central Circle railroad has several features explained by prevalence of passenger traffic and frequent changes of operating modes of electric trains. Frequently used regenerative braking determines the statement of the problem of developing a complex of measures to increase the efficiency of traction power supply system measured by the criterion of output capacitance reduction and of energy efficiency indicators' growth.

The use of electric energy storage systems within the traction power supply system can help to solve the mentioned problem.

The objective of the described research is to assess the efficiency of the implementation of the electric energy storage devices within the system of traction power supply system of the Moscow Central Circle. The research uses the methods of statistical processing of the measurement data and of simulation modelling. Simulation modelling of interaction of electric rolling stock with traction power supply system within the Moscow Central Circle allows to obtain the characteristics of load chart of electric energy storage systems and of bus voltage at sectioning posts, to evaluate the durations of operation cycles in charge and discharge modes, their number and relevant total amount of electric energy per day.

The obtained results allow assessing the technical features of various types of electric energy storage devices regarding operating conditions within traction power supply system of the Moscow Central Circle and to determine the economic efficiency of their implementation.

Keywords: transport, railway, urban transportation, electrical engineering, electric trains, traction power supply system, the Moscow Central Circle, electric energy storage systems, electrical load chart, simulation modelling, operation cycles, stabilizing voltage, charge level, energy capacity.

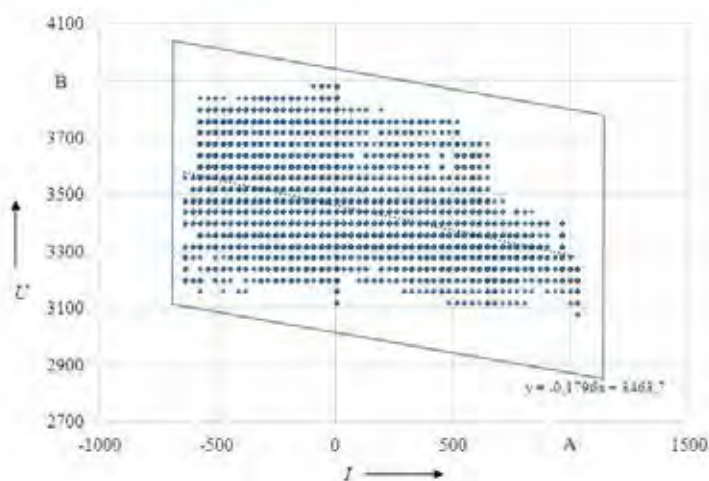
*Information about the authors:

Cheremisin, Vasily T. – D.Sc. (Eng), Professor, Head of the Department of Rolling Stock of Electric Railroads, Director of Railway Energy Saving Research Institute of Omsk State Transport University, Omsk, Russia, Cheremisinvt@gmail.com.

Nezevak, Vladislav L. – Ph.D. (Eng), Associate Professor, senior researcher of the Research division, associate professor at the Department of Railway Electric Power Supply of the Faculty of Electrical and Mechanical Engineering of Omsk State Transport University, Omsk, Russia, NezevakWL@mail.ru.

Article received 26.06.2019, updated 21.09.2019, accepted 15.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 58.



Pic. 1. Chart of current and voltage changes on current collector of electric trains of ES2G series on the MCC (according to DHST data).

Introduction

The Moscow Central Circle (MCC)¹ is a railroad section which applies advanced technologies commonly used in Russia to control train traffic, ensure safety, provide traction and maintain the infrastructure [1; 2]. Traction substations of traction power supply system of the MCC operate modern power and switching equipment comprising dry type converter transformers, high-speed circuit breakers, modular type switchgears, state-of-the-art rectifier converters etc. The traction power supply system comprises five traction substations and four sectioning posts. Electric trains of ES2G Lastochka [Swallow] series are circulating on the Moscow Central Circle to ensure passenger transportation.

The peculiarities of passenger train traffic result in formation of electrical load chart with two areas of maximum values corresponding to passenger transportation peaks. Besides, train traffic, characterized by frequent stops, accelerations and braking actions shall also be regarded as the peculiarity of the MCC.

The *objective* of the research is to assess the efficiency of the use of electric energy storage devices within the system of electric traction power supply system of the Moscow Central Circle. The study of the issues of the application of the energy storage devices allows to assess the impact of their operation on the energy indicators of the electric traction power supply system. The research used the *method* of statistical processing of the measurements of electrical values of the electric rolling stock and

of the electric traction power supply system, as well as *methods* of simulation modelling.

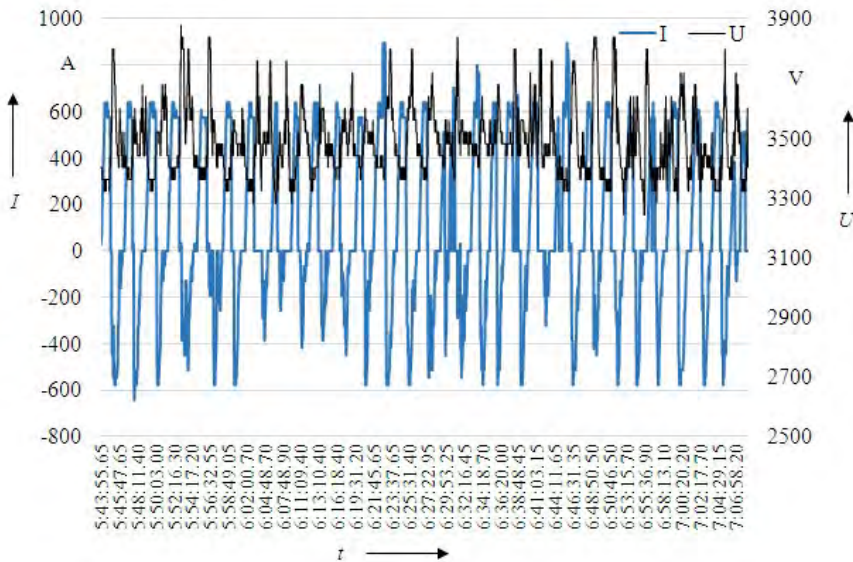
Results.

Analysis of measurement data

Under the conditions that prevail on the MCC the electric trains of ES2G series (Siemens Desiro Rus) enable the efficient regenerative braking creating the basis for energy exchange between neighboring rolling stock and contributing to enhancement of traffic energy efficiency. The results of processing of data on the electric trains circulating on the MCC collected during a day by motion parameter recorders of micro-processor-based control and diagnostic system of the Directorate for high-speed transportation (DHST) of the JSC Russian Railways make it possible to obtain the working ranges of traction currents and voltages at current collectors of electric rolling stock (Pic. 1). The chart shows voltage change range regarding traction and regenerative braking modes. The character of the given chart differs from similar ones for the sections with prevailing freight traffic. Firstly, for the MCC conditions the average characteristic slope coefficient is -0.17 versus -0.068 and -0.14 coefficients, obtained for locomotives of series 2ES6 and 2ES10 on railway sections with plain and mountainous terrains correspondingly [3]. Secondly, the voltage change range at the current collectors of electric trains ES2G is considerably wider. The voltage varies from 2900 V to 3800 V in the traction mode and from 3100 to 3900 V in regenerative braking mode. Considering that railway track profile relates to the type II (plain terrain) [4], the above-mentioned differences



¹ For more information please see [Electronic resource]: <https://www.mosmetro.ru/mcc/moscow-central-circle/>.



Pic. 2. Electric traction load schedule of an electric train circulating on the MCC (according to DHST data).

shall be associated with traffic organization conditions, which have an impact both on traction energy consumption and on imbalance level [5]. The frequency distributions for the given values show that voltage distribution is close to normal probability law (average value is approximately 3400 V), current distribution is close to uniform distribution in negative and positive ranges (for regenerative braking and traction modes).

Traction load schedule of electric trains circulating on the MCC is characterized by frequent regenerative braking actions. The Pic. 2 illustrates that fact by traction load and current collector voltage schedule of an electric train circulating on the MCC within the period 5:43 to 7:06 hh:mm. Specific features of the MCC trains' electric traction load are: the cyclic recurrence of traction and regenerative braking modes, the comparability of current levels in both modes, a specific change of voltage level corresponding to the operating modes of the electric train. The above-mentioned features of electric traction load result in the high level of specific recovery observed within the MCC and determine the relevance of the issues of the control of energy exchange processes within the traction power supply system.

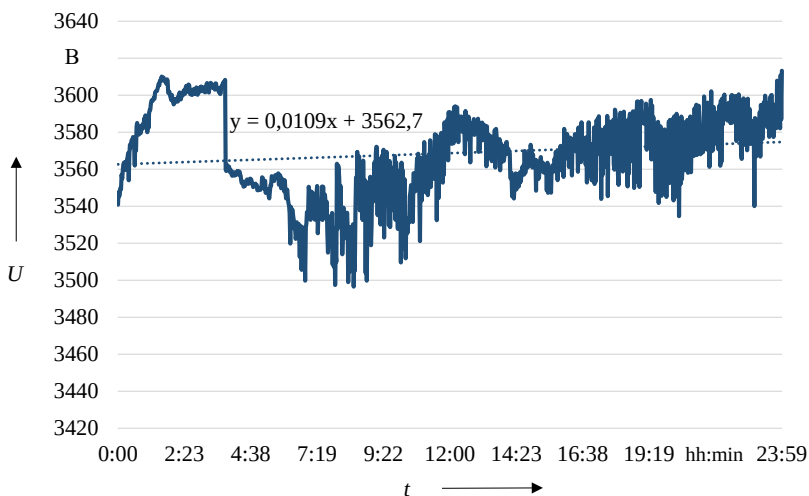
The global trends in the fields of energy exchange flows control in electric networks, of development of devices providing float

operation, of voltage stabilization and of growth in efficiency of renewable energy sources' operation have resulted in the emergence and development of electric energy storage systems [6–13]. The range of the above-mentioned issues is also peculiar for electric traction load, namely, for the MCC conditions.

Results of data processing

Installation of inverters receiving the regenerated energy and transferring it to AC buses is one of the methods to increase energy efficiency of the MCC. The inverter locations within the MCC are determined by traction and electrical calculations which figure out regenerated energy amount [11]. The introduction of energy storage systems into traction power supply system is an alternative option which has advantages compared with inverters installed at electric traction substations. The advantages lie in possibility to install the energy storage devices on devices located in-between traction substations and in improved load capacitance rates of traction power supply system [12].

The research on energy storage devices' efficiency within the traction electric power supply system should be conducted considering equipment operating conditions approved for the MCC. Particularly, traction substations use alternating and parallel operation of the converter units as an operation mode. For



Pic. 3. Chart of 3,3 kV bus voltage variation, station Andronovka (according to TE data).

instance, the traction substation Andronovka (belonging to Moscow Directorate of power supply of TransEnergy (TE) – a subsidiary to JSC Russian Railways) applies the parallel operation of the converter units. This circumstance shall be considered in calculations, assuming that the external characteristics of the converter units are not identical [13]. Slope coefficients of external characteristics of substation converter units are $-0,03$ and $-0,06$ for the example under consideration. The difference in characteristics does not have an essential significance for the purpose of modelling energy-exchange process in electric energy storage systems. In that case it is acceptable to assume that external characteristic slope coefficient has an average value.

When performing the studies, we should consider the existing voltage level at traction substations, which may essentially differ due to a set of reasons. Time chart of voltage variation at 3,3 kV buses, which values have been recalculated for one-minute averaging intervals for the measurements at the highest voltage side, is shown in Pic. 3. For considered cases the no-load (float) voltage shall be determined in the absence of traction load followed by averaging for the purpose of modelling.

Electric energy storage devices can be most efficiently located at the sites of location of devices of traction power supply system in-between substations (sectioning posts or parallel connection posts). The above-mentioned consideration is explained by

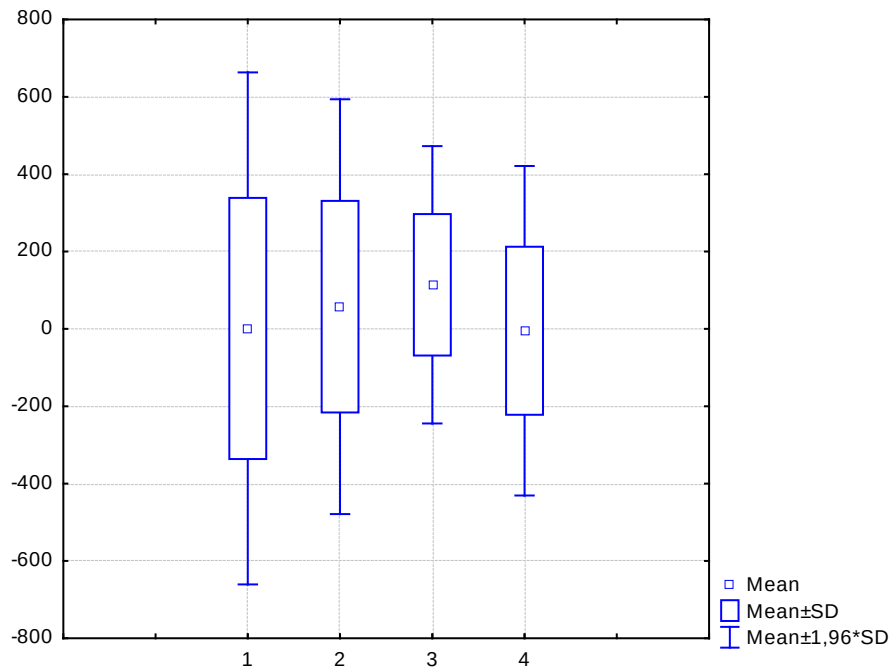
simultaneous reduction of electrical power losses in traction power supply system and increase in transit and traffic capacity at the inter-substation area. The transformation of the passive sectioning posts into the active ones by placing energy storage devices at them allows to obtain some positive effects for the traction power supply system [14].

The efficiency of electrical energy storage system application was studied by means of simulation modelling in KORTES [complex calculation of traction power supply] software package based on traction calculations and records on the execution of train traffic schedule of the MCC. The modelling accounted for difference of voltages across traction substation buses. Considering that the conditions of storage systems operation are similar to the conditions of reversible converters operation, the energy exchange processes were simulated for inverters using the voltage settings of respectively 3600 V and 3550 V for charge and discharge modes. For the given conditions the electrical load charts and charts of voltage variation across sectioning posts were obtained by means of instantaneous schemes.

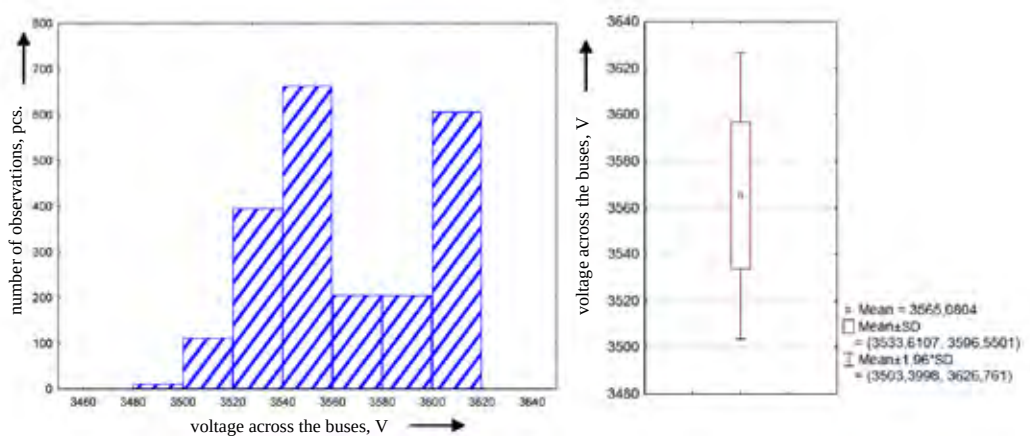
The frequency distribution of voltage across sectioning post buses obtained during simulation reveals quite narrow range of observed values (for instance, the distribution for PSK 270 [AC sectioning post 270] is shown in Pic. 4.

The simulation results allow us to evaluate the current variation ranges of energy storage devices at sectioning posts. The evaluation of





Pic. 4. Frequency bar chart showing voltage distribution across the buses of sectioning post PSK 270 (authors' calculations).



Pic. 5. Range of load variation of energy storage devices on sectioning posts' buses: 1 – PSK 270, 2 – PSK 445, 3 – PSK-1, 4 – PSK Cherkizovo (authors' calculations).

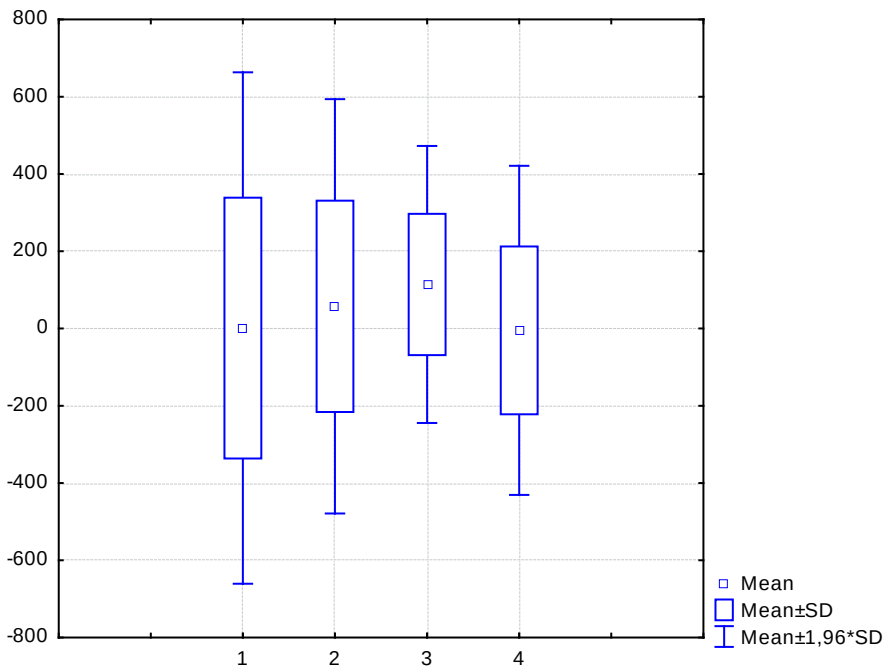
current ranges for the conditions of energy storage devices at sectioning posts within the MCC for the obtained mean values and root-mean-square deviation (SD) is shown in Pic. 5.

Mode of energy storage device operation is characterized by the amount of electrical energy in charge and discharge modes, by duration of operation in each of those modes. Design characteristics for discharge and charge modes as applied to the operating conditions of energy storage device at PSK 270 are presented respectively in Pic. 6 and Pic. 7.

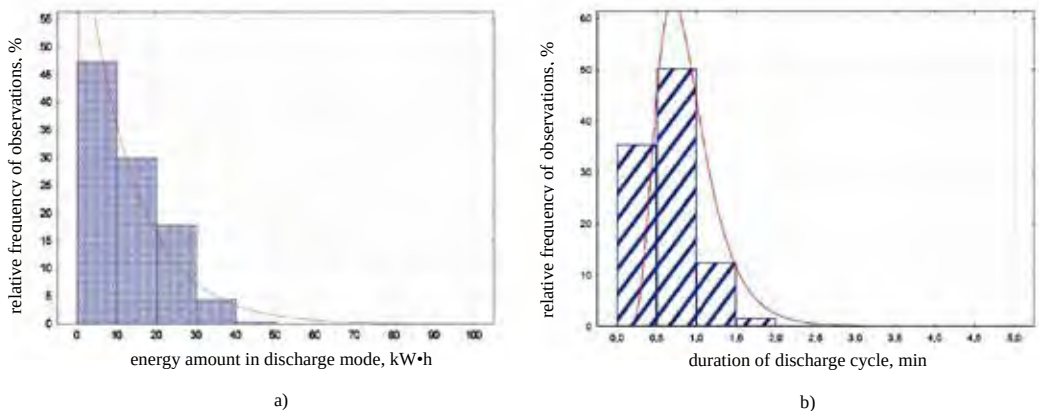
The average number of cycles of operation of energy storage devices for the operating conditions at the sectioning posts is 542 for the discharge mode and 404 for the charge mode.

Evaluation of operating conditions of energy storage systems

Stabilizing voltage is one of the most important parameters of an energy storage device, influencing its energy characteristics and determining its operation in charge, discharge and quiescent modes. For the given



Pic. 6. Frequency bar chart showing distribution of electrical energy amount and duration of operation in discharge mode for PSK 270 (authors' calculations).



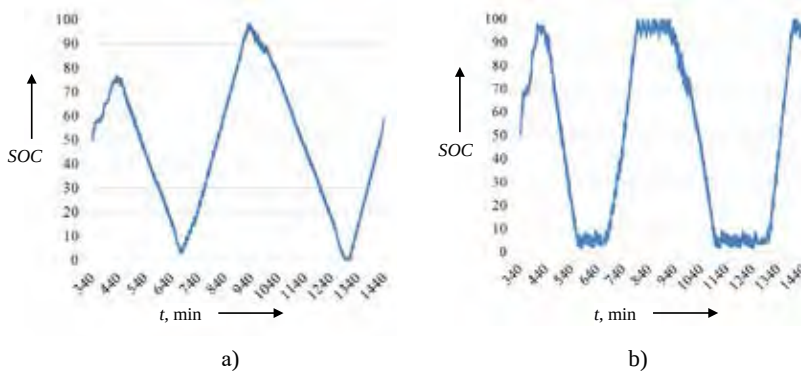
Pic. 7. Frequency bar chart showing distribution of electrical energy amount and duration of operation in charge mode for PSK 270 (authors' calculations).

conditions of the different episodes of operation of energy storage device [18–20] it was found that a cycle of operation of the energy storage device in any mode does not exceed five minutes, namely, for PSK 270 it does not last more than two minutes, and energy amount does not exceed 50 kW·h per episode, i.e. energy exchange processes are short-term, and repeatedly iterated during the day.

The state of charge level of energy storage devices is determined by several factor comprising initial voltage, internal resistance, quantity of electricity, capacity, discharge

(charge) current. The equations of Shepherd, Haskina-Danilenko, Romanov [21–23], other empirical dependences, equations obtained by means of regression analysis or artificial neural networks are applied for calculations of the charge level. A simple method to evaluate the state of charge level is an A·h meter-based method or a method based on the quantity of electricity. The method based on W·h meter for the charge and discharge modes is a modification of the above-mentioned method, and it is applicable to evaluate energy storage device operation in general. This method is





Pic. 8. Chart of SOC variation for energy storage device at PSK 270: a – with unlimited energy capacity, b – with energy capacity limited to 500 kW·h (authors' calculations).

used for further evaluation of energy exchange processes in traction power supply system.

Constructing a chart of cumulative electric energy amount variation makes it possible to obtain the required level of net energy capacity W_{rec} as difference between the maximum W_{max} and the minimum cumulative value W_{min} per day. This W_{rec} amount allows us to evaluate the state of charge level of energy storage device at k -th step of calculation using the formula below:

$$SoC_k = \frac{\sum_{t_0}^{t_k} u_k \cdot i_k \cdot \Delta t_k}{W_{\text{rec}}} \cdot 100, \quad (1)$$

where u_k , i_k are voltage and current values for k -th time interval;

Δt_k – time increment.

The results of simulation modelling of interaction of the rolling stock with traction power supply system show that if the value of power capacity of energy storage device is not limited for the conditions of PSK 270, then the required net energy capacity W_{rec} reaches the level of 1185 kW·h. If applied to net energy capacity, the chart of state of charge level variation, under the assumption that the initial level of state of charge $SoC_0 = 50\%$, is shown in Pic. 8a. If the net energy capacity is limited to 500 kW·h, then the variation chart shows that SOC does not change cyclic recurrence during the day and does not significantly change its character (Pic. 8b). In the second case the total amount of electrical power per day in the discharge mode decreases compared to the first case from 7054 kW·h to 5920 kW·h, i.e. decreases by 16,1 %, in the charge mode it

decreases from 7166 kW·h to 6168 kW·h, i.e. decreases by 13,9 %. If the energy capacity is limited to 300 kW·h and 200 kW·h we observe decreases for the discharge mode by respectively 22,2 % and 24,9 %, for the charge mode by respectively 21,6 % and 24,7 %. The charts of state of charge level variation show that charge/discharge cycles at some time intervals of the day do not alternate, but succeed, thus determining the appearance of the daily chart, explained by the cyclical nature of traffic.

The influence on the indicators of load capacitance

Placing of energy storage devices at sectioning posts allows to improve the load capacitance of the electric power supply system and to increase energy efficiency of transportation process.

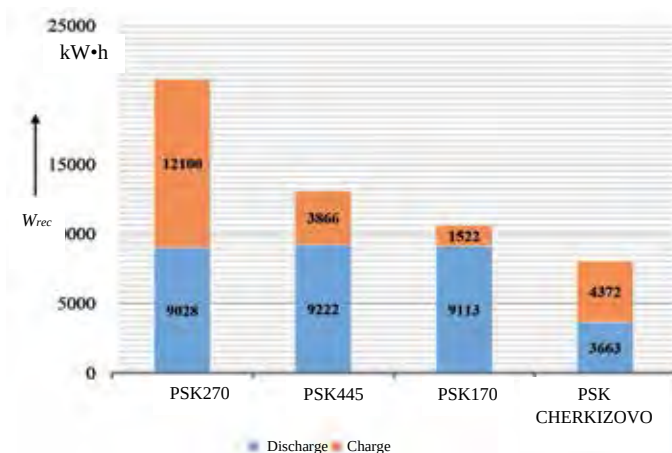
Let us consider the results of calculations regarding load capacitance for the basic variant. The basic variant is assumed to be an existing variant of power supply system but without energy storage devices or any other receivers of power pf regenerative braking of the rolling stock.

We'll consider two indicators of the load capacitance: load factor of traction substation rectifiers and minimum voltage level on current collector of the rolling stock.

Load factor of rectifiers is determined using the formula below:

$$k_{l,r,t} = \frac{I_{d,t}}{\sum I_{r,nom} \cdot k_{acc,r,l,t}}, \quad (2)$$

where I_d is a largest mean value of current for the period t , A;



Pic. 9. Bar chart of electrical energy amounts of energy storage devices divided by operating modes (authors' calculations).

$I_{r\text{ nom}}$ is a nominal current of rectifier units, determined by the number of rectifiers under load, A;

$K_{all,r,t}$ – acceptable load coefficient (for averaged time intervals 0.25 min – 1,9; 2 min – 1,5; 15 min – 1,25; 30 min and more – 1,0).

Variation of load coefficient of traction substation rectifiers, %, is determined by the formula below:

$$\Delta k_{l,r,t} = \frac{k_{l,r,t}^{bas} - k_{l,r,t}^{cons.}}{k_{l,r,t}^{bas}} \cdot 100, \quad (3)$$

where $k_{l,r,t}^{bas}$, $k_{l,r,t}^{cons.}$ are load coefficients for traction substations rectifiers at average period t for basic variant and variant under consideration.

The largest reduction in rectifiers' load coefficient was observed at substations of Pokrovskoye-Streshnevo station and of Andronovka station, the load coefficients of rectifiers were respectively lower by over 25 % and 35 %.

The total amounts of electrical energy in discharge and charge modes are evaluated considering the location of energy storage devices at the sectioning posts of the MCC. Comparison of electrical energy amounts of storage devices W_{rec} at each sectioning post has shown that they should be balanced (Pic. 9) by means of recharge in standby mode when sectioning post bus voltage is close to no-load voltage of the traction substations for storage devices located at sectioning posts PSK 445 and PSK 170.

Comparison of variants by minimum and one-minute voltage, made to evaluate voltage

stabilizing effect at sectioning post buses exerted by energy storage devices, has shown that for the variant of energy storage device arrangement according to the basic variant the minimum voltage on current collector of electric rolling stock is higher by 1,5 % or by 50 V on an average.

The operation of energy storage devices results in decrease in rectifiers' load coefficient at the MCC traction substations by 12,5 % to 28,6 % per day on an average. The largest amounts of electrical energy in charge and discharge modes of the energy storage devices are observed at the sectioning post PSK 270, where the ratio of discharge and charge electrical energy is 1/1,3.

The comparison of load capacitance indicators of traction power supply system for the variants with energy storage devices and with inverters, has shown that in the case of the use of energy storage devices there is a decrease in load coefficient of substation rectifier transformers by 22,5 % per day on an average and an increase in average minimum voltage on current collectors of electrical trains by 4,1 % or by 150 V approximately.

The comparison of the variants using respectively reversible converters and energy storage devices by energy efficiency has shown only an insignificant discrepancy of the obtained values. The variant applying reversible converters at traction substations might show 11,97 % increase in transportation energy efficiency, while the variant applying energy storage devices at sectioning posts might allow to attain 11,94 %



Table 1

Electric power consumption for traction for different variants (authors' calculations)

Variant	Balanced electric power consumption for traction, kW · h	Traction network losses, kW · h	Amount of charge regeneration, kW · h
Basic variant	181116	6011	0
Variant with reversible converter	159424	5874	16717
Variant with energy storage devices	159490	5014	21862

increase. Losses in traction network for the variant with inverter are of 3,68 % versus 3,14 % losses for the variant applying energy storage devices at sectioning posts (Table 1). Amount of electric energy for regenerative and charge modes for the above-mentioned variants is of 10,5 % and 13,7 % respectively.

According to energy efficiency criterion, the best variant is to apply an inverter at the traction substation of Andronovka station and power storage devices at sectioning posts PSK 270 and PSK Cherkizovo, limiting the substations from both sides. In this case the potential saving of electric power for passenger transportation will be approximately of 24,6 thous. kW · h per day, electric power losses will be of 3,4 %. As an alternative option, the energy storage devices may be located at sectioning posts PSK 270 and PSK Cherkizovo. In that case electric power saving will potentially attain 24,6 thous. kW · h per day, electric power losses will be of 3,4 %.

Conclusions

Thus, according to the results of the research, the following conclusions can be drawn:

1. The amounts of electrical energy processed by energy storage devices at sectioning posts of the Moscow Central Circle in charge and discharge modes, during separate time intervals of operation, do not exceed 50kW · h. In most cases the time duration of operation in each of different modes does not exceed three minutes. The number of operations in discharge and charge modes reaches 600 cases per day.

2. The chart of state of charge level of storage devices at the MCC sectioning posts shows a pronounced cyclical nature of operation (two cycles per day are observed in the chart), explained by peculiarities of traffic schedule of electric trains, namely, by the morning and the evening peaks of transportation. The net energy

capacity of energy storage devices is evaluated to be within the range of 950–1300 kW · h. For two sectioning posts (PSK 445 and PSK 1) the state of charge chart is not balanced and requires implementation of recharge in standby mode (within the voltage range of 3550–3600 V). The reduction of net energy capacity to 200–300 kW · h results in the loss of energy amount during regenerative braking by approximately 30 %.

3. The operation of energy storage devices at sectioning posts, unlike reversible converters, allows to reduce rectifiers' load factor at the MCC traction substations by 28,6 % per day on an average, and to increase minimum voltage by 1,5 % on an average. The optimal option by energy efficiency criterion is to place inverters at the traction substation of Andronovka station and energy storage devices at sectioning posts PSK 270 and PSK Cherkizovo. This variant makes it possible to increase energy efficiency by 13,3 %. In that case possible electric power saving per day will be approximately of 24,6 thous. kW · h, electric power losses in the traction system will be of 3,4 %. The alternative option is to place energy storage devices at the sectioning posts PSK 270 and PSK Cherkizovo. In that case the potential electric power saving will be equal to the previous one and electric power losses will be of 3,6 %.

The use of energy storage devices in the electric power supply system of the Moscow Central Circle could allow to balance the load, to stabilize voltage at the buses of the sectioning posts and to increase the efficiency of regenerative braking.

The proposed approaches and methods of the research, once adapted to operation conditions, can be applied for analysis of opportunity to increase traction power supply system efficiency on the urban railroads of other cities and countries and for the railroad transport in general.

REFERENCES

1. Rozenberg, Ye. N. Moscow central circle: innovative solutions [Moskovskoye tsentralnoye kol'tso: innovatsionnye resheniya]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznnykh dorog* [Herald of the Institute of Natural Monopolies Research: Railway Equipment Magazine], 2016, Iss. 4 (36), pp. 42–45.
2. Agafonov, Ye. V. New technical facilities of rail automatics and telemechanics on the MCC. [Novye tekhnicheskije sredstva ZhAT na MKTS]. *Avtomatika, svyaz', informatika*, 2017, Iss. 2, pp. 12–14.
3. Nezevak, V. L., Shatohin, A. P. Features of the Traction Load for Determining the Parameters of the Electric Energy Storage Device. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 2 (75), pp. 84–94.
4. Cheremisin, V. T., Nezevak, V. L., Perestenko, A. E. Characteristics of track profiles on electrified sections of railroad in terms of type classification [Kharakteristiki profily puti na elektrifitsirovannykh uchastkakh zheleznnykh dorog v aspekte klassifikatsii tipov]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*, 2017, Iss. 2 (66), pp. 118–128.
5. Nezevak, V. L. Improvement of the model of train schedule parameters impact on traction power consumption on DC and AC sections with track profiles of type I and 2 by means of regression models and neural networks [Sovershenstvovaniye modeli vliyaniya parametrov grafika dvizheniya poyezdov na tyagovoye elektropotrebleniye na uchastkakh postoyannogo i peremennogo toka s I-m i II-m tipom profilya puti pri pomoshchi regressiionnykh modeley i neyronnykh setey]. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2017, Iss. 6 (66), pp. 34–44.
6. Wanzhong Zhao, Gang Wu, Chunyan Wang, Leiyan Yu, Yufang Li. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system. *Journal of Power Sources*, 2019, Vol. 427, pp. 174–183.
7. Caralis, G., Christakopoulos, T., Karellas, S., Gao Zhiqiu. Analysis of energy storage systems to exploit wind energy curtailment in Crete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 103, pp. 122–139. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.017.
8. Cabello, J. M., Roboam, X., Junco, S., Turpin, C. Direct sizing and characterization of energy storage systems in the energy-power plane. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2019, Vol. 158, pp. 2–17. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.04.002.
9. Jiang, Haoran & Wei, Lei & Fan, XinZhuang & Xu, Jianbo & Shyy, Wei & Zhao, Tianshou. A novel energy storage system incorporating electrically re-chargeable liquid fuels as the storage medium. *Science Bulletin*, 2019, Vol. 64, Iss. 4, pp. 270–280. DOI: 10.1016/j.scib.2019.01.014.
10. Hejun Yang, Yeyu Zhang, Yinghao Ma, Ming Zhou, Xi Yang. Reliability evaluation of power systems in the presence of energy storage system as demand management resource. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, Vol. 110, pp. 1–10.
11. Shevlyugin, M. V., Korolev, A. A., Golitsyna, A. E., Pletnev, D. S. Electric stock digital twin in a subway traction power system. *Russian Electrical Engineering*, 2019, Vol. 90, Iss. 9, pp. 647–652. DOI: 10.3103/s1068371219090098.
12. Grechishnikov, V. A., Shevlyugin, M. V. Operation of Power Storage Device in Moscow Metro. *World of Transport and Transportation*, 2013, Vol. 11, Iss. 5, pp. 54–58.
13. Titova, T. S., Evstafiev, A. V. Increasing energy efficiency of locomotives equipped with energy storage devices [Povysheniye energeticheskoy effektivnosti lokomotivov s nakopitel'yami energiyi]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobscheniya*, 2017, Iss. 2, pp. 200–210.
14. Wilhelm, A. S., Nezevak, V. L., Cheremisin, V. T. Ways to improve energy efficiency on the small ring of Moscow railroad using inverters [Puti povysheniya energoeffektivnosti na malom kol'tse Moskovskoy zheleznoy dorogi s ispol'zovaniyem invertorov]. *Transport Urala*, 2014, Iss. 3 (42), pp. 90–94.
15. Cheremisin, V. T., Nezevak, V. L., Shatokhin, A. P. Increase of energy efficiency of traction power supply system in the conditions of sectioning posts operating with power storage devices [Povysheniye energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektroснабжениya v usloviyakh raboty postov sektionirovaniya s nakopitel'yami elektricheskoy energii]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2015, Vol. 326, Iss. 10, pp. 54–64.
16. Komyakov, A. A., Erbes, V. V., Nezevak, V. L. Evaluation of the parallel operation efficiency of rectifier converters of traction substations based on the measuring systems data [Otsenka effektivnosti parallel'noy raboty vypryamitel'nykh preobrazovateley tyagovykh podstantsij na osnove dannykh izmeritel'nykh sistem]. *Sovremennyye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System Analysis. Modelling], 2015, Iss. 2 (46), pp. 137–143.
17. Cheremisin, V. T., Nezevak, V. L., Erbes, V. V. Results of evaluation of operating modes of active and passive sectioning posts in the traction power supply system for the purpose of electricity storage device parameters selection [Rezultaty otsenki rezhimov raboty aktivnykh i passivnykh postov sektionirovaniya v sisteme tyagovogo elektroснабжениya s tsel'yu vybora parametrov nakopiteley elektroenergii]. *Izvestiya Transsiba*, 2017, Iss. 3 (31), pp. 132–143.
18. Nezevak, V. L. Simulation modelling of load modes of sectioning post buses during operation of energy storage devices in traction power supply system [Modelirovaniye rezhimov nagruzki na shinakh postov sektionirovaniya pri rabote v sisteme tyagovogo elektroснабжениya nakopiteley elektroenergii]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*, 2017, Iss. 4 (68), pp. 159–170.
19. Nezevak, V., Shatokhin, A. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System. *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 410–416. DOI: 10.1109/uralcon.2019.8877672.
20. Nezevak, V. L. Simulation modelling of modes of operation of energy storage devices at sectioning post buses in the conditions of heavy-tonnage train traffic [Modelirovaniye rezhimov raboty nakopiteley elektroenergii na shinakh posta sektionirovaniya v usloviyakh propuska tyazhelovesnykh poyezdov Sovremennyye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovaniye] [Modern technologies. System Analysis. Modelling], 2018, Iss. 3 (59), pp. 47–57.
21. Yazvinskaya, N. N. Simulation modelling of alkali storage batteries' operation [Modelirovaniye raboty shchelochnykh akkumulyatorov]. *Nauchniy Almanah* [Science Almanac], 2016, Iss. 8–1(22), pp. 314–319.
22. Galushkin, N. Ye., Kukoz, F. I., Yazvinskaya, N. N. [et al]. Simulation modelling of storage batteries' operation. [Modelirovaniye raboty akkumulyatorov]. *Shahty, Publ. YURGUES*, 2009, 199 p.
23. Galushkin, N. Ye., Kukoz, F. I., Yazvinskaya, N. N. [et al]. Structural modelling of electrochemical storage batteries' operation [Strukturnoye modelirovaniye raboty elektrokhimicheskikh akkumulyatorov]. *Shahty, Publ. YURGUES*, 2009, 192 p.

The research was conducted with the support of the Russian Foundation for Basic Research within the grant No. 17-20-01148 ofi_m_RZD/18.





Влияние жёсткости демпфирующего подрельсового элемента на параметры многомассовой колебательной системы «вагон–путь»



Сергей БЕСПАЛЬКО



Елена КУРЗИНА



Ангелина КУРЗИНА



Иса ЖАЙСАН

Беспалько Сергей Валерьевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Курзина Елена Геннадьевна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Курзина Ангелина Михайловна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Жайсан Иса Жаксылыкулы – Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан.*

Актуальная для большинства железных дорог задача увеличения веса и скоростей движения поездов неразрывно связана с решением задач улучшения динамических качеств вагонов и локомотивов во взаимодействии с верхним строением железнодорожного пути. Прочность и устойчивость подвижного состава против схода с рельсов в различных климатических зонах необходимо обеспечить при минимизации эксплуатационных расходов. Анализ надёжности и работоспособности системы «вагон–путь» возможен на основе проведения многовариантных динамических расчётов математических моделей, экспериментальных исследований динамических колебаний.

Пока недостаточно изученными остаются вопросы влияния изменения упруго-гистерезисных свойств различных материалов амортизаторов под действием температурных факторов на элементы многомассовой колебательной системы.

Ключевые слова: железная дорога, путь, вагон, многомассовая колебательная система, обобщённая модель «вагон–путь», демпфирующий материал, сэндвич, упруго-гистерезисные свойства, динамическая секущая жёсткость, динамический гистерезис, температурное воздействие, многовариантные расчёты, реактивная сила, отклонение.

Целью настоящей работы являлось проведение анализа динамических процессов, протекающих в многомассовой колебательной системе «вагон–путь», под воздействием изменения жёсткости и коэффициентов внутреннего трения демпфирующего подрельсового элемента в зависимости от типа конструкционного материала и температурного воздействия.

Разработана модель многомассовой колебательной системы «вагон–путь». Проведены многовариантные расчёты модели с различными параметрами жёсткости и внутреннего трения подрельсового демпфирующего элемента, выбранными из экспериментально построенных динамических гистерезисов. Представлены результаты расчёта реактивных сил и отклонений в элементах колебательной системы в зависимости от температуры, типа материала, толщины и конструктивного решения демпфирующего подрельсового элемента.

*Информация об авторах:

Беспалько Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства Российского университета транспорта, Москва Россия, Besp-alco@yandex.ru.

Курзина Елена Геннадьевна – старший научный сотрудник Объединённого научно-исследовательского центра «Перспективные технологии» Российского университета транспорта, Москва, Россия, Kurzina_elena@mail.ru.

Курзина Ангелина Михайловна – аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства Российского университета транспорта, Москва, Россия, Aekfm@mail.ru.

Жайсан Иса Жаксылыкулы – научный сотрудник сектора «Подвижной состав» Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан, Issa_161@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.06.2019, принята к публикации 17.09.2019.

For the English text of the article please see p. 87.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение веса и скоростей движения поездов неразрывно связано с решением задач улучшения динамических качеств вагонов и локомотивов во взаимодействии с верхним строением железнодорожного пути. При этом обеспечить прочность и устойчивость подвижного состава против схода с рельсов в различных климатических зонах необходимо при минимизации эксплуатационных расходов. Анализ надёжности и работоспособности общей системы возможен на основе проведения многовариантных динамических расчётов математических моделей, составленных с использованием экспериментальных данных, по результатам которых определяют оптимальные значения параметров её элементов.

Моделированием сил взаимодействия экипажа и пути с выводом и анализом основных дифференциальных уравнений движения, составленных на основе общих вариационных принципов аналитической механики для конкретных практических задач, занимались многие отечественные учёные [1–4].

Ряд зарубежных работ также посвящён теоретическому моделированию и экспериментальным исследованиям динамических колебаний, например, воздействию частоты, жёсткости, коэффициентов демпфирования, скорости движущейся гармонической нагрузки на интенсивность ме-

ханизма образования волнообразного износа рельсов и колёс [5–9].

Однако недостаточно изученными остаются вопросы влияния изменения упруго-гистерезисных свойств различных материалов амортизаторов под действием температурных факторов на элементы многомассовой колебательной системы.

Ввиду этого целью настоящей работы явился анализ динамических процессов, протекающих в многомассовой колебательной системе «вагон–путь» под воздействием изменения жёсткости и коэффициентов внутреннего трения демпфирующего подрельсового элемента в зависимости от типа конструкционного материала и температурного воздействия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Железнодорожный путь и подвижной состав представляют сложную термодинамическую систему, в которой они взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Движение вагона по железнодорожному пути можно представить в виде колебаний многомассовой системы, показанной на рис. 1.

Для описания движения тела в пространстве применяют принцип Даламбера, согласно которому отбрасывают связи между телами и заменяют их действие реакциями, прикладывают силы инерции и моменты сил инерции [10; 11]. Расчётная схема взаимодействия ходовых элементов

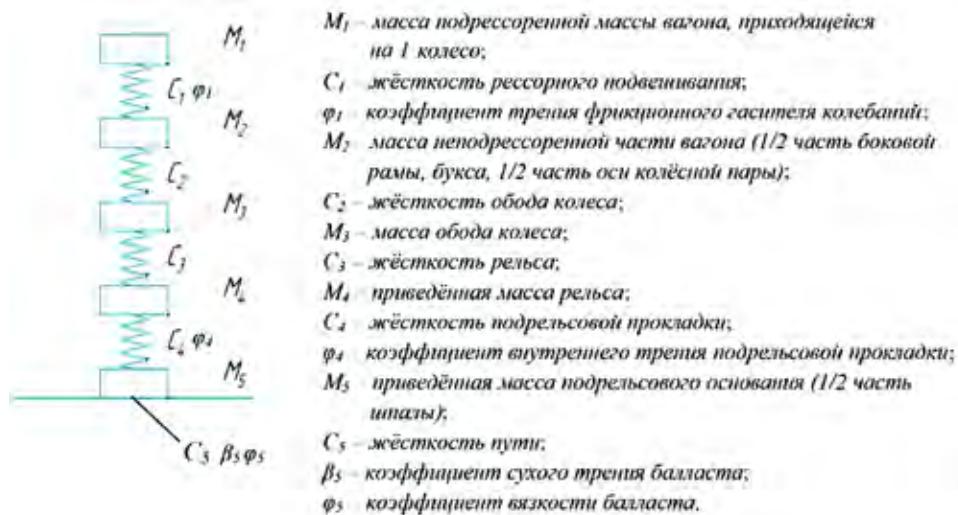


Рис. 1. Обобщённая модель взаимодействия ходовых частей с верхним строением железнодорожного пути.

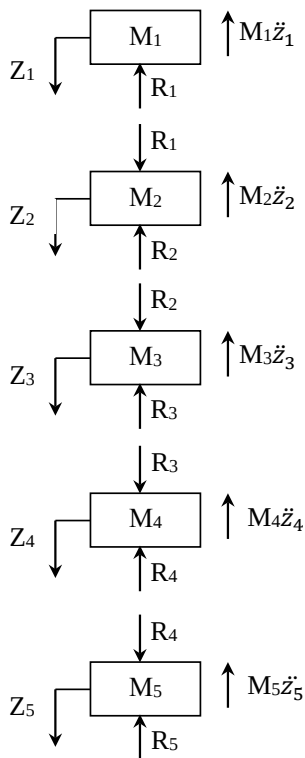


Рис. 2. Расчётная схема взаимодействия ходовых частей с верхним строением железнодорожного пути.

многомассовой колебательной системы представлена на рис. 2.

В каждый момент движения механической системы работа активных сил, сил реакций связей и сил инерции на любом возможном перемещении из занимаемого положения равна нулю. В связи с этим система дифференциальных уравнений, описывающих такую систему, принимает следующий вид:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{z}_1 + R_1 = 0 \\ M_2 \ddot{z}_2 + R_2 - R_1 = 0 \\ M_3 \ddot{z}_3 + R_3 - R_2 = 0 \\ M_4 \ddot{z}_4 + R_4 - R_3 = 0 \\ M_5 \ddot{z}_5 + R_5 - R_4 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Реакции связей на расчётной схеме направляются так, как если бы они действовали при положительной деформации упругих и упруго-вязких элементов. За положительную деформацию принимаем деформацию сжатия.

Уравнения реакций связей являются функциями жёсткостей, координат, их производных:

$$\begin{cases} R_1 = C_1 [1 + \phi_1 \text{sign}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)](z_1 - z_2) \\ R_2 = C_2 (z_2 - z_3) \\ R_3 = C_3 (z_3 - z_4) \\ R_4 = C_4 (z_4 - z_5) + \beta_4 (\dot{z}_4 - \dot{z}_5) \\ R_5 = C_5 [1 + \phi_5 \text{sign}(\dot{z}_5)]z_5. \end{cases} \quad (2)$$

Массы (M_i) и жёсткости (C_i) элементов системы определены из справочных данных для грузового полувагона с осевой нагрузкой 25 тс, рельса Р65, железобетонной шпалы и щебёночного балласта. В каждом варианте расчёта изменяли параметры жёсткости и внутреннего трения подрельсовой прокладки, которые выбирали из экспериментально определённых динамических гистерезисов при температурах $+23^\circ\text{C}$ и -40°C (рис. 3, 4) [12] для двух типов тестовых композиционных материалов и сэндвича:

- резиновых композитов: неармированного (ТПРК) толщиной 10 мм и 14 мм, и армированного измельчённым полиамидным кордом (РВК) толщиной 14 мм;
- термопластичных эластомеров (смесь полиуретана и поливинилхлорида пластика), отличающихся параметрами статической жёсткости — ТЭП1нж толщиной 14 мм и ТЭП2вж толщиной 14 мм;
- сэндвича Р9-П5, составленного расчётным методом из материала РВК толщиной 9 мм и ТЭП1нж толщиной 5 мм.

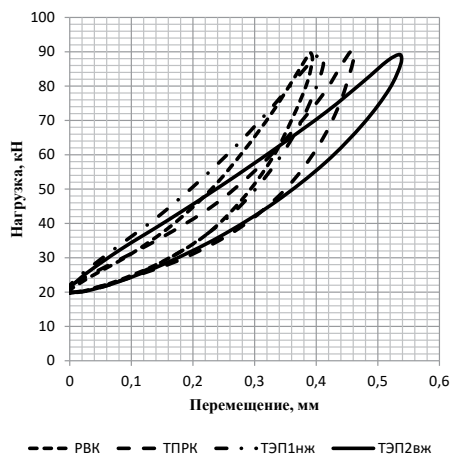
Значения динамических секущих жёсткостей образцов в зависимости от материала, толщины и температуры представлены в таблице 1.

При ударе колеса по рельсу начальные условия примут следующий вид:

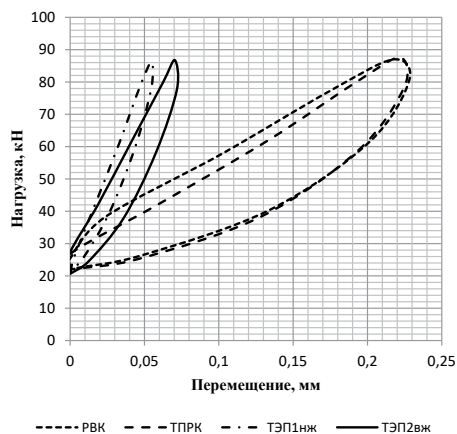
$$\begin{aligned} t = 0: z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = 0; \\ \dot{z}_1 = \dot{z}_2 = \dot{z}_3 = \dot{z}_4 = \dot{z}_5 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Интегрирование дифференциальных уравнений второго порядка осуществляли численными методами с помощью специально разработанной программы.

Проведены многовариантные расчёты разработанной математической модели с определением реактивных сил (реакций связей) и отклонений при изменении параметров жёсткости и внутреннего трения одного из элементов системы, расположенного между рельсом и подрельсовой опорой.

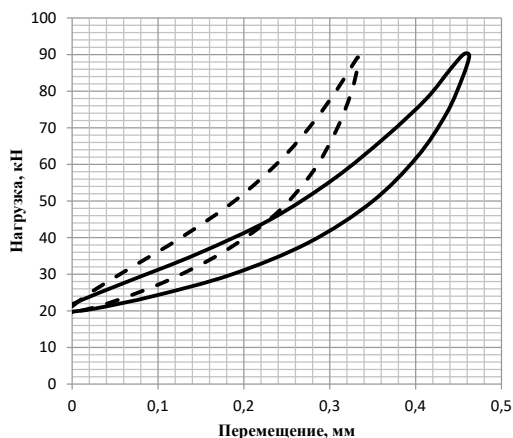


а)

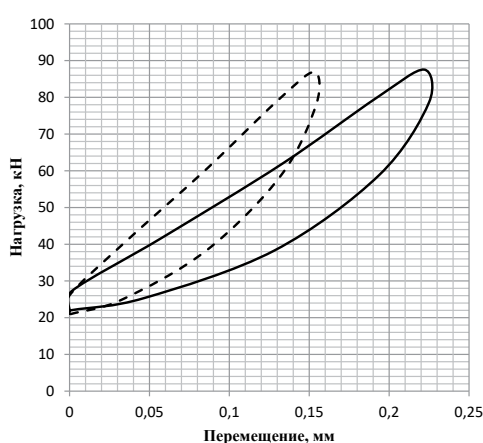


б)

Рис. 3. Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при динамическом нагружении с частотой 10 Гц образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температуре +23°С (а) и температуре -40°С (б).



а)



б)

Рис. 4. Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при динамическом нагружении с частотой 10 Гц образцов из материала ТПРК толщиной 10 мм (пунктирная линия) и 14 мм (сплошная линия) при температуре +23°С (а) и температуре -40°С (б).

Таблица 1

**Значения динамических секущих жёсткостей образцов
в зависимости от материала и температуры**

Наименование и характеристика образца	Динамическая секущая жёсткость, кН/мм, при температуре	
	+23°С	-40°С
Резиновый композит ТПРК толщиной 10 мм	204,4	426,4
Резиновый композит ТПРК толщиной 14 мм	150,1	296,1
Резиноволокнистый композит РВК толщиной 14 мм	179,2	297,9
Термоэластопласт ТЭП1нж толщиной 14 мм	126,5	903,6
Термоэластопласт ТЭП2вж толщиной 14 мм	169,0	1186,9
Сэндвич Р9-П5 из материала РВК толщиной 9 мм и ТЭП1нж толщиной 5 мм	170,6	389,2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ распределения реакций связей, эквивалентных по модулю реактивным

силам, многомассовой системы «вагон—путь» при накатывании колеса на рельс показал, что изменение упруго-гистрезис-



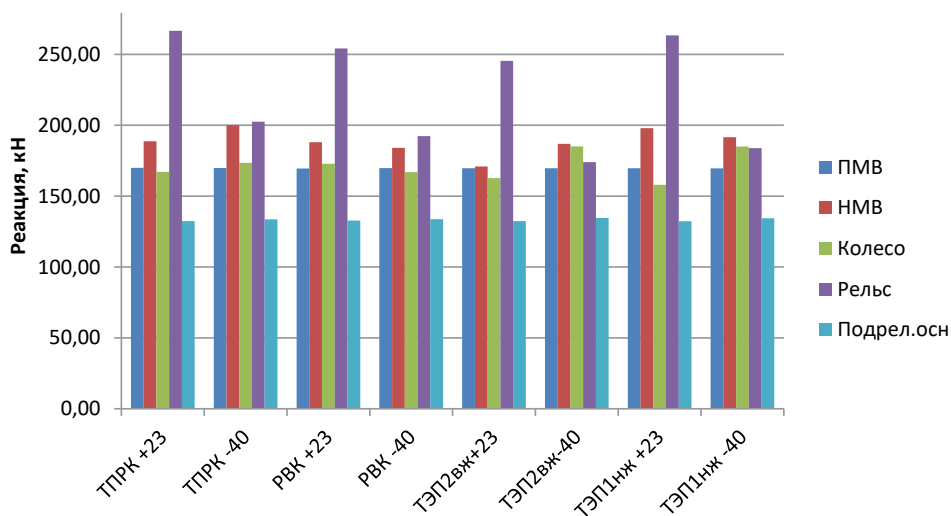


Рис. 5. Распределение реакций связей в элементах многомассовой системы.

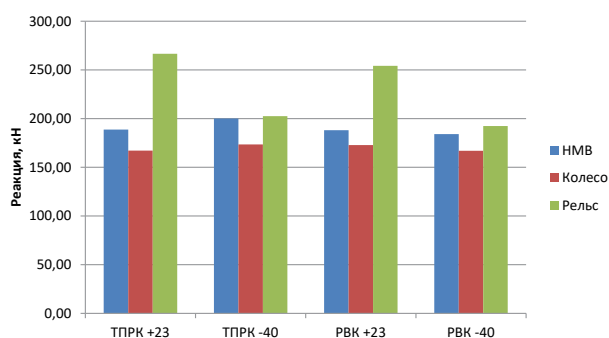


Рис. 6. Распределение реакций связей при установке, в качестве демпфирующих подрельсовых элементов, резиновых композитов.

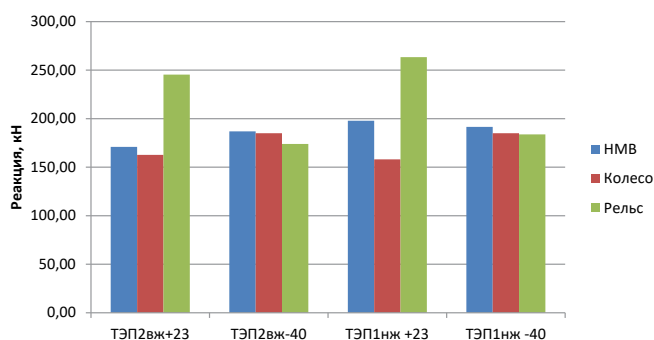


Рис. 7. Распределение реакций связей при установке, в качестве демпфирующих подрельсовых элементов термоэластопластов.

ных параметров демпфирующего подрельсового элемента в зависимости от типа применяемого материала оказывает незначительное влияние на подрессоренную часть вагона и подрельсовое основание (рис. 5).

Далее в рис. 5–13 приняты следующие сокращения: ПМВ – подрессоренная масса вагона, НМВ – неподдресоренная масса

вагона, «+23» – температура +23°C; «-40» – температура -40°C.

Увеличение динамической жёсткости демпфирующего подрельсового элемента резиновых композитов при температуре -40°C (рис. 6) по сравнению с жёсткостью при температуре +23°C приводит к уменьшению реактивной силы на рельс на 24 % ввиду его меньшего прогиба. При

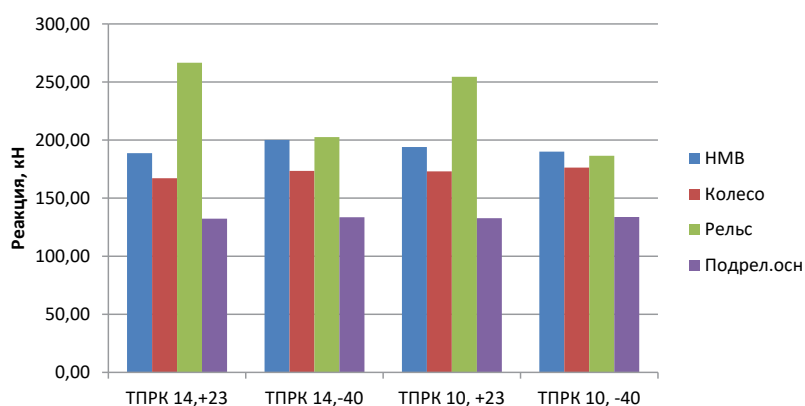


Рис. 8. Распределение реакций связей при установке демпфирующих подрельсовых элементов различной толщины.

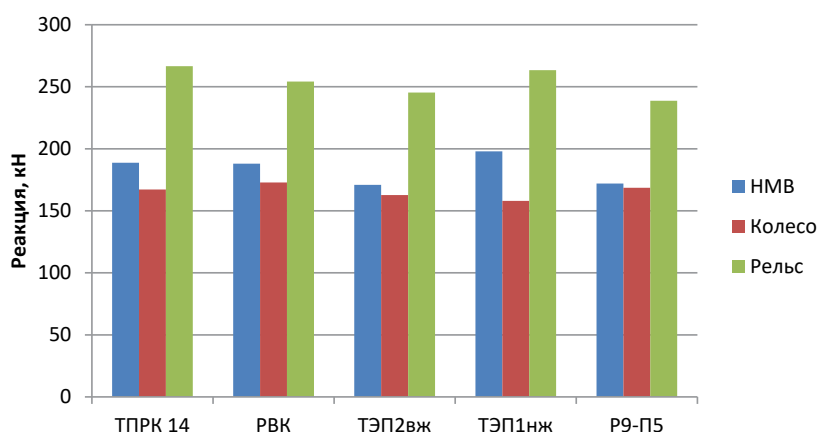


Рис. 9. Распределение реакций связей при установке однотипных демпфирующих подрельсовых элементов и сэндвича толщиной 14 мм.

этом реактивные силы в остальных элементах системы (колесо, неподрессоренная масса вагона, подрельсовое основание) изменяются незначительно. Применение резиноволокнистого композита при отрицательных температурах по сравнению с резиновым наиболее целесообразно, так как снижает нагрузку на неподрессоренную массу вагона на 8 %, а на подрельсовое основание в 1,37 раз.

В случае использования исследуемых термоэластопластов в качестве демпфирующих подрельсовых элементов при температуре -40°C по сравнению с нормальными температурами (рис. 7) реактивная сила на рельсе снижается на 30 %, а на колесе возрастает на 14–17 %. Следовательно, при эксплуатации в температурном диапазоне от -40°C и ниже нагрузка на колесо увеличится на 26 кН, что превысит

на 8 % максимально допустимую осевую нагрузку 25 тс в расчёте на одно колесо.

Увеличение жёсткости подрельсовых амортизаторов для стабилизации параметров рельсовой колеи за счёт уменьшения их толщины приводит в случае применения резиновых композитов толщиной 14 мм и 10 мм к незначительным изменениям ($\pm 5\%$) реактивных сил во всех элементах системы (рис. 8).

Анализ распределения реактивных сил при использовании подрельсовых демпфирующих элементов толщиной 14 мм (ТПРК, РВК, ТЭП2вж, ТЭП1нж и сэндвича Р9-П5, рис. 9) показал наиболее оптимальное распределение сил в сэндвиче Р9-П5: при практически равных и меньших, чем в других вариантах, реакциях на колесе и неподрессоренной части вагона реактивная сила на рельсе значительно меньше остальных.



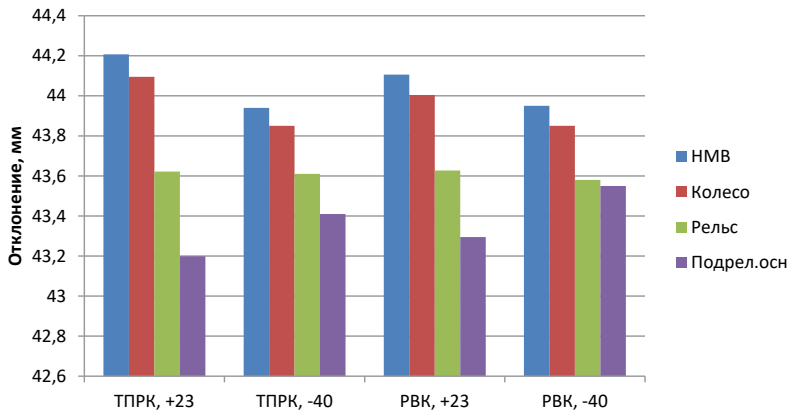


Рис. 10. Распределение отклонений при установке, в качестве демпфирующих подрельсовых элементов, резиновых композитов.

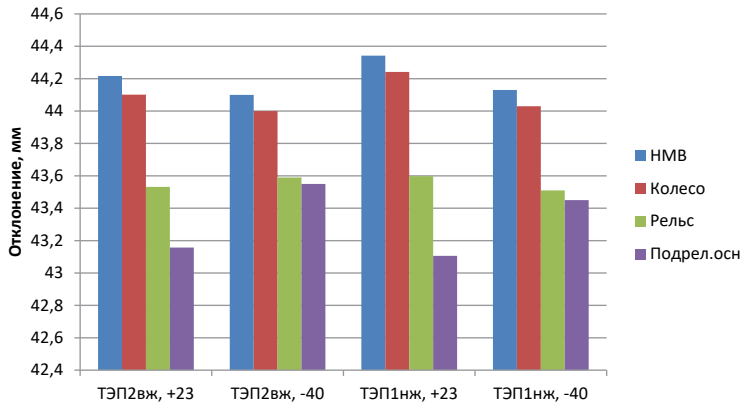


Рис. 11. Распределение отклонений при установке, в качестве демпфирующих подрельсовых элементов, термоэластопластов.

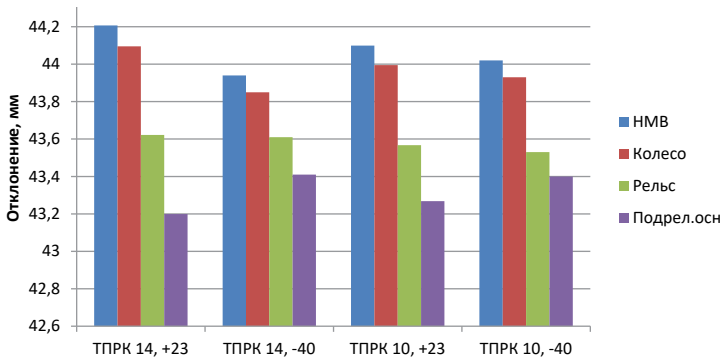


Рис. 12. Распределение отклонений при установке демпфирующих подрельсовых элементов различной толщины.

Анализ распределения отклонений (перемещений от начального положения) элементов многомассовой системы «вагон—путь» показал, что изменение упруго-гистрезисных параметров демпфирующих подрельсовых элементов в зависимости от

типа применяемого материала оказывает незначительное влияние на обрессоренную часть вагона.

С увеличением жёсткости резиновых композитов при температуре -40°C и, как следствие, снижением амортизирующих

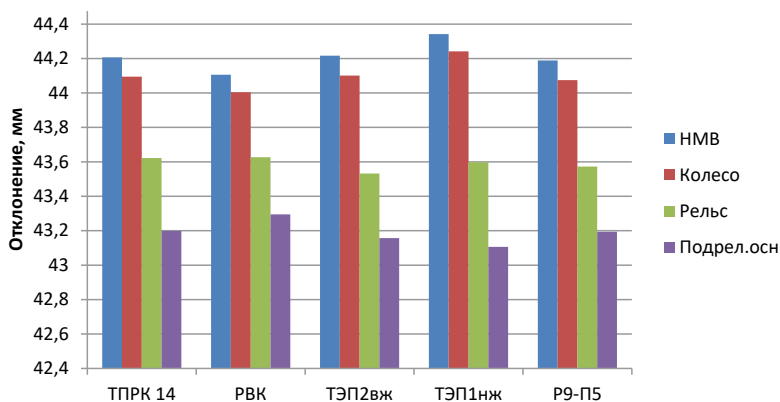


Рис. 13. Распределение отклонений при установке одностипных демпфирующих подрельсовых элементов и сэндвича толщиной 14 мм.

свойств уменьшаются отклонения колеса (ТПРК — на 0,24 мм; РВК — на 0,15 мм) и неподрессоренной части вагона (ТПРК — на 0,27 мм; РВК — на 0,16 мм) при незначительных изменениях отклонений рельса (рис. 10). Однако, отклонения в подрельсовом основании возрастают (ТПРК — на 0,21 мм; РВК — на 0,25 мм).

В случае применения термоэластопластов с увеличением жёсткости при температуре -40°C по сравнению с нормальной температурой также наблюдается уменьшение отклонений колеса (ТЭП2вж — на 0,1 мм; ТЭП1нж — на 0,21 мм) и неподрессоренной части вагона (ТЭП2вж — на 0,12 мм; ТЭП1нж — на 0,21 мм) с одновременным ростом отклонений подрельсового основания (ТЭП2вж — на 0,39 мм; ТЭП1нж — на 0,34 мм) (рис. 11).

Следует заметить, что уровень отклонений колеса и неподрессоренной части вагона при использовании термоэластопластов в 1,6 раз выше, чем при наличии резиновых композитов, что связано со значительным увеличением жёсткости данных материалов вследствие работы в пределах температуры хрупкости.

Увеличение жёсткости резиновых подрельсовых элементов за счёт уменьшения их толщины приводит к незначительному уменьшению отклонений колеса и неподрессоренной части вагона при положительной температуре (0,1 мм) и некоторому увеличению их при отрицательной температуре (рис. 12). Отклонения рельса с повышением жёсткости уменьшаются, а подрельсового основания увеличиваются при

положительной температуре, и практически не изменяются при отрицательной вследствие начала процесса кристаллизации композита, оказывающего преобладающее влияние.

В случае применения сэндвича Р9-П5 (9 мм РВК; 5 мм ТЭП1нж) наблюдается снижение отклонений колеса и неподрессоренной части вагона до уровня резиновых композитов с одновременным уменьшением отклонений рельса и подрельсового основания на 0,2 мм по сравнению с отклонениями доминирующего компонента РВК (рис. 13).

ВЫВОДЫ

1. Разработанная программа расчёта многомассовой колебательной системы (вагон—путь) позволяет с высокой степенью точности и минимальными затратами определить реактивные силы и отклонения в элементах системы в зависимости от изменения упругогистерезисных свойств демпфирующих подрельсовых элементов из различных материалов и конструкций, применяемых при различных температурах эксплуатации.

2. Отмечено, что с увеличением жёсткости устанавливаемых демпфирующих подрельсовых элементов, связанной с конструктивными особенностями, типом материала и температурой эксплуатации, реактивная сила на рельсе убывает, а на колесе и неподрессоренной массе вагона — наоборот возрастает, что может быть важной причиной их преждевременного износа и разрушения.



3. Применение резиноволокнистого композита при отрицательных температурах по сравнению с резиновым наиболее целесообразно, так как снижает нагрузку на неподрессоренную массу вагона на 8 %, а на подрельсовое основание в 1,37 раз.

4. Использование термоэластопластов в качестве демпфирующих подрельсовых элементов при температуре -40°C приводит к значительному увеличению реактивной силы, действующей на колесо, что превышает на 8 % максимально допустимую осевую нагрузку в расчёте на одно колесо.

5. Отклонения колеса и неподрессоренной части вагона при использовании демпфирующих подрельсовых элементов из термоэластопластов при температуре -40°C в 1,6 раз выше, чем при использовании резиновых композитов, что связано со значительным увеличением жёсткости данных материалов вследствие работы в пределах температуры хрупкости.

6. Увеличение жёсткости подрельсовых амортизаторов для стабилизации параметров рельсовой колеи за счёт уменьшения их толщины приводит в случае применения резиновых композитов толщиной 14 мм и 10 мм к незначительным изменениям реактивных сил и отклонений во всех элементах системы.

7. Оптимальное распределение реактивных сил и отклонений в общей системе достигается применением сэндвичей, спроектированных из разнотипных компонентов, которые в определённой пропорции сочетают положительный эффект друг друга. При этом многомассовая колебательная система становится более уравновешенной, что приводит к улучшению динамических процессов, плавности хода, снижению риска возникновения резонансных явлений, устойчивости подвижного состава против схода с рельсов.

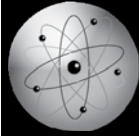
Представляется, что данные выводы могут быть достаточно универсальными применительно к различным типам и видам подвижного состава и инфраструктуры, однако для подтверждения заявленных процессов требуются соответствующие

экспериментальные исследования параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вериги М. Ф., Петров Г. И., Хусидов В. В. Имитационное моделирование сил взаимодействия экипажа и пути // Бюллетень ОСЖД. — Варшава. — 1995. — № 6. — С. 3–8.
2. Захаров С. М., Погорелов Д. Ю., Симонов В. А. Анализ влияния параметров экипажей и пути на интенсивность износа в системе колесо–рельс (на основе полного факторного эксперимента) // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2010. — № 2. — С. 31–35.
3. Хусидов В. Д., Заславский Л. В. Моделирование реакций в динамических системах с зазорами в соединениях // Тезисный доклад на IX Международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, надёжность и безопасность подвижного состава», Днепропетровск. — 29–31 мая, 1996. — С. 138.
4. Есаулов В. П., Сладковский А. В., Токарев В. В. Математическая модель взаимодействия рельсовой колеи и колёсной пары и некоторые вопросы автоматизированного проектирования оборудования для их производства и ремонта // Тезисный доклад на всесоюзной научной конференции. — Воронеж. — 1991. — С. 103.
5. Sun, Y. Q., Simson, S. Wagon–track modelling and parametric study on rail corrugation initiation due to wheel stick-slip process on curved track. *Wear*, 2008, Vol. 265, pp. 1193–1201. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.043.
6. Croft, B. E., Jones, C. J. C., Thompson, D. J. Modelling the effect of rail dampers on wheel–rail interaction forces and rail roughness growth rates. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, Vol. 323, Iss. 1–2, pp. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.12.013>.
7. Chen, G. X., Zhou, Z. R., Ouyang, H. [et al]. A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset–track system. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, Vol. 329, Iss. 22, pp. 4643–4655. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.01.016.
8. Caiyou Zhao, Ping Wang, Xi Sheng, Duo Meng. Theoretical simulation and experimental investigation of a rail damper to minimize short-pitch rail corrugation. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2017, pp. 1–14. Article ID 2359404. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2359404>.
9. Yan-qi Liu, Yan Zhang, Chun-fang Song, Huangsen Gu, Longlong Xu. Excitation frequency, fastener stiffness and damping, and speed of the moving harmonic load on the dynamic response of the track structure. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, Vol. 33, Iss. 1, pp. 11–19. DOI: 10.1007/s12206-018-1202-9.
10. Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д. Динамика вагона. — М.: Транспорт, 1991. — 360 с.
11. Данилов В. Н., Хусидов В. Д., Филиппов В. Н. Постановка и метод решения задачи пространственных колебаний двухосной тележки // Труды МИИТ. — Вып. 368. — 1971. — С. 30–44.
12. Kurzina, E. G., Kolmakov, A. G., Aksenov, Yu. N., Kurzina, A. M., Bogachev, A. Yu., Semak, A. V. Comparison of the composite materials intended for damping elements for the infrastructure of rail transport and rolling stock. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, Iss. 4, pp. 448–452. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029519040232>. ●

Авторы выражают благодарность за научное сопровождение представленной работы профессору кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта, доктору технических наук Филиппову Виктору Николаевичу.



The Influence of the Stiffness of the Elements of Rail Damping on the Parameters of the Multi-Mass Wagon–Track Vibratory System



Sergey V. BESPALKO



Elena G. KURZINA



Angelina M. KURZINA



Issa Zh. ZHAISAN

Bespalko, Sergey V., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Kurzina, Elena G., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Kurzina, Angelina M., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Zhaيسان, Issa Zh., Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan.*

ABSTRACT

The task of achieving the increase in the weight and velocity of trains being core objective for most railways is inherently associated with solving problems of improving the dynamic qualities of wagons and locomotives during their interaction with the upper structure of the railway track. The strength and stability of rolling stock against derailment in various climatic zones should be ensured together with minimizing operating costs. Analysis of the reliability and performance of the wagon–track system can be conducted based on multivariate dynamic calculations of mathematical models and through experimental studies of dynamic vibrations.

Currently, the issues of the influence of changes in the elastic-hysteresis properties of various impact absorber materials under the action of temperature factors on the elements of a multi-mass vibratory system remain insufficiently studied.

The purpose of the research described in the article was to analyze the dynamic processes taking place in a multi-mass wagon–track vibratory system under the influence of changes in stiffness and internal friction coefficients of a damping rail component depending on a type of structural material and ambient temperature.

The research resulted in elaborating model of multi-mass vibratory wagon–track system. Multivariate model calculations were carried out regarding various stiffness and internal friction parameters of damping elements situated under the rail; the parameters being selected from experimentally constructed dynamic hysteresis. The work presents results of calculations of the reaction forces and deviations in the elements of the vibratory system depending on temperature, type of material, thickness and design of damping elements.

Keywords: railway, railway track, wagon, multi-mass vibratory system, generalized wagon–track model, damping material, sandwich plates, pads, elastic-hysteresis properties, dynamic secant stiffness, dynamic hysteresis, thermal action, multivariate calculations, reaction force, deviation.

* Information about the authors:

Bespalko, Sergey V. – D.Sc. (Eng), Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities of Russian University of Transport, Moscow, Russia, Besp-alco@yandex.ru.

Kurzina, Elena G. – Senior researcher of Advanced technology Joint Scientific and Research Center of Russian University of Transport, Moscow, Russia, Kurzina_elena@mail.ru.

Kurzina, Angelina M. – Ph.D. student at the Department of Wagons and Wagon Facilities of Russian University of Transport, Moscow, Russia, Aekfm@mail.ru.

Zhaيسان, Issa Zh. – Researcher at the Rolling Stock sector of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev (KazATC), Almaty, Kazakhstan, Issa_161@mail.ru.

Article received 21.06.2019, accepted 17.09.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 78.

Introduction

The increase in train weight and velocity is inseparably associated with solving the problems of improving the dynamic qualities of wagons and locomotives during their interaction with the upper structure of the railway track. However, it is important to ensure the strength and protection of the rolling stock against derailment in various climatic zones at minimum operating costs. It is possible to conduct an analysis of the reliability and performance of the general system based on multivariate dynamic calculations of mathematical models, built using experimental data. The results of the calculations determine optimal values of the parameters of the elements of this general system.

Many Russian scientists were engaged in modelling the interaction forces arising between vehicle and track followed by derivation and analysis of the basic differential equations of motion, based on the general variational principles of analytical mechanics for specific practical problems [1–4].

Several international works were also devoted to theoretical modelling and experimental studies of dynamic vibrations, for example, to the effects of frequency, stiffness, damping factors, velocity of moving harmonic load on the intensity of emergence of corrugated rail and wheel wear [5–9].

However, the issues dedicated to the influence of changes in the elastic-hysteresis

properties of dampers made of different materials under the action of temperature factors on the elements of a multi-mass vibratory system are still insufficiently studied.

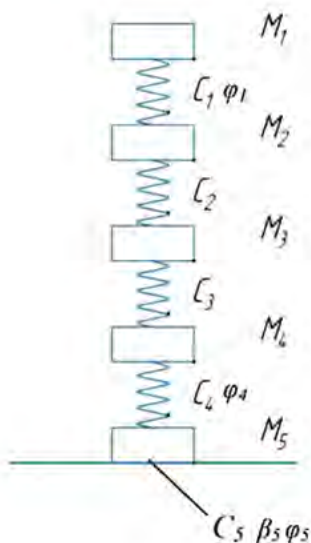
In view of the above mentioned, the *objective* of the research was to analyze dynamic processes occurring in a multi-mass wagon–track vibratory system under the influence of changes in stiffness and internal friction factors of the elements of rail damping depending on the type of structural material and thermal effect.

Method of the research

Railway track and rolling stock compose a complex thermodynamic system, where they get into interaction with each other and with the environment. The movement of a wagon along the railway track can be represented as the vibration of the multi-mass system shown in Pic. 1.

Usually the d'Alembert's principle is used to describe the spatial motion of a body. According to that principle the constraints between bodies are disregarded and their action is replaced by reactions, inertia forces and moments of inertia forces' moments are applied [10; 11]. The calculation model of interaction of moving parts of multi-mass vibratory system is shown in Pic. 2.

At each moment of mechanical system motion, the work of active forces, of constraint reaction forces and of inertia forces for any



- M_1 – wagon sprung mass per 1 wheel.
- C_1 – stiffness of spring suspension.
- ϕ_1 – friction factor of friction shock absorber (damper).
- M_2 – mass of unsprung part of the wagon (1/2 of the lateral frame journal-box, 1/2 of the wheelset axis).
- C_2 – wheel rim stiffness.
- M_3 – wheel rim mass.
- C_3 – rail rim mass.
- M_4 – reduced mass of the rail.
- C_4 – rail pad stiffness.
- ϕ_4 – internal friction factor of the rail pad.
- M_5 – reduced mass of the undertrack foundation (1/2 of track sleeper).
- C_5 – track stiffness.
- β_5 – ballast dry friction factor.
- ϕ_5 – ballast viscosity factor.

Pic. 1. Generalized model of interaction between the running parts and the superstructure of the railway track.

possible movement from the occupied position is equal to zero. In this regard, the system of differential equations describing such system can be represented as shown below:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{z}_1 + R_1 = 0 \\ M_2 \ddot{z}_2 + R_2 - R_1 = 0 \\ M_3 \ddot{z}_3 + R_3 - R_2 = 0 \\ M_4 \ddot{z}_4 + R_4 - R_3 = 0 \\ M_5 \ddot{z}_5 + R_5 - R_4 = 0. \end{cases} \tag{1}$$

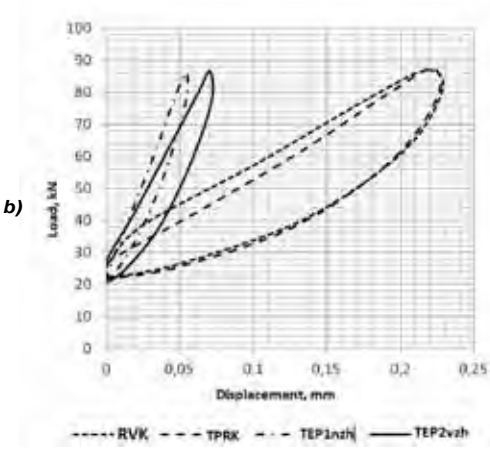
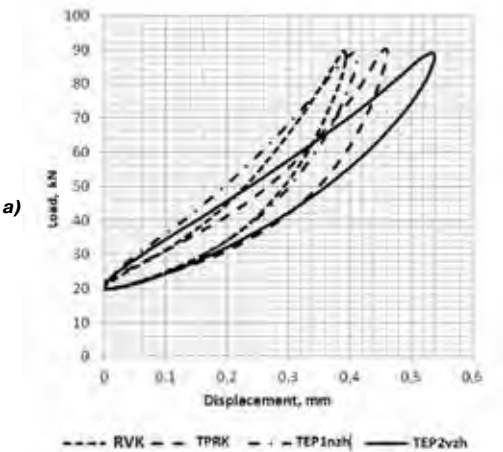
Constraint reactions in calculation model are directed in such a way as if they acted under positive deformation of elastic and viscoelastic elements. Compression deformation is assumed as positive deformation.

Equations of constraints reactions forces are the functions of stiffness, coordinates, and their derivatives:

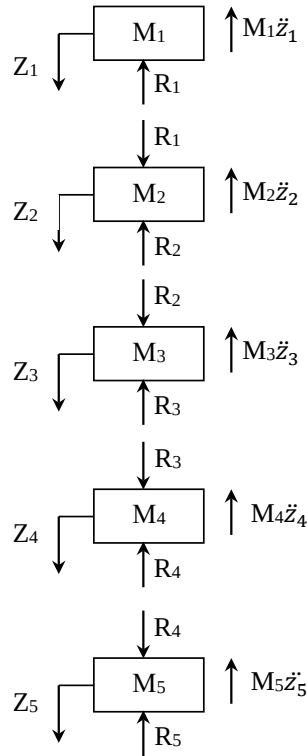
$$\begin{cases} R_1 = C_1[1 + \phi_1 \text{sign}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)](z_1 - z_2) \\ R_2 = C_2(z_2 - z_3) \\ R_3 = C_3(z_3 - z_4) \\ R_4 = C_4(z_4 - z_5) + \beta_4(\dot{z}_4 - \dot{z}_5) \\ R_5 = C_5[1 + \phi_5 \text{sign}(\dot{z}_5)]z_5. \end{cases} \tag{2}$$

Masses (M_i) and stiffness values (C_i) of the system elements are determined from the reference data for the freight semi-wagon with axle loading 25 tf, R65 rail, steel reinforced concrete sleeper and broken-stone ballast. Each calculation variant operated different stiffness parameters and internal friction values of rail pad, which were selected among experimentally determined dynamic hystereses at temperatures $+23^{\circ}\text{C}$ and -40°C (Pics. 3, 4) [12] for the two types of compound material and sandwich plates:

- Rubber compounds: non-reinforced (TPRK) compound of 10 mm and 14 mm



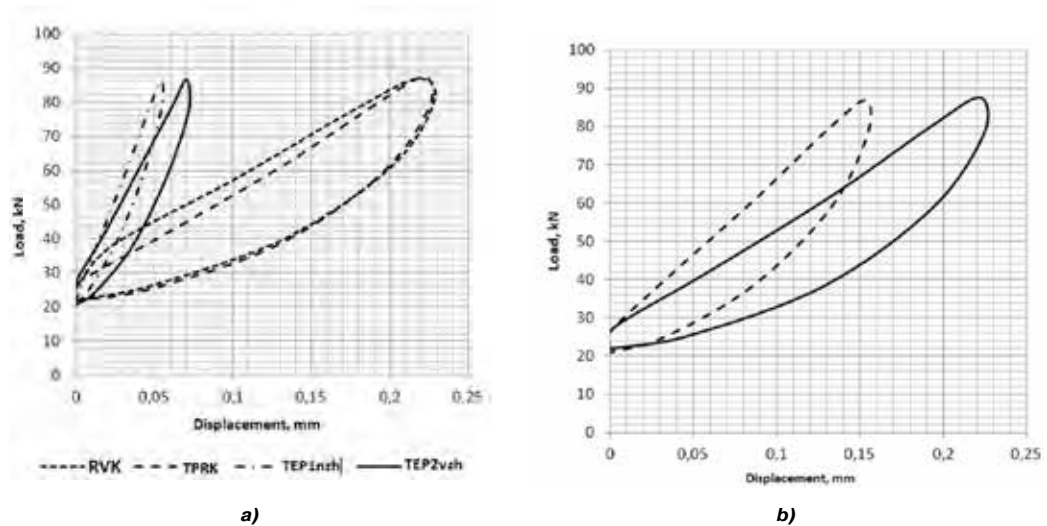
Pic. 3. The dependence of the compressive load on displacement under dynamic loading with 10 Hz frequency of TPRK, RVK, TEP1nzh, TEP2vzh samples at temperature $+23^{\circ}\text{C}$ (a) and temperature -40°C (b).



Pic. 2. The calculation model of interaction between the running parts with the superstructure of the railway track.

thickness, and aggregated PA-cord reinforced compound (RVK) of 14 mm thickness.

- Thermoplastic elastomers (mixture of polyurethane and non-rigid PVC), which differ in parameters of static stiffness – TEP1nzh type was of 14 mm thickness and TEP2vzh type was of 14 mm thickness.



Pic. 4. The dependence of the compressive load on displacement under dynamic loading with 10 Hz frequency of TPRK samples of 10 mm thickness (dotted line) and 14 mm thickness (solid line) at temperature +23°C (a) and temperature -40°C (b).

Table 1
Values of dynamic secant stiffness of the samples depending on material and temperature

Name and specification of sample	Dynamic secant stiffness, kN/mm, at temperature	
	+23°C	-40°C
Rubber compound TPRK, 10 mm thick	204,4	426,4
Rubber compound TPRK, 14 mm thick	150,1	296,1
Rubber-fiber compound RVK, 14 mm thick	179,2	297,9
Thermoplastic elastomer TEP1nzh, 14 mm thick	126,5	903,6
Thermoplastic elastomer TEP2vzh, 14 mm thick	169,0	1186,9
Sandwich plates R9-P5 composed of RVK material, 9 mm thick and TEP1nzh, 5 mm thick	170,6	389,2

• Sandwich plate of R9-P5 type, composed using calculation method of RVK material of 9 mm thickness and of TEP1nzh type elastomer of 5 mm thickness.

Values of dynamic secant stiffness of the samples depending on material, thickness and temperature are shown in the Table 1 below.

Upon the wheel impact on the rail the initial conditions will be as follow:

$$\begin{aligned} t = 0: z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = 0; \\ \dot{z}_1 = \dot{z}_2 = \dot{z}_3 = \dot{z}_4 = \dot{z}_5 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

The second-order differential equations were integrated by numerical methods by means of specially developed software.

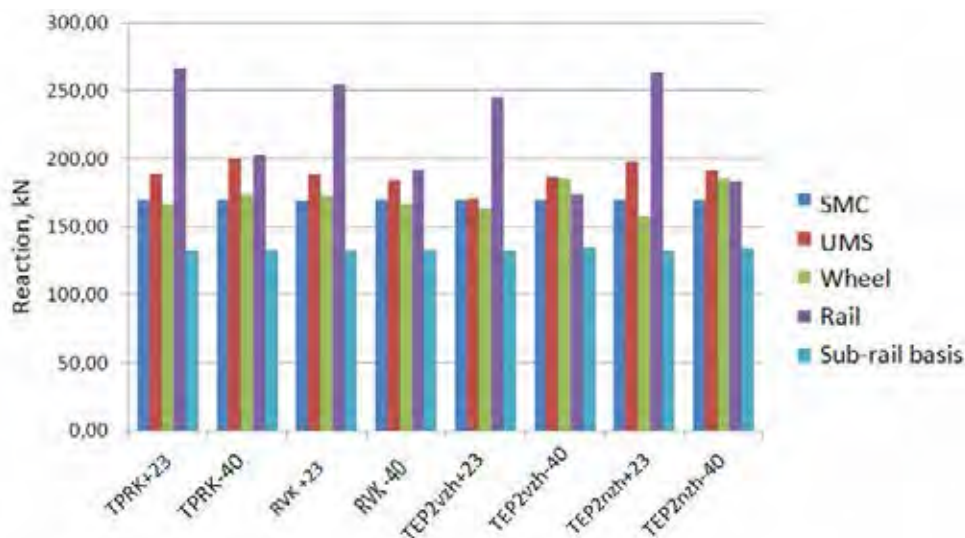
Multivariate calculations of the developed mathematical model were conducted determining the reaction forces (constraint reactions) and deviations following the changes in stiffness and internal friction parameters of one of the system elements located between the rail and the rail supporting elements.

Results and discussion

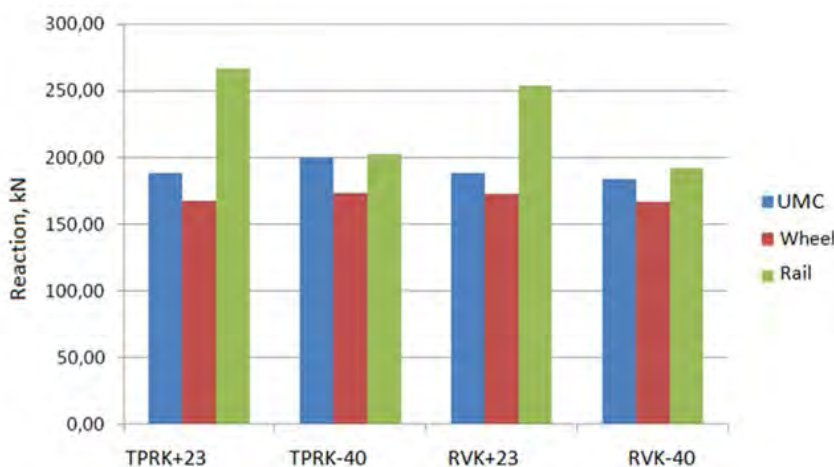
The analysis of the distribution of constraint reactions, equivalent by the module to the reaction forces, of a multi-mass wagon–track system during wheel rolling by a rail revealed that a change in the elastic-hysteresis parameters of a rail damping element depending on the type of material used has a slight effect on the sprung part of the wagon and the rail supporting basis (Pic. 5).

Further, the following abbreviations are assumed for Pics. 5–13: SMC – sprung mass of the railcar (railway wagon), UMC – unsprung mass of the wagon, «+23» – temperature +23°C; «-40» – temperature -40°C, sub-rail basis – rail supporting system.

The increase of dynamic stiffness of rail damping element of rubber compounds at -40°C (Pic. 6) compared with the stiffness at +23°C temperature results in decrease of reaction force of the rail by 24 % due to its lower



Pic. 5. Distribution of constraint reaction forces within multi-mass system elements.



Pic. 6. Distribution of constraint reaction forces in case the rubber compounds are installed as rail damping elements.

deflection. At the same time, the reaction forces in the rest of the system elements (wheel, unsprung mass of the wagon, foundation supporting the rail) vary inconsiderably. Application of rubber-fiber compound at sub-zero temperatures in comparison with the rubber one is most expedient, since it reduces the load on the unsprung mass of the wagon by 8 %, and on the foundation supporting the rail by 1,37 times.

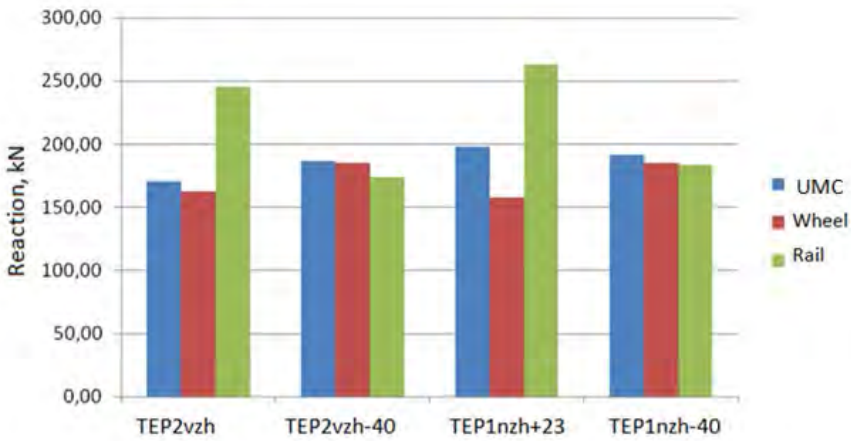
In the case of using thermoplastic elastomers under study as rail damping elements at -40°C temperature compared with normal temperatures (Pic. 7), the reaction force on the rail decreases by 30 %; and that on the wheel increases by 14–17 %. Therefore, when

operating under temperature range of -40°C and lower, the wheel load will increase by 26 kN, which will exceed by 8 % the maximum permissible axial load of 25 tf per wheel.

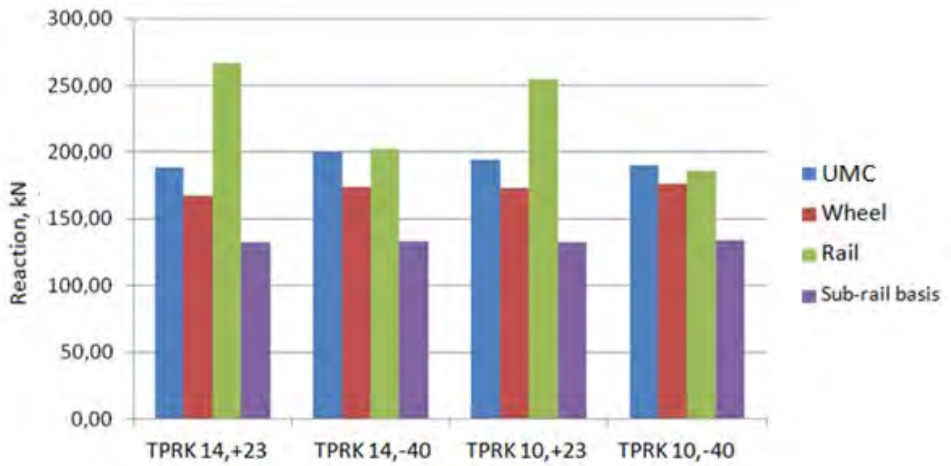
In case the rubber compounds 14 mm and 10 mm thick are applied, the increase of stiffness of rail damping elements for stabilization of rail gauge parameters due to reducing of their thickness results in insignificant changes ($\pm 5\%$) of the reaction forces in all system elements (Pic. 8).

Analysis of the reaction forces' distribution when using 14 mm thick rail damping elements (TPRK, RVK, TEP2vzh, TEP1nzh and R9-P5 sandwich plates, Pic. 9) demonstrated that in R9–P5 sandwich plates the forces were

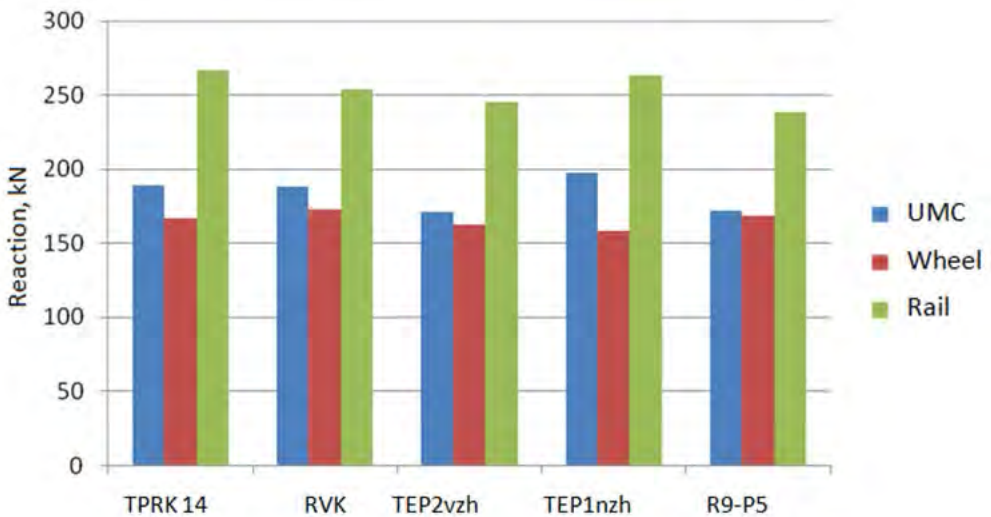




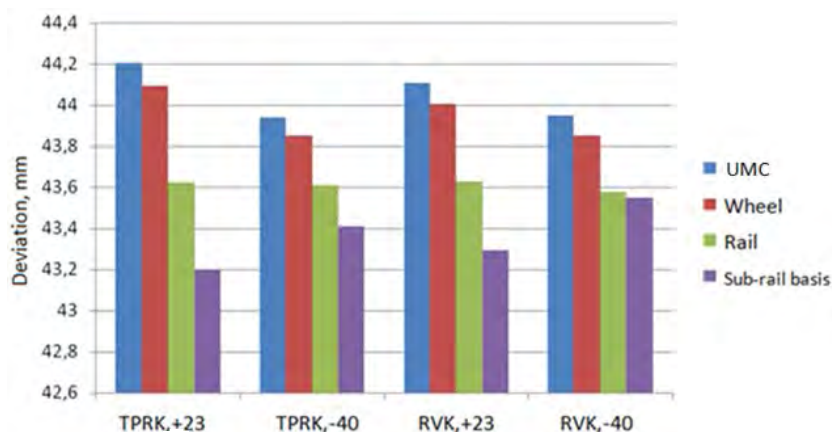
Pic. 7. Distribution of constraint reaction forces in case the thermoplastic elastomers are installed as rail damping elements.



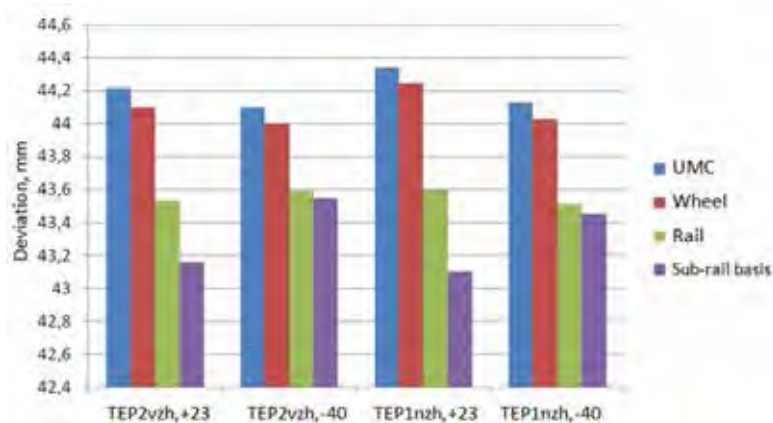
Pic. 8. Distribution of constraint reaction forces in case if rail damping elements of various thicknesses are applied.



Pic. 9. Distribution of constraint reaction forces in case if single-type rail damping elements and 14 mm thick sandwich plates are used.



Pic. 10. Distribution of deviations in case if rubber compounds are used as rail damping elements.



Pic. 11. Distribution of deviations in case if thermoplastic elastomers are used as rail damping elements.

distributed in the most optimal way. While the reaction forces of the wheel and of the unsprung part of the wagon were almost equal to or smaller than those in other variants, the reaction force of the rail was considerably less.

Analysis of deviations' distribution (displacements from the initial position) of the wagon–track multi-mass system elements demonstrated that change in the elastic-hysteresis parameters of rail damping components depending on the type of applied material has an inconsiderable impact on the sprung part of the wagon.

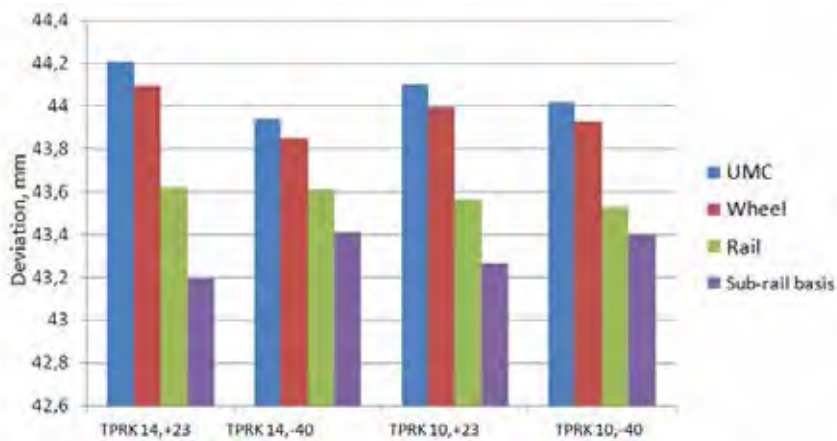
As the stiffness of rubber compounds increases at a temperature of -40°C, and, hence, the damping properties decrease, the wheel deviations are reduced (when using TPRK by 0,24 mm; with RVK by 0,15 mm), and the deviations of the unsprung part of the wagon are also reduced (with TPRK by 0,27 mm; with RVK by 0,16 mm), while rail

deviations experience only slight changes (Pic. 10). However, the deviations in the rail supporting system increase (with TPRK by 0,21 mm; with RVK by 0,25 mm).

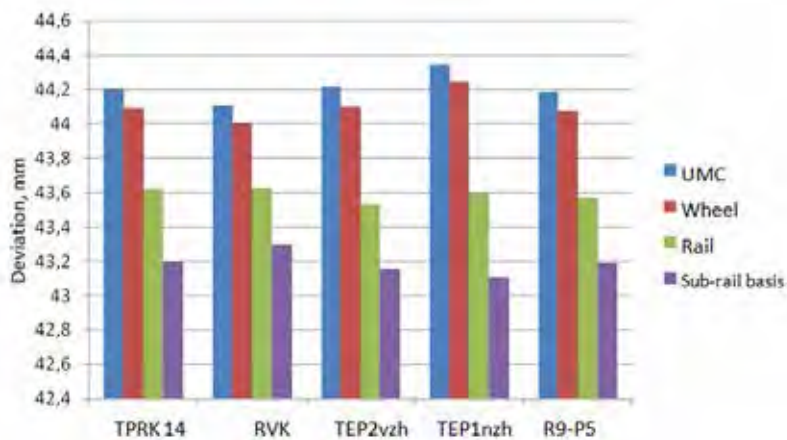
In the case of using thermoplastic elastomers with stiffness increase at a temperature of -40°C compared with normal temperature, wheel deviations decrease (when using TEP2vzh by 0,1 mm; with TEP1nzh by 0,21 mm), deviations of the unsprung part of the wagon also decrease (with TEP2vzh by 0,12 mm; with TEP1nzh by 0,21 mm), while deviations of the rail supporting foundation increase (with TEP2vzh by 0,39 mm; with TEP1nzh by 0,34 mm) (Pic. 11).

It is important to mention, that the level of deviations of the wheel and of the unsprung part of the wagon is 1,6 times higher in case if thermoplastic elastomers are used compared with the rubber compounds, that can be explained by the significant increase of stiffness





Pic. 12. Distribution of deviations in case if various thickness of rail damping elements is used.



Pic. 13. Distribution of deviations in case if single-type rail damping elements and 14 mm thick sandwich plates are used.

of these materials due to work within the brittle temperature range.

An increase in stiffness of rubber rail damping components due to reduction of their thickness results in a slight decrease in the deviations of the wheel and the unsprung part of the wagon at a positive temperature (0,1 mm) and in a slight increase at a negative temperature (Pic. 12). As the stiffness increases, the rail deviations decrease, whereas the deviations of rail supporting basis increase at a positive temperature, and practically do not change at a negative temperature thanks to the beginning of the compound crystallization process, which has a predominant influence.

In the case sandwich plate R9-P5 is used (9 mm RVK; 5 mm TEP1nzh), it is observed that the deviations of the wheel and of the unsprung part of the wagon decrease to a level characteristic of the rubber compound. At the

same time the deviations of the rail and rail supporting basis decrease by 0,2 mm compared to deviations of RVK dominant component (Pic. 13).

Conclusions

1. The developed calculation model of multi-mass vibratory (wagon–track) system makes it possible to determine with high accuracy and minimum expenses the reaction forces and deviations in the system elements depending on the change of elastic-hysteresis properties of rail damping elements made of various materials, variously designed, and used at different operating temperatures.

2. It is observed that with the increase of rail damping elements' stiffness associated with structural peculiarities, material type and operating temperature, the reaction force of the rail decreases, whereas the reaction force on the wheel and the unsprung mass of the wagon on the

contrary increases. That may constitute an important cause of their early wear and destruction.

3. It is more expedient to apply rubber-fiber compound at low temperatures instead of the rubber compound, since it reduces the load on the unsprung mass of the wagon by 8 %, and the load on rail supporting system by 1,37 times.

4. The application of thermoplastic elastomers as rail damping elements at a temperature of -40°C results in considerable increase of the reaction force acting on the wheel, exceeding by 8 % maximum permissible axial load per one wheel.

5. Deviations of the wheel and of the unsprung part of the wagon when using thermoplastic elastomers as rail damping elements at a temperature of -40°C are 1,6 times higher as compared with the case of the use of rubber compounds; it is explained through considerable stiffness increase of thermoplastic elastomers due to operation within brittle temperatures range.

6. If rubber compounds 14 mm and 10 mm thick are used, the reduction of their thickness in search for an increase in the stiffness of rail damping elements for rail track stabilization will result in inconsiderable changes of the reaction forces and deviations of all system elements.

7. Optimal distribution of the reaction forces and deviations in overall system is achieved by the application of sandwich plates combining various types of components, which in a certain proportion have positive effect on each other. Thereby, the multi-mass vibratory system becomes more balanced, which results in enhancement of the dynamic processes, travel smoothness, reduced risks of resonance phenomena, and the rolling stock stability against derailment.

These conclusions are considered to be quite universal if applied to various types of the rolling stock and infrastructure; however, the appropriate experimental studies of the parameters are required to confirm the suggested conclusions.

REFERENCES

1. Verigo, M. F., Petrov, G. I., Husidov, V. V. Simulation modelling of rolling stock and track interacting forces [Imitatsionnoe modelirovanie sil vzaimodeistviya ekipazha i puti]. *Bulletin of OSJD* [Organisation for Co-Operation between Railways], Warsaw, 1995, Iss. 6, pp. 3–8.

2. Zakharov, S. M., Pogorelov, D. Y., Simonov, V. A. Analysis of influence of rolling stock and track parameters on indices determining wear rate at wheel–rail system (based on complete factorial experiment) [*Analiz vliyaniya parametrov ekipazhey i puti na intensivnost' iznosa v sisteme koleso–rel's (na osnove polnogo faktornogo eksperimenta)*]. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 2010, Iss. 2, pp. 31–35.

3. Husidov, V. D., Zaslavskiy, L. V. Modelling of reactions in dynamic systems with clearances in interconnections [*Modelirovanie reaktsiy v dinamicheskikh sistemakh s zazorami v soedineniyakh*]. Abstracts of the report at the 9th International conference «Problems of railway transport mechanization: dynamics, reliability and safety of rolling stock», Dnepropetrovsk, 29–31 May, 1996, P. 138.

4. Yesaulov, V. P., Sladkowski, A. V., Tokarev, V. V. Mathematical model for the track and wheel set interaction, and other issues related to computer-aided designing of equipment for their production and maintenance [*Matematicheskaya model vzaimodeistviya rel'sovoy kolei i kolyosnoy pary i nekotorye voprosy avtomatizirovannogo proektirovaniya oborudovaniya dlia ikh proizvodstva i remonta*]. Abstracts of All-Union scientific conference, Voronezh, 1991, P. 103.

5. Sun, Y. Q., Simson, S. Wagon–track modeling and parametric study on rail corrugation initiation due to wheel stick-slip process on curved track. *Wear*, 2008, Vol. 265, pp. 1193–1201. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.043.

6. Croft, B. E., Jones, C. J. C., Thompson, D. J. Modelling the effect of rail dampers on wheel–rail interaction forces and rail roughness growth rates. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, Vol. 323, Iss. 1–2, pp. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.12.013>.

7. Chen, G. X., Zhou, Z. R., Ouyang, H. [et al]. A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset–track system. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, Vol. 329, Iss. 22, pp. 4643–4655. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.01.016.

8. Caiyou Zhao, Ping Wang, Xi Sheng, Duo Meng. Theoretical simulation and experimental investigation of a rail damper to minimize short-pitch rail corrugation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, pp. 1–14. Article ID2359404. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2359404>.

9. Yan-qi Liu, Yan Zhang, Chun-Fang Song, Huangsen Gu, Longlong Xu. Excitation frequency, fastener stiffness and damping, and speed of the moving harmonic load on the dynamic response of the track structure. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, Vol. 33, Iss. 1, pp. 11–19. DOI: 10.1007/s12206-018-1202-9.

10. Vershinskiy, S. V., Danilov, V. N., Husidov, V. D. Wagon dynamics [*Dynamika vagona*]. Moscow, Transport publ., 1991, 360 p.

11. Danilov, V. N., Husidov, V. D., Filippov, V. N. Procedure of defining and solving the problem of spatial vibration of four-wheel bogie [*Postanovka i metod resheniya zadachi prostranstvennykh kolebaniy dvukhosnoy telezhki*]. *Transactions of Moscow State University of Railway Engineering*, 1971, Iss. 368, pp. 30–44.

12. Kurzina, E. G., Kolmakov, A. G., Aksenov, Yu. N., Kurzina, A. M., Bogachev, A. Yu., Semak, A. V. Comparison of the composite materials intended for damping elements for the infrastructure of rail transport and rolling stock. *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2019, Iss. 4, pp. 448–452. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029519040232>. ●

Acknowledgments

The authors express their gratitude for the scientific support of the work to Viktor N. Filippov, D.Sc. (Eng), head of the Department of Railway Wagons and Wagon Facilities of Russian University of Transport.





Взаимодействие столбчатых фундаментов с мёрзлым грунтом



Александр МАРАСАНОВ



Александр ШЕЙКИН



Иван АЛФЕРОВ

Марасанов Александр Игоревич — Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Шейкин Александр Александрович — Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Алферов Иван Валерьевич — Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

Известно, что напряжённо-деформированное состояние мёрзлых грунтов изменяется во времени вследствие протекающих в них реологических процессов [1; 2]. Указанные процессы активизируются в период оттаивания деятельного слоя грунта, что приводит к увеличению осадки фундаментов искусственных сооружений. Вследствие этого учёт процессов ползучести и оттаивания мёрзлых грунтов является важной задачей при проектировании транспортных конструкций в районах Крайнего Севера и Сибири.

Целью исследования является развитие методики оценки изменения во времени напряжённо-деформированного состояния в мёрзлом грунте под подошвой столба фундамента мостовой опоры с учётом ползучести и оттаивания мёрзлого грунта.

Моделируется и исследуется взаимодействие столбчатых фундаментов мостовых опор с пылеватым глинистым мёрзлым грунтом. Исследование проводится на примере реально существующего путепровода через автодорогу М-56 «Лена», находящегося на перегоне Амга–Самырьдах железнодорожного участка Томмот–Якутск железнодорожной линии Беркажит–Томмот–Якутск и имеющего опоры с фундаментами

столбчатого типа. Указанная железнодорожная линия расположена в районе твердомёрзлых грунтов.

Исследуется изменение с течением времени главных сжимающих нормальных напряжений, а также перемещений в мёрзлом грунте под подошвой столба. Отрезок времени, в течение которого исследуется поведение вышеописанной системы, ограничен пятью месяцами. Рассматриваются два расчётных варианта: а) с учётом оттаивания мёрзлого грунта на различные величины (от 1,5 м до 4 м); б) без учёта оттаивания мёрзлого грунта.

Показано, что оттаивание мёрзлого грунта даже на сравнительно небольшую величину от уровня природного рельефа приводит к существенному увеличению значений осадки столбчатого фундамента по сравнению с расчётным вариантом, когда оттаивание отсутствует (в 2÷2,5 раза). Вместе с тем установлено, что небольшие величины оттаивания оказывают малозаметное влияние на напряжённое состояние в мёрзлом грунте под подошвой столба. Кроме того, во всех рассмотренных расчётных вариантах (с учётом и без учёта оттаивания) зафиксировано снижение напряжений в мёрзлом грунте под подошвой столба с течением времени (релаксация напряжений).

Ключевые слова: транспортное строительство, напряжённо-деформированное состояние мёрзлого грунта, реологические процессы, ползучесть, оттаивание, мостовая опора, осадка фундамента столбчатого типа, модель грунтовой толщи, модуль деформации.

*Информация об авторах:

Марасанов Александр Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики Российского университета транспорта, Москва, Россия, marasanovai@yandex.ru.

Шейкин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры мостов и тоннелей Российского университета транспорта, Москва, Россия, a.sheikin@yandex.ru

Алферов Иван Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики Российского университета транспорта, Москва, Россия, ialferov@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 07.02.2019, принята к публикации 17.09.2019.

For the English text of the article please see p. 105.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что напряжённо-деформированное состояние мёрзлых грунтов изменяется во времени вследствие протекающих в них реологических процессов [1; 2]. Указанные процессы активизируются в период оттаивания деятельного слоя грунта, что приводит к увеличению осадки фундаментов искусственных сооружений. Вследствие этого учёт процессов ползучести и оттаивания мёрзлых грунтов является важной задачей при проектировании транспортных конструкций в районах Крайнего Севера и Сибири.

Отметим, что исследование особенностей поведения мёрзлых грунтов при их ползучести проводится в работах [3–5].

Так, в работе [3] исследуется линейная корреляция между логарифмом скорости ползучести и логарифмом времени, проходящего до достижения минимума скорости ползучести в грунте, льде и мёрзлом грунте.

В [4] рассматриваются повреждения в мёрзлом грунте в процессе ползучести и выводится соотношение для оценки степени повреждённости грунта при различном содержании в нём льда.

В [5] предлагается реологическая модель мёрзлого грунта, объединяющая модели Максвелла, Кельвина и Бингама.

Исследованию поведения мёрзлых грунтов при их оттаивании посвящены работы [6–8]. В статье [6] экспериментальным путём выявлены основные факторы, определяющие протекание осадок оттаивающих грунтов заданного района. В [7] проведено экспериментальное исследование влияния циклов заморозания и оттаивания на основные механические характеристики грунтов различных типов. В [8] на основе аналитического решения задачи о нестационарной теплопроводности в многослойной среде предлагается метод расчёта глубины оттаивания многолетне-мёрзлых грунтов в основании многослойных покрытий.

Различные аспекты использования метода конечных элементов для анализа мёрзлых грунтов рассмотрены в работах [9; 10].

Данная работа ставит своей целью оценку изменения на протяжении заданного отрезка времени напряжений и деформаций в мёрзлом грунте, находящимся под

фундаментом мостовой опоры, с учётом его вязкоупругих свойств и изменения температуры.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ОБОСНОВАНИЕ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ

Для исследования взаимодействия столбчатых фундаментов мостовых опор и грунта были приняты за основу данные по промежуточной опоре № 2 путепровода через автодорогу М-56 «Лена» на ПК4819+25, находящегося на перегоне Амга–Самырдах железнодорожного участка Томмот–Якутск железнодорожной линии Беркоkit–Томмот–Якутск. Вместе с тем не ставилась цель скрупулёзного следования исходным данным, привязанным к конкретному объекту, поскольку эти данные (в особенности данные геологии) могут существенно меняться при переходе от одного объекта к другому.

Рассматриваемая железобетонная опора имеет фундамент столбчатого типа. Шесть железобетонных сборных столбов ($\varnothing 0,8$ м, $l \approx 15$ м) объединены высоким монолитным ростверком (толщина железобетонной плиты – 1,65 м). Расстояние от подошвы ростверка до поверхности насыпного щебенистого грунта – 26 см. Расположение столбов в плане показано на рис. 1 (размеры – в метрах).

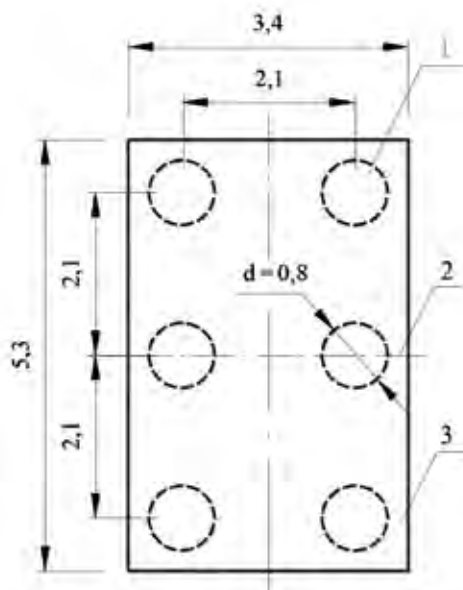


Рис. 1. Расположение ростверка и столбов опоры № 2: 1 – столб, 2 – ось моста, 3 – ростверк.



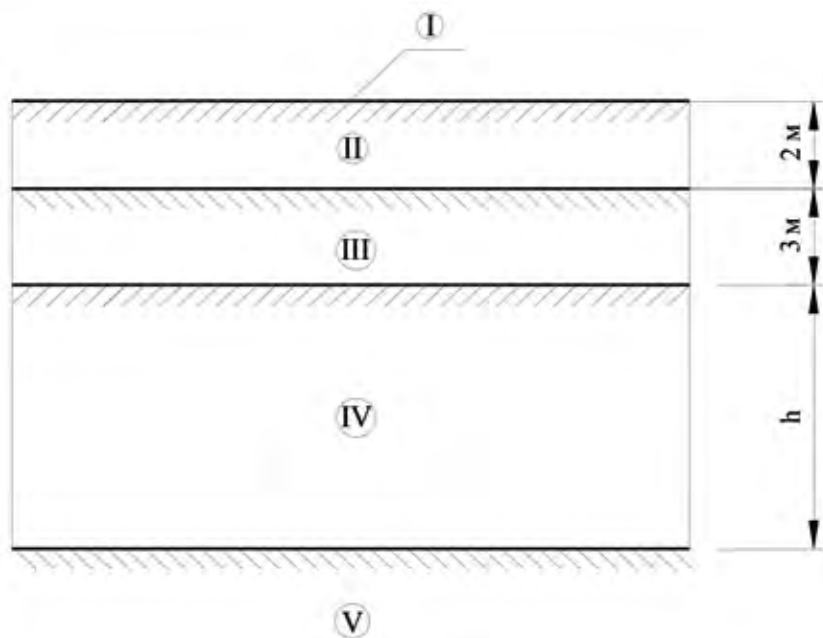


Рис. 2. Модель грунтовой толщи (I – рельеф, II – насыпной щебёнистый твердомёрзлый грунт с супесью до 30 %, при оттаивании супесь текучая, III – твердомёрзлый песок средней плотности и средней крупности, при оттаивании насыщенный водой, IV – слои твердомёрзлых супесей и суглинков, при оттаивании текучих, V – несжимаемый слой).

На основе имеющихся данных примем модель грунтовой толщи, представленную на рис. 2.

Будем предполагать, что слои твердомёрзлых пылеватых глинистых грунтов (супесей и суглинков) распространяются на достаточно большую глубину – от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Указанное предположение обосновано тем, что рассматриваемый объект находится в районе между Томом и Якутском, где мощность вечномёрзлых толщ составляет от 120 м до 250 м [1].

Будем считать, что ниже слоёв пылеватых глинистых грунтов расположен несжимаемый слой грунта.

Поскольку твердомёрзлые грунты являются малосжимаемыми с модулем деформации E , изменяющимся в диапазоне от 300 МПа до 30000 МПа [1], что в десятки и сотни раз больше модулей деформации грунтов в немёрзлом состоянии, то при анализе напряжённо-деформированного состояния столбчатого фундамента при взаимодействии его с грунтом целесообразно ограничиться рассмотрением поведения одного столба.

Тогда можно использовать следующую расчётную схему (рис. 3). Здесь римскими цифрами обозначены слои грунта, указанные на рис. 2.

Будем базироваться на предположении, применяемом при расчёте висячих свай [11], согласно которому считается, что при нагружении столба вокруг него образуется напряжённый массив грунта, ограниченный с боков усечённым конусом или пирамидой, а снизу – выпуклой криволинейной поверхностью (рис. 4).

В расчётах давление в плоскости подошвы столба принимают равномерно распределённым (F_0), а площадь эпюры реактивных давлений определяют в предположении, что силы трения передаются на плоскость подошвы столба под углом:

$$\alpha = \varphi_0/4, \quad (1)$$

где φ_0 – осреднённое значение угла внутреннего трения.

Следовательно, можно считать, что толщина грунтового массива в расчётной схеме на рис. 3 (горизонтальный размер, перпендикулярный плоскости модели) на участке между поверхностью рельефа и подошвой столба меняется по закону:

$$\delta(z) = d + 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

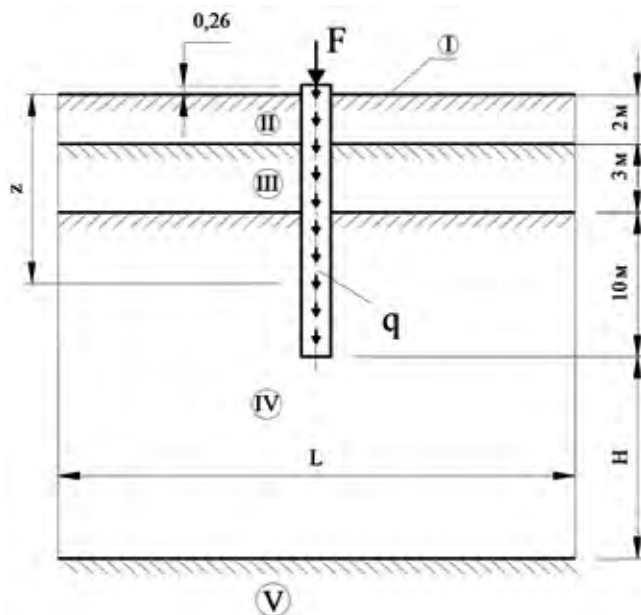


Рис. 3. Расчётная модель взаимодействия столба с грунтовой толщей: H – мощность слоя IV под подошвой столба ($H = h - 10$ м); L – ширина грунтового массива, учитываемая в модели; t – погонный нормативный собственный вес столба; F – усилие от собственного веса вышележащих конструкций путепровода, передаваемое на столб.

где z – расстояние от поверхности земли до слоя грунта, толщина которого определяется;

d – диаметр столба.

Ниже подошвы столба толщина грунтового массива принимается равной:

$$\delta = d + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3)$$

Здесь $l \approx 15$ м – глубина погружения столба.

Важным при расчёте оснований и фундаментов на мёрзлых грунтах является правильная оценка температуры мёрзлых грунтов. В паспорте путепровода приведено нормативное значение среднегодовой температуры многолетне-мёрзлых грунтов $t^{\circ}\text{C} = -1,7^{\circ}\text{C}$ (среднегодовая температура на глубине 10 м). Вместе с тем, с увеличением глубины, в соответствии с данными исследований, наблюдается постепенное повышение температуры мёрзлой толщи до значений, близких к 0°C [1]. В предложенной расчётной схеме наиболее важной является температура слоёв грунта, расположенных ниже подошвы столба. В соответствии с этим примем температуру мёрзлых грунтов $\theta^{\circ}\text{C} = -0,2^{\circ}\text{C}$ (отметим, что согласно таблице 2 приложения 1 [12] температура начала замерзания грунта для неза-

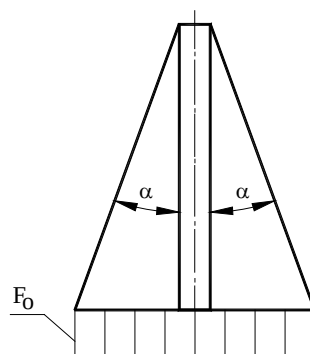


Рис. 4. Схема передачи нагрузки на плоскость нижнего конца столба.

солённых супесей равна $T_{\text{bf}} = -0,1^{\circ}\text{C}$, для незасолённых суглинков $T_{\text{bf}} = -0,2^{\circ}\text{C}$).

Другим важным вопросом является правильное определение величины φ_0 . В работе [1] отмечается, что при температуре, близкой к 0°C , угол внутреннего трения мёрзлых грунтов практически равен углу внутреннего трения грунтов не-мёрзлых. Приблизённо можно принять значение φ_0 равным углу внутреннего трения φ для пылевато-глинистых грунтов с показателем текучести $J_L = 0$ (отметим, что для твердомёрзлых пылевато-глинистых грун-

Характеристики путепровода

Название	Объёмный вес, кН/м ³	Погонный вес, кН/м	Вес одной штуки, кН	Объём, м ³	Длина, м	Общее число	Вес, кН
Рельсы	—	1,275	—	—	22,09	—	28,2
Шпалы деревянные	—	—	0,69	—	—	67	46,2
Балласт	17,66	—	—	30,41	—	—	537,0
Металл пр. строения	—	24,45	—	—	13,8	—	337,4
Ж.б. пр. строение	24,525	—	—	18,1	—	—	443,9
Тротуарные плиты, блоки перекрытия и блоки убежищ	24,525	—	—	1,47	—	—	36,0
Тротуарные консоли, перила и желоба (металл)	—	—	—	—	—	—	35,5
Монолитный ростверк	24,525	—	—	30	—	—	735,8
Сборные блоки тела опоры	24,525	—	—	17,415	—	—	427,1
Монолитный бетон заполнения	24,525	—	—	10,1	—	—	247,7
Монолитная насадка	24,525	—	—	12,2	—	—	299,2

тов $J_L < 0$). По данным паспорта на путе-провод, коэффициент пористости для твердомёрзлых супесей и суглинков меняется в диапазоне $0,47 \div 2,78$. Примем его равным 1,0. Тогда на основании данных таблицы 2 приложения 1 [13] примем $\varphi_0 \approx 20^\circ$. Следует отметить, что при увеличении коэффициента пористости угол внутреннего трения φ_0 убывает, что ведёт к снижению несущей способности столба.

Будем также считать значения модуля деформации E и коэффициента Пуассона μ одинаковыми для всех слоёв грунта. Определим E по формуле [1], применяемой для мёрзлых пылеватых глинистых грунтов:

$$E = \gamma + \beta \cdot |\theta|, \quad (4)$$

где $\theta = -0,2^\circ\text{C}$; $\gamma = 392,4 \text{ МПа}$; $\beta = 1373,4 \text{ МПа}$ (при величине сжимающего напряжения $\sigma \approx 0,2 \text{ МПа}$). Тогда $E = 667,08 \text{ МПа}$.

Согласно опытным данным [1], значение коэффициента Пуассона μ для мёрзлых пылеватых глинистых грунтов изменяется в диапазоне $0,13 \div 0,35$. Примем $\mu = 0,3$.

Для того чтобы учесть процессы ползучести, протекающие в мёрзлых пылеватых глинистых грунтах, используем соотношение, связывающее относительную осевую деформацию ε и нормальное напряжение σ , представленную в [14]:

$$\varepsilon(t) = [(\sigma \cdot t^k)/\xi]^m, \quad (5)$$

где

$$\xi = \omega \cdot (|\theta| + 1)^k. \quad (6)$$

Здесь t — время. Для мёрзлой супеси согласно [14] можно принять:

$$\lambda = 0,1; m = 3,704; \omega = 9; k = 0,89.$$

Тогда при $\theta = -0,2^\circ\text{C}$ имеем $\xi = 10,59 \text{ (кг/см}^2) \cdot \text{час}^{0,1} = 0,7557 \text{ МПа} \cdot \text{сутки}^{0,1}$.

Сбор нормативной нагрузки, передаваемой от собственного веса путепровода, представлен в таблице 1.

Если суммировать значения, представленные в последнем столбце таблицы 1, то получим $Q = 3174 \text{ кН}$ (нормативный вес, передаваемый на ростверк опоры № 2 с учётом веса ростверка).

Найдём силу F (рис. 3), передаваемую на один столб. Для этого решим следующую пространственную задачу. На рис. 5 показана конечно-элементная простран-



Рис. 5. Пространственная модель столбчатого фундамента.

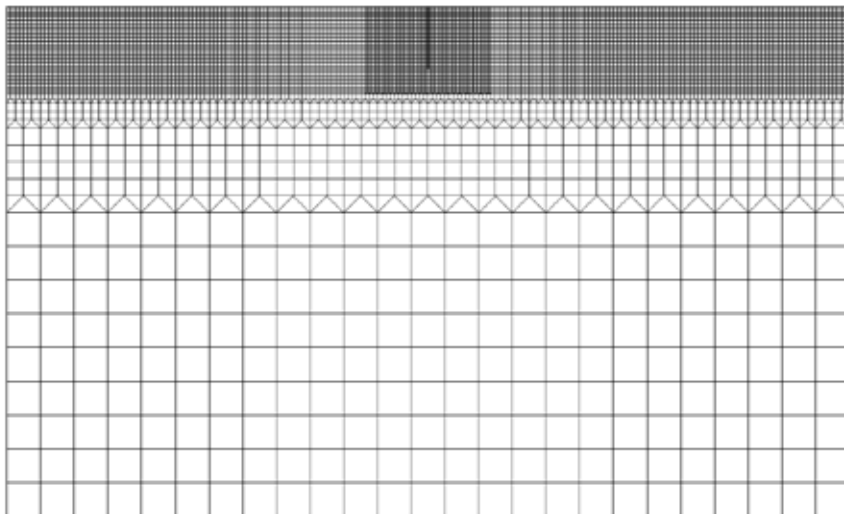


Рис. 6. Модель МКЭ взаимодействия столба и грунтовой толщи.

ственная модель столбчатого фундамента (в работе использовался программный комплекс MSC NASTRAN). Столбы по подошвам имеют жёсткие заделки. Поверх столбы жёстко объединены плитой ростверка. Плита ростверка нагружена равномерно распределённой нагрузкой $q_0 = Q/A = 3174 \text{ кН}/18,02 \text{ м}^2 = 176,1 \text{ кН/м}^2$. Здесь $A = 5,3 \text{ м} \cdot 3,4 \text{ м} = 18,02 \text{ м}^2$ — площадь горизонтальной поверхности плиты ростверка. В результате расчёта получено, что наиболее нагруженными являются столбы, находящиеся в среднем ряду. На каждый из них передаётся усилие 546,4 кН, в то время как усилие, воспринимаемое каждым из крайних столбов, равно 520,1 кН. Таким образом, $F = 546,4 \text{ кН}$.

Определим нагрузку q (погонный собственный вес одного столба $\varnothing 0,8 \text{ м}$):

$$q = \rho \cdot V/L = 24,525 \text{ кН/м}^3 \cdot 7,5417 \text{ м}^3/15 \text{ м} = 12,33 \text{ кН/м}.$$

Здесь ρ — объёмный вес, V — объём; L — длина столба.

Исследуем, как влияют на оценку напряжённо-деформированного состояния под подошвой столба параметры расчётной схемы (рис. 3): L (ширина грунтовой толщи) и H (мощность грунтовой толщи под подошвой столба). Выполним указанное исследование с помощью модели метода конечных элементов (рис. 6).

Модель состоит из 11071 конечных элементов и 10923 узлов. В окрестности стол-

ба имеет место сгущение конечно-элементной сетки (в направлении влево и вправо от оси столба на 15 м, а также от поверхности рельефа на 20 м вглубь). За границами указанной области конечно-элементная сетка становится более редкой. Столб моделировался с помощью стержневых элементов, а грунт — с помощью плоских треугольных и четырёхугольных элементов, толщина которых на участке от поверхности рельефа до подошвы столба определялась на основе соотношения (2), а ниже подошвы столба — на основе соотношения (3). Нижний край модели имеет жёсткое защемление.

Сосредоточенная сила F и распределённая нагрузка q (рис. 3) условно не показаны. Данная модель использовалась как для расчётов в упругой стадии, так и для расчётов с учётом ползучести и оттаивания грунта. Отметим, что при расчётах с учётом оттаивания число конечных элементов и узлов уменьшалось за счёт удаления оттаявших слоёв из модели.

В таблице 2 приведены значения вертикального перемещения подошвы столба Δ и главного сжимающего нормального напряжения σ_2 в грунте под подошвой столба, полученные при $L = 200 \text{ м}$ и различных значениях H (здесь и далее σ_2 приводится по абсолютной величине). Можно видеть, что при возрастании H параметр Δ также возрастает. В то же время напряжённое



Таблица 2

Зависимость показателей напряжённо-деформированного состояния грунта под подошвой столба от параметров Н и L (см. рис. 3, 6).

Параметр L, м	Параметр Н, м	Вертикальное перемещение подошвы столба Δ , мм	Главное сжимающее напряжение σ_2 в грунте под подошвой столба, МПа
200	106	0,6142	0,03510
200	170	0,7320	0,03505
200	226	0,8250	0,03505
312	106	0,6061	0,03508
408	106	0,6050	0,03508

Таблица 3

Изменение во времени параметров Δ и σ_2

Время, сутки	Вертикальное перемещение подошвы столба Δ , мм, (главное сжимающее напряжение в грунте под подошвой столба σ_2 , МПа) при различных значениях глубины оттаивания S			
	а) S = 0	б) S = 1,5 м	в) S = 3 м	г) S = 4 м
0	0,6142 (0,0351)	0,9942 (0,0630)	1,3341 (0,0900)	1,5749 (0,1109)
30	0,6487 (0,0302)	1,2196 (0,0497)	2,0239 (0,0674)	2,8895 (0,0795)
60	0,6572 (0,0297)	1,2774 (0,0491)	2,1969 (0,0668)	3,2136 (0,0784)
90	0,6631 (0,0294)	1,3179 (0,0488)	2,3187 (0,0659)	3,4401 (0,0776)
120	0,6679 (0,0292)	1,3502 (0,0486)	2,4151 (0,0655)	3,6187 (0,0770)
150	0,6718 (0,0291)	1,3774 (0,0484)	2,4961 (0,0654)	3,7683 (0,0765)

состояние в грунте под подошвой столба меняется слабо.

В таблице 2, кроме того, представлены значения Δ и σ_2 , полученные при Н = 106 м и различных значениях L. Из приведённых данных следует, что увеличение L слабо влияет на напряжённо-деформированное состояние под подошвой столба. Примем L = 200 м; Н = 106 м. Принятое значение параметра Н можно обосновать упоминаемой выше мощностью вечномёрзлых толщ данного района (120÷250 м).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА НА ПОЛЗУЧЕСТЬ И ОТТАИВАНИЕ

Исследование изменения во времени напряжённо-деформированного состояния модели, представленной на рис. 3 и 6, было проведено на интервале времени [0; 150 суток] для следующих видов нагружения:

а) действие нормативного собственного веса части сооружения, передаваемого на столб;

б) действие нормативного собственного веса части сооружения, передаваемого на столб, плюс действие отрицательной (негативной) силы трения оттаивающего грунта по боковой поверхности столба.

При выполнении расчётов, соответствующих пункту б, значение погонной отрицательной (негативной) силы трения i -го слоя оттаивающего грунта, действующей по боковой поверхности столба, определялось в соответствии с п. 4.38 [12] по формуле:

$$f_{\text{neg}, i} = u_p \cdot f_{n, i}, \quad (7)$$

где u_p — периметр поперечного сечения столба, м;

$f_{n, i}$ — отрицательное трение i -го слоя оттаивающего грунта по боковой поверхности столба, кПа, которое допускается принимать по таблице 2 [15].

Было принято, что $u_p = \pi \cdot d = 3,14$ м, где $d = 1$ м — диаметр скважины, заполняемой цементно-песчаным раствором, в которую погружается столб.

При расчётах на оттаивание негативная сила, передаваемая на боковую поверхность столба со стороны слоя насыпного щебёнистого грунта (слой II на рис. 3) не учитывалась, а глубина оттаивания S отмерялась от уровня природного рельефа. При этом расчётная модель уточнялась следующим образом: оттаявший слой грунта заменялся соответствующей негативной силой трения $f_{\text{neg}, i}$. Удаление оттаявшего слоя влекло за собой внесение изменений в напряжённый массив грунта, образующийся вокруг столба при

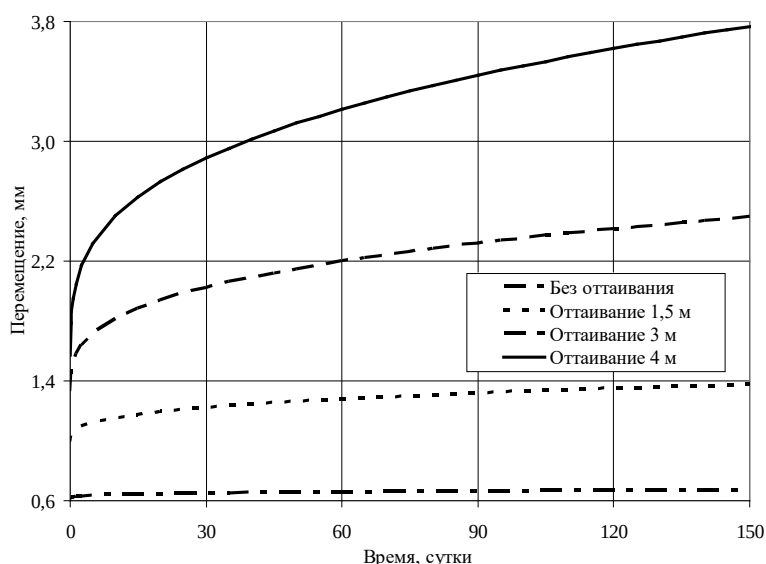


Рис. 7. Графики зависимости осадки столба от времени.

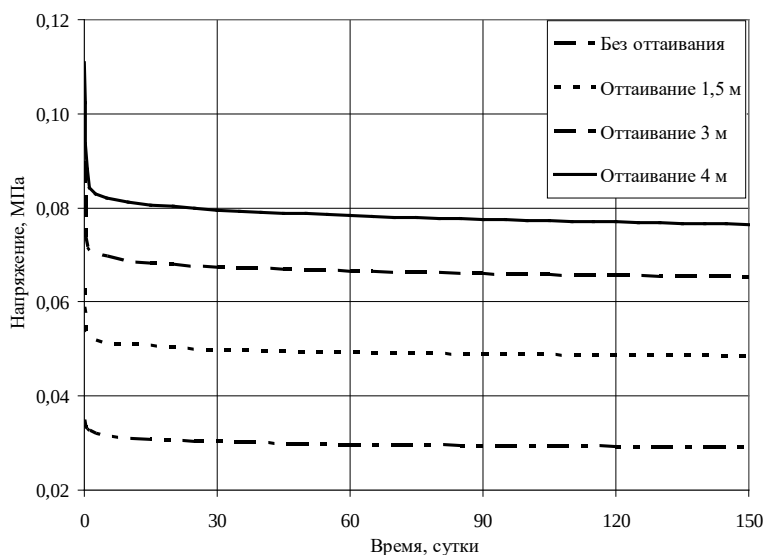


Рис. 8. Графики зависимости главного сжимающего напряжения в грунте под подошвой столба от времени.

нагрузении, а именно, указанный массив ограничивался горизонтальной плоскостью, отделяющей оттаявший грунт от мёрзлого грунта, а также горизонтальной плоскостью, проходящей через подошву столба. Расстояние z (рис. 3) при определении толщин слоёв грунта (см. (2)) также отсчитывалось от границы оттаявшего и неоттаявшего слоёв, а параметр l в соотношении (3) принимался равным $l = 15 - 2 - S$.

Были рассмотрены три варианта оттаивания:

- 1) $S = 1,5$ м;
- 2) $S = 3$ м;
- 3) $S = 4$ м.

Ниже приводится определение негативных сил трения для указанных вариантов:

1) Оттаивание слоя III (рис. 3) на $S = 1,5$ м. Для песка средней крупности и средней плотности при средней глубине оттаивания $0,75$ м по таблице 2 [15] находим $f_{n,2} \approx 35$ кПа; $f_{neg,2} = 35 \text{ кПа} \cdot 3,14 \text{ м} = 109,9 \text{ кН/м}$.

2) Оттаивание слоя III на $S = 3$ м. Средняя глубина оттаявшего слоя равна $1,5$ м.



$f_{n,2} \approx 38,5 \text{ кПа}$; $f_{\text{neg},2} = 38,5 \text{ кПа} \cdot 3,14 \text{ м} = 120,89 \text{ кН/м}$.

3) Оттаивание слоя III на 3 м плюс оттаивание слоя IV на 1 м ($S = 4 \text{ м}$). Средняя глубина оттаявшего слоя III — 2 м. $f_{n,2} \approx 42 \text{ кПа}$; $f_{\text{neg},2} = 42 \text{ кПа} \cdot 3,14 \text{ м} = 131,88 \text{ кН/м}$. Средняя глубина оттаявшего слоя IV (пылеватый глинистый грунт) — 3,5 м. $f_{n,3} \approx 5 \text{ кПа}$; $f_{\text{neg},3} = 5 \text{ кПа} \cdot 3,14 \text{ м} = 15,70 \text{ кН/м}$.

Изменение во времени напряжённо-деформированного состояния под подошвой столба, вызванное ползучестью грунта, исследовалось для четырёх расчётных случаев:

- а) оттаивание отсутствует ($S = 0$);
- б) вариант оттаивания 1) (см. п. 1) при глубине оттаивания $S = 1,5 \text{ м}$;
- в) вариант оттаивания 2) при глубине оттаивания $S = 3 \text{ м}$;
- г) вариант оттаивания 3) при глубине оттаивания $S = 4 \text{ м}$.

В таблице 3 приведены значения вертикального перемещения подошвы столба Δ (осадки столба) и главного сжимающего нормального напряжения в грунте под подошвой столба σ_2 соответственно, полученные для всех расчётных случаев, сформулированных выше, в различные моменты времени, прошедшего после нагружения. Графики изменения осадки столба Δ , а также параметра σ_2 во времени представлены на рис. 7, 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из представленных результатов следует, что при отсутствии оттаивания, а также при относительно небольшой его глубине осадка столбчатого фундамента, вызванная действием нагрузки, возникающей от собственного веса путепровода, является незначительной ($\leq 1 \text{ мм}$). Кроме того, рост осадки фундамента, связанный с ползучестью грунта, на рассматриваемом интервале времени также невелик. Вместе с тем, увеличение глубины оттаивания до 3÷4 метров от уровня природного рельефа приводит к более существенной осадке (1,3÷1,6 мм). С учётом развивающейся ползучести мёрзлого грунта эта осадка может достичь через 120÷150 суток после оттаивания 2,5÷3,8 мм, т.е. возрасти примерно в 2÷2,5 раза. В то же время изменение напряжённого состояния в мёрзлом грунте при нагружении столба нагрузками F и q , не является заметным

даже при существенных значениях глубины оттаивания S ($\sigma_2 \leq 0,111 \text{ МПа}$). С течением времени главное сжимающее напряжение σ_2 убывает для всех рассмотренных расчётных случаев, то есть имеет место релаксация напряжений.

Таким образом, на основании проведённого исследования можно сделать вывод о том, что на сравнительно небольших отрезках времени (несколько месяцев), процесс оттаивания весьма значительно влияет на деформированное состояние мёрзлого грунта под подошвой фундамента и слабо влияет на его напряжённое состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович Н. А. Механика мёрзлых грунтов: Учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 1973. — 448 с.
2. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 1978. — 447 с.
3. Ting, J. M. On the nature of the minimum creep rate-time correlation for soil, ice, and frozen soil. Canadian Geotechnical Journal, 1983, Vol. 20, Iss. 1, pp. 176–182. DOI: 10.1139/t83-017.
4. Tiande Miao, Xuexia Wei, Changqing Zhang. Creep of frozen soil by damage mechanics. Science in China (Scientia Sinica) Series B, Vol. 38, Iss. 8, pp. 996–1002.
5. Songhe Wang, Jilin Qi, Zhenyu Yin, Jianming Zhang, Wei Ma. A simple rheological element based creep model for frozen soils. Cold Regions Science and Technology, 2014, Vol. 106–107, pp. 47–54. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.06.007.
6. Царапов М. Н., Котов П. И. Свойства мёрзлых грунтов при оттаивании // Путь и путевое хозяйство. — 2013. — № 9. — С. 31–34.
7. Özgan, E., Serin, S., Ertürk, S., Vural, I. Effects of freezing and thawing cycles on the engineering properties of soil. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2015, Vol. 52, Iss. 2, pp. 95–99. DOI: 10.1007/s11204-015-9312-1.
8. Иванов В. Н., Мерзляков В. П., Плотников А. А. Расчёт глубины протаивания многолетнемёрзлых грунтов в основании многослойных покрытий // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2018. — № 5. — С. 25–30.
9. Gioda, G., Gallavresi, F., Locatelli, L. A numerical and experimental study of the artificial freezing of sand. Canadian Geotechnical Journal, 1994, Vol. 31, Iss. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1139/t94-001.
10. Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., Jardine, R. J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. Géotechnique, 2009, Vol. 59, Iss. 3, pp. 159–171. DOI: 10.1680/geot.2009.59.3.159.
11. Веселов В. А. Проектирование оснований и фундаментов (Основы теории и примеры расчёта): Учеб. пособие. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1990. — 304 с.
12. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах.
13. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
14. Вялов С. С. Прочность и ползучесть мёрзлых грунтов и расчёты ледогрунтовых ограждений. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 253 с.
15. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. ●



Interaction of Post Foundations and Frozen Soils



Alexander I. MARASANOV



Alexander A. SHEIKIN



Ivan V. ALFEROV

*Marasanov, Alexander I., Russian University of Transport, Moscow, Russia.
Sheikin, Alexander A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.
Alferov, Ivan V., Russian University of Transport, Moscow, Russia*.*

ABSTRACT

The frozen soils' stress-strain state varies with time due to the internal soil rheological processes. Those processes become active within the thawing period of the active soil layer causing increase in settlement of the engineering structures' foundations. Hence, creep processes and thawing of frozen soils should be considered when designing the transportation facilities for regions of the Far North and Siberia.

The objective of the research is to develop a procedure for evaluating the variation in time of the stress-strain state of the frozen soil under the post footing of a bridge pier's foundation considering the frozen soil creep and thawing.

The interaction of the bridge pier post foundations and frozen silt-loam soil is modelled and studied. The research is based on the example of an existing overpass over the M-56 Lena motor road situated at Amga-Samyrdah stage of Tommot-Yakutsk section of the Berkakit-Tommot-Yakutsk railway line. This overpass has piers with post

foundations. The above railway line is in the area of hard frozen soils.

The study focuses on changes in principal normal compressive stresses with the course of time, as well as on the frozen soil movements under the post footing. The time allotted for the above system behavior study is limited to five months. There are two design cases: a) considering the frozen soil thawing up to a depth range of 1,5 to 4 m; b) without considering the frozen soil thawing.

The research has shown that the thawing of the frozen soil up to a comparatively low depth as compared to natural level results in a significant increase (by 2÷2,5 times) in the values of post foundation settlement as compared with the design case without thawing. At the same time, it was found that small values of thawing have a subtle effect on the frozen soil's stress state under the post footing. Besides, all reviewed design cases (with / without thawing revealed that stress of the frozen soil under the post footing decreases with time (stress relaxation).

Keywords: transport construction, frozen soil's stress-strain state, rheological processes, creep, thawing, bridge pier, post foundation settlement, earth cover model, modulus of deformation.

*Information about the authors:

Marasanov, Alexander I. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Construction Mechanics of Russian University of Transport, Moscow, Russia, marasanovai@yandex.ru.

Sheikin, Alexander A. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Bridges and Tunnels of Russian University of Transport, Moscow, Russia, a.sheikin@yandex.ru.

Alferov, Ivan V. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Construction Mechanics of Russian University of Transport, Moscow, Russia, ialferov@bk.ru.

Article received 07.02.2019, accepted 17.09.2019.

For the original Russian text of the article, please see p. 96.

Background. It is well known that the frozen soils' stress-strain state varies with time due to the internal soil rheological processes [1; 2]. Those processes start during the period of thawing of the active soil layer causing increase in settlement of the engineering structures' foundations. Hence, creep processes and thawing of frozen soils should be considered when designing the transportation facilities for regions of the Far North and Siberia.

It is worth noticing that the results of investigation of the frozen soil creep are presented in [3–5].

Thus, John M. Ting [3] examined linear correlation observed between the logarithm of the minimum creep velocity and the logarithm of the time to reach this minimum creep velocity rate in soil, ice, and frozen soil.

The authors of [4] studied the damage during creep of the frozen soil and deduced a damage evolution equation, taking the variation of ice content into consideration.

The authors of [5] propose a rheological model for frozen soils by combining Maxwell, Kelvin, and Bingham models. The papers [6–8] review the frozen soil behavior during thawing period. The article [6] experimentally identifies the major factors in determining the thawing soil settlement behavior in an area. The article [7] is dedicated to the experimental studies of the freeze-thaw cycles' effect on the main mechanics properties of different soils. The article [8] suggests a method for calculating the thaw

depth of permafrost at the foundation of multi-layer pavements based on the analytical solution for transient heat conduction in the multi-layer medium. The articles [9; 10] cover various aspects of the use of finite element method to analyze frozen soils.

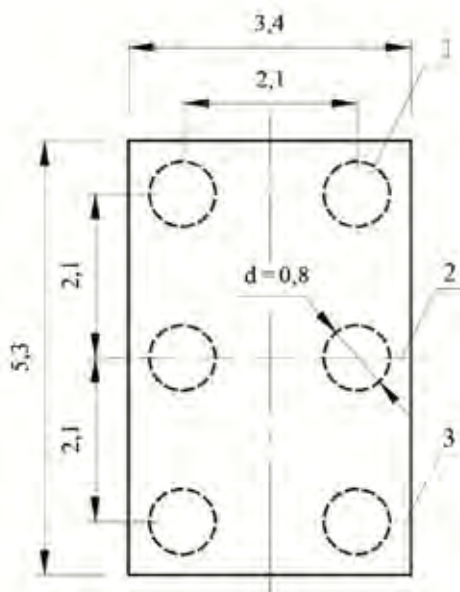
The present research has the *objective* to evaluate the changes in stresses and deformations occurring during the determined period within the frozen soil under the foundation of a bridge pier, considering its viscoelastic properties and ambient temperature fluctuations.

Results

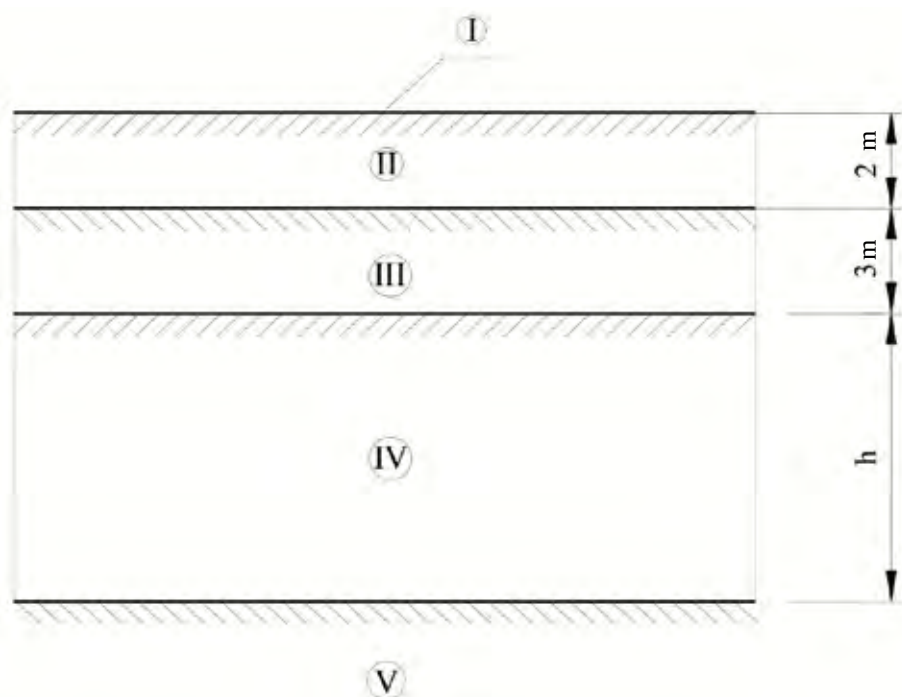
Model Description and Justification of its Parameters

For studying the interaction of the bridge piers' post foundations and the soil, the research based on the data on the pier No. 2 of the overpass over the M-56 Lena motor road at the stake (station distance) PK4819+25 at Amga–Samyrdah stage of Tommot–Yakutsk section of the Berkakit–Tommot–Yakutsk railway line. However, the purpose of scrupulously following the initial data, linked to specific site, was not intended, because those data (especially regarding geologic properties) can change significantly when studying various sites.

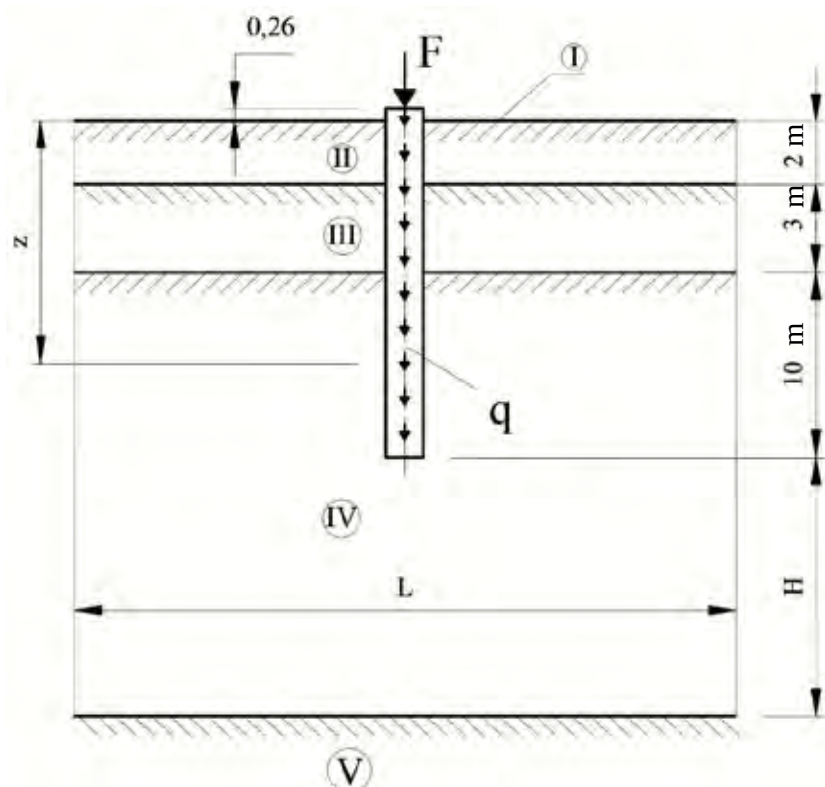
The steel reinforced concrete pier under the study has the post foundation. Six precast steel reinforced concrete posts ($\varnothing 0,8$ m, $l \approx 15$ m) are integrated by high cast-in-place grillage



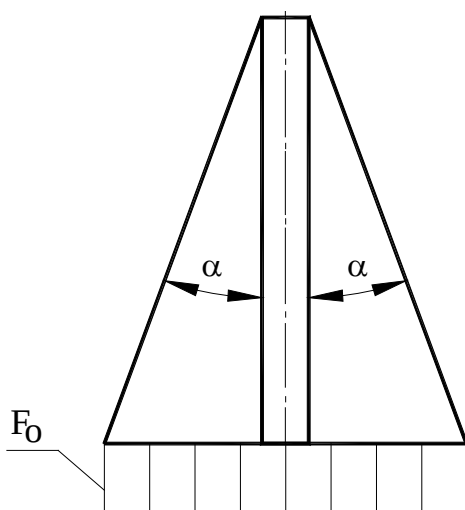
Pic. 1. Location of the grillage and posts of pier No. 2: 1 – post, 2 – bridge center line, 3 – grillage.



Pic. 2. The earth cover model (I – terrain, II – filled-up crushed stone hard-frozen soil containing up to 30 % of sandy loam, when thawing, the sandy loam is flowing, III – average-density and middle-sized hard-frozen sand, when thawing it is saturated with water, IV – hard-frozen sandy loam and clay loam strata, when thawing, they are flowing, V – incompressible stratum).



Pic. 3. Design model of the interaction of a post with the earth cover: H – depth of stratum IV under the post footing ($H = h - 10$ m); L – soil mass width considered in the model; t – linear, standard, dead weight of the post; F – force due to the dead weight of the overlying overpass structures, transmitted to the pier.



Pic. 4. Diagram of transmission of load to the plane of lower end of a post.

(reinforced-concrete slab thickness is 1,65 m). Distance from the grillage footing up to the filled-up crushed stone soil is 26 cm. The posts' location in cross-section view is shown in Pic. 1 (dimensions are shown in meters).

Based on the available data, let us adopt the earth cover model as illustrated in Pic. 2.

Let us assume that hard-frozen silt-loam strata (sandy loam and clay loam) are spread to a sufficiently large depth: from a few dozen to several hundred meters. The above assumption is substantiated by the fact that the site under review is in the area between Tommot and Yakutsk, where the permafrost stratum depth is from 120 m to 250 m [1]. Let us also assume that there is a incompressible soil stratum below silt-loam strata.

As the hard-frozen soils are near-incompressible with E deformation modulus varying within the range of 300 MPa to 30000 MPa [1], and so deformation modulus is ten and hundred times higher than the deformation moduli of the non-frozen soils, then, when analyzing the stress-strain state of the post foundation interacting with the soil, it is possible to analyze behavior of a single post only. Then the following design model can be used (Pic. 3). Here, the Roman numerals mark the soil strata shown in Pic. 2.

Let us proceed from the assumption used in the hanging pile calculation [11], which considers that when the post is subjected to loadings the stressed soil body emerges around

the post; it is limited at the sides by the conic frustum or frustum of pyramid and from below by the convex curved surface (Pic. 4).

In calculations, the pressure in the plane of a post footing is taken as evenly distributed (F_0), and the area of the reaction pressure profile is determined proceeding from the assumption that friction forces are transmitted to the post footing plane at an angle:

$$\alpha = \varphi_0/4, \quad (1)$$

where φ_0 is the averaged value of the angle of internal friction.

Hence, it can be considered that the soil body thickness in the section between the terrain surface and the post footing shown in the design diagram in Pic. 3 (lateral dimension vertical to the model plane), varies following the law:

$$\delta(z) = d + 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2),$$

where z is the distance from the ground surface to the soil layer which thickness is studied;

d is the post diameter.

The soil body thickness below the post footing is taken equal to:

$$\delta = d + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3)$$

Here $l \approx 15$ m is the post penetration depth.

The proper assessment of the frozen soil temperature is important when calculating the substructures and foundations for the frozen soils. The overpass certificate states the specified value of the average annual permafrost soils temperature as follows: $t^\circ\text{C} = -1,7^\circ\text{C}$ (average annual temperature at the depth of 10 m). However, according to the research data there is a gradual temperature increase of the frozen soil with increasing the depth of measurement up to the values closed to 0°C [1]. In the suggested design model, the temperature of the soil stratum below the post footing is the most important. Accordingly, the frozen soil temperature is taken as $\theta^\circ\text{C} = -0,2^\circ\text{C}$ (let us notice that as per Table 2 in Appendix 1 [12] the soil starting freezing temperature is equal to $T_{\text{br}} = -0,1^\circ\text{C}$ for non-saline sandy loam and $T_{\text{br}} = -0,2^\circ\text{C}$ for non-saline clay loam).

Another important issue is associated with a correct determination of the value of φ_0 . The work [1] states that at temperature close to 0°C the angle of internal friction of the frozen soil is practically equal to the angle of internal friction of the non-frozen soil. Roughly, the value φ_0 may be taken as equal to the angle of internal friction φ for silt-loam soils with yield value $J_L = 0$ (let us notice that $J_L < 0$ for hard-frozen silt-loam soils).

Table 1

Overpass properties

Description	Weight by volume, kN/m ³	Weight per unit length, kN/m	Weight of one piece, kN	Volume, m ³	Length, m	Total number	Weight, kN
Rails	—	1,275	—	—	22,09	—	28,2
Timber sleeper	—	—	0,69	—	—	67	46,2
Ballast	17,66	—	—	30,41	—	—	537,0
Metal bridge superstructures	—	24,45	—	—	13,8	—	337,4
Steel reinforced concrete bridge superstructures	24,525	—	—	18,1	—	—	443,9
Walkway slabs, floor blocks and bridge refuge blocks	24,525	—	—	1,47	—	—	36,0
Footway cantilever brackets, hand railings and gutters (metal)	—	—	—	—	—	—	35,5
Cast in-situ grillage	24,525			30			735,8
Precast pier body blocks	24,525			17,415			427,1
Cast-in-situ filling concrete	24,525			10,1			247,7
Cast-in-situ bent cap	24,525			12,2			299,2

As per the overpass certificate data, porosity ratio varies within the range of 0,47÷2,78 for hard-frozen sandy loam and clay loam. Let us consider this ratio as equal to 1,0. Then, according to the Table 2 data in Appendix 1 [13] the value of φ_0 is taken as $\varphi_0 \approx 20^\circ$. It should be noted that the angle of internal friction φ_0 decreases when the porosity factor value increases, that causes decrease of the post load carrying force.

Let us also assume that modulus of deformation E and Poisson ratio μ values are the same for all soil strata. E is determined by the following formula [1] used for the frozen silt-loam soils:

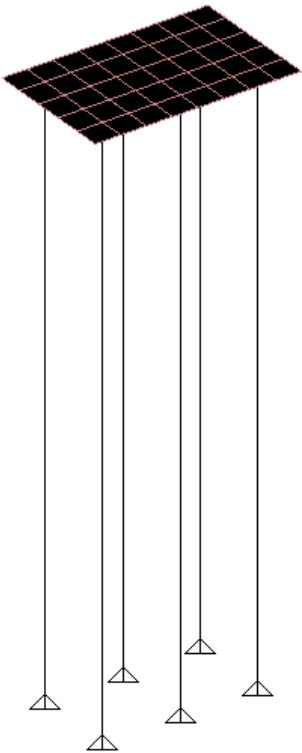
$$E = \gamma + \beta \cdot |\theta|, \tag{4}$$
where $\theta = -0,2^\circ\text{C}$; $\gamma = 392,4 \text{ MPa}$; $\beta = 1373,4 \text{ MPa}$ (when compression $\sigma \approx 0,2 \text{ MPa}$). Then, $E = 667,08 \text{ MPa}$.

According to the test data [1], the Poisson ratio μ varies within the range of 0,13÷0,35 for the frozen silt-loam soils. The value of μ is so taken as $\mu = 0,3$.

To take into consideration the creep processes in the frozen silt-loam soils, let us use a relation associating the relative axial deformation ε and normal stress σ stated in [14]:

$$\varepsilon(t) = [(\sigma \cdot t^\lambda) / \xi]^m, \tag{5}$$
where $\xi = \omega \cdot (|\theta| + 1)^k$.
$$\tag{6}$$

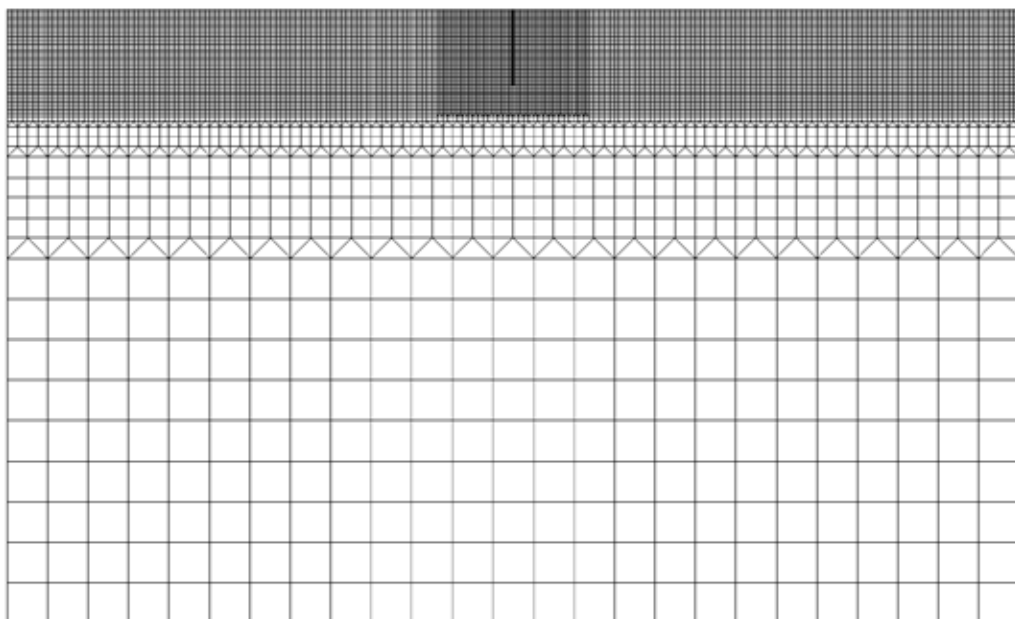
Here t means time. According to [14] for the frozen sandy loam it may be taken as follows:



Pic. 5. A spatial model of the post foundation.

$\lambda = 0,1$; $m = 3,704$; $\omega = 9$; $k = 0,89$. Then, at $\theta = -0,2^\circ\text{C}$ we shall obtain $\xi = 10,59 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \cdot \text{hour}^{0,1} = 0,7557 \text{ MPa} \cdot \text{day}^{0,1}$. Summary of the specified load from the overpass dead weight is stated in Table 1.





Pic. 6. Finite element model illustrating the interaction of the post and the earth cover.

Table 2

Dependency of the stress-strain behavior factors of the soil under the post footing on H and L parameters (see Pics. 3, 6).

Parameter L, m	Parameter H, m	Post footing vertical movement Δ , mm	Principal compressive stress σ_2 of the soil under the post footing, MPa
200	106	0,6142	0,03510
200	170	0,7320	0,03505
200	226	0,8250	0,03505
312	106	0,6061	0,03508
408	106	0,6050	0,03508

When summing up the last column values stated in Table 1, we get $Q = 3174$ kN (specified weight transferred to the grillage of the pier No. 2 considering the grillage weight).

Let us find force F (Pic. 3) transmitted to a post. To do this, it is necessary to solve a spatial problem. Pic. 5 shows a spatial finite element model of the post foundation (the MSC NASTRAN software was used). The post footings are fixed-ended. On the top the posts are rigidly joined by a grillage slab. The grillage slab is uniformly loaded: $q_0 = Q/A = 3174 \text{ kN}/18,02 \text{ m}^2 = 176,1 \text{ kN/m}^2$. Here $A = 5,3 \text{ m} \cdot 3,4 \text{ m} = 18,02 \text{ m}^2$ is the horizontal surface area of the grillage slab. As a result of the calculation, the most loaded posts are in the middle row. The force of 546,4 kN is transmitted to each of them, while the force applied to each of the outer posts is of 520,1 kN. Thus, $F = 546,4$ kN.

Load q (dead weight per meter of a post of $\varnothing 0,8$ m) is determined as follows:

$q = \rho \cdot V/L = 24,525 \text{ kN/m}^3 \cdot 7,5417 \text{ m}^3/15 \text{ m} = 12,33 \text{ kN/m}$, where ρ is the weight by volume; V is the volume; L is the post length.

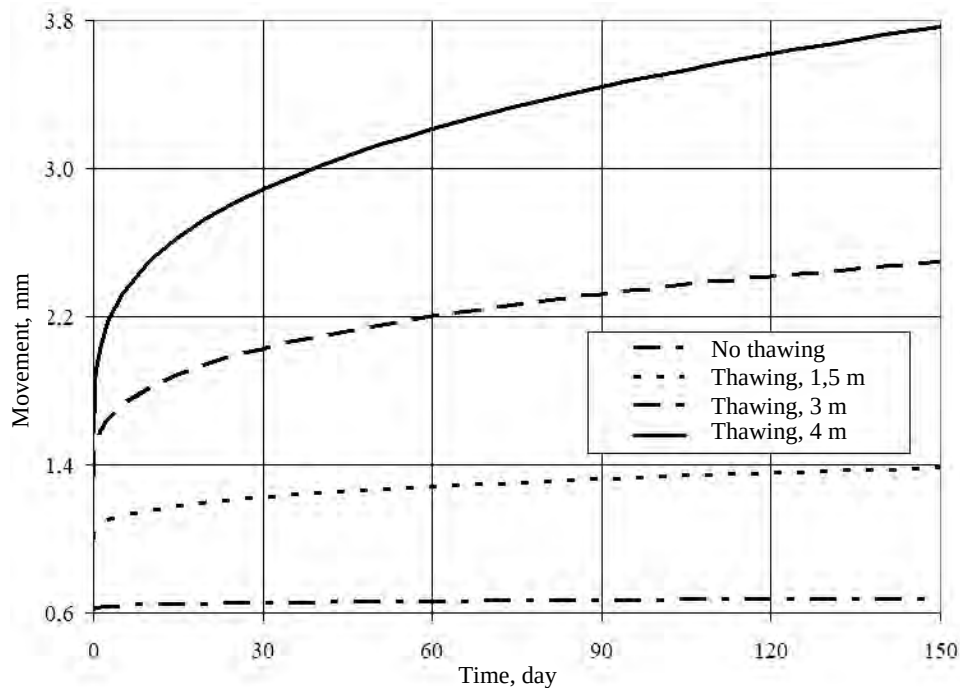
Let us analyze the effect of the design parameters on the assessment of the stress-strain behavior under the post footing (Pic. 3): L (earth cover width) and H (depth of the earth cover under the post footing). Let us analyze it using the finite element model (Pic. 6).

The model consists of 11071 finite elements and 10923 nodes. Near the post there is the finite element mesh clustering (15 m left and right from the post axis and 20 m deep from the terrain surface). Beyond this area the finite element mesh becomes rarer. The post is simulated with rod-type elements, the soil is simulated using the plane triangular and quadrilateral elements,

Table 3

Variation in time of parameters Δ and σ_2

Time, day	The post footing vertical movement Δ , mm (the principal compressive stress σ_2 of the soil under the post footing, MPa) at various values of thaw penetration depth of S			
	a) S = 0	b) S = 1,5 m	c) S = 3 m	d) S = 3 m
0	0,6142 (0,0351)	0,9942 (0,0630)	1,3341 (0,0900)	1,5749 (0,1109)
30	0,6487 (0,0302)	1,2196 (0,0497)	2,0239 (0,0674)	2,8895 (0,0795)
60	0,6572 (0,0297)	1,2774 (0,0491)	2,1969 (0,0668)	3,2136 (0,0784)
90	0,6631 (0,0294)	1,3179 (0,0488)	2,3187 (0,0659)	3,4401 (0,0776)
120	0,6679 (0,0292)	1,3502 (0,0486)	2,4151 (0,0655)	3,6187 (0,0770)
150	0,6718 (0,0291)	1,3774 (0,0484)	2,4961 (0,0654)	3,7683 (0,0765)



Pic. 7. Post settlement vs time curves.

thickness of which is determined using the ratio (2) from the terrain surface to the post footing and using the ratio (3) below the post footing. The model lower end is provided with rigid fixing.

Concentrated force F and distributed load q (Pic. 3) are conventionally not shown. This model was used both for calculating at the elastic stage and for calculating at the soil creep and thawing stages. Let us notice that when calculating thawing stage, the number of the finite elements and nodes decreased because of removing the thawed layers from the model.

Table 2 shows the values of the post footing vertical movement Δ and the principal normal compressive stress σ_2 of the soil under the post footing. Those values are obtained at $L = 200$ m

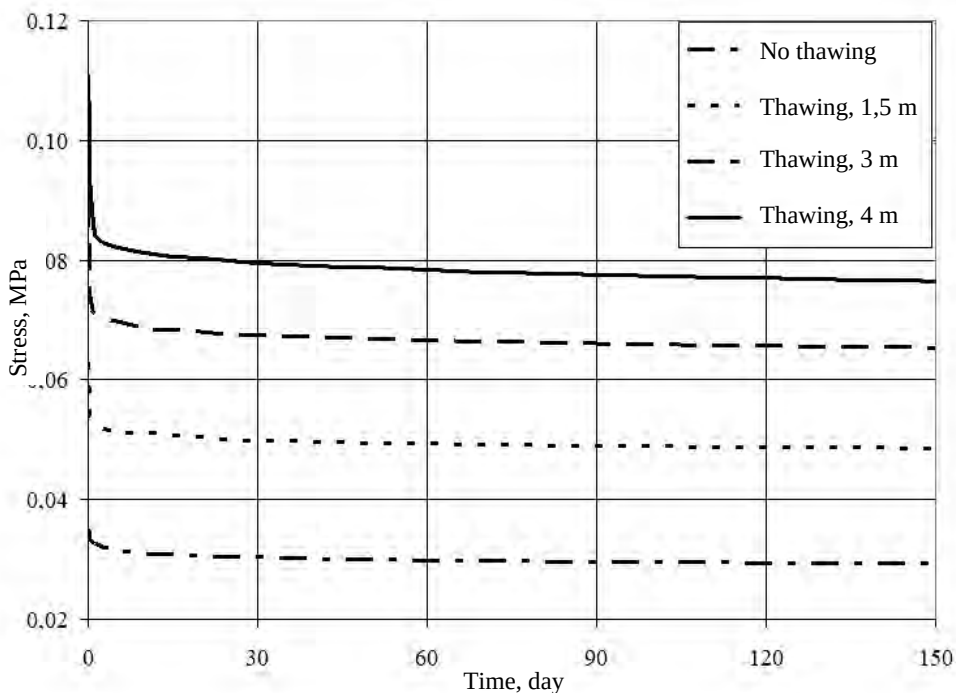
and for various values of H (here and elsewhere σ_2 is indicated in absolute values). It is seen that parameter Δ increases with the increase of the H value. At the same time, the soil stress state under the post footing changes slowly.

Besides, Table 2 shows also values of Δ and σ_2 obtained at $H = 106$ m and for various values of L . From the above data, it follows that increase of L has little effect on the stress-strain behavior under the post footing. Let us take $L = 200$ m; $H = 106$ m. The so assumed value of the parameter H can be justified by the above mentioned depth of the permafrost soil in the region concerned (120÷250 m).

Results of Creep and Thaw Calculation

Study of the variations in time of the stress-strain behavior of the model shown in Pics. 3





Pic. 8. Principal soil compressive stress under post footing curves.

and 6 was conducted within the time interval [0; 150 days] for the following loadings:

a) The effect of the specified dead load of the part of the structure transferred to the post.

b) The effect of the specified dead load of the part of the structure transferred to the post supplemented with the effect of the negative frictional load of the thawing soil applied to the side surface of the post.

For calculations of the above item b), the value of the linear negative frictional load of the thawing soil's i -layer applied to the side surface of the post is determined according to paragraph 4.38 [12] as follows:

$$f_{\text{neg},i} = u_p \cdot f_{n,i} \quad (7)$$

where u_p is a cross-sectional perimeter of the post, m;

$f_{n,i}$ is a negative friction of the thawing soil's i -layer applied to the side surface of the post, kPa (it is allowed to look up for this value in Table 2 [15]).

It was assumed that $u_p = \pi \cdot d = 3,14$ m, where $d = 1$ m is a diameter of the well filled with sand-cement mortar and in which the post is immersed.

The thaw calculations do not consider the negative force applied to the side surface of

the post from the side of the filled-up crushed stone soil (layer II in Pic. 3), and the thaw depth S is measured from the natural terrain surface. In this case, the design model is refined as follows: the thawed soil layer is replaced with the corresponding negative frictional force $f_{\text{neg},i}$. Removing the thawed layer entailed changes in the stressed soil body formed around the post under loading, that is, the indicated soil body was limited by a horizontal plane separating the thawed soil from the frozen soil as well as by a horizontal plane getting through the post footing. When determining the soil strata thicknesses (refer to (2)), the distance z (Pic. 3) was also measured from the thawed and unthawed soil strata boundaries and parameter l in relation (3) was taken as follows: $l = 15 - 2 - S$.

The following three thawing cases have been considered:

- 1) $S = 1,5$ m;
- 2) $S = 3$ m;
- 3) $S = 4$ m;

The definition of the negative frictional forces for the above cases is shown below:

- 1) Thawing of the layer III (Pic. 3) to $S = 1,5$ m. For medium coarse and medium density

sand at average thaw penetration of 0,75 m according to Table 2 [15] we get $f_{n,2} \approx 35$ kPa; $f_{neg,2} = 35$ kPa $\cdot$ 3,14 m = 109,9 kN/m.

2) Thawing of the layer III to $S = 3$ m. The average depth of thawed layer is equal to 1,5 m; $f_{n,2} \approx 38,5$ kPa; $f_{neg,2} = 38,5$ kPa $\cdot$ 3,14 m = 120,89 kN/m.

3) Thawing of the layer III to 3 m complemented by thawing of the layer IV to 1 m ($S = 4$ m). The average depth of thawed layer III is equal to 2 m; $f_{n,2} \approx 42$ kPa; $f_{neg,2} = 42$ kPa $\cdot$ 3,14 m = 131,88 kN/m. The average depth of thawed layer IV (silt-loam stratum) is equal to 3,5 m; $f_{n,3} \approx 5$ kPa; $f_{neg,3} = 5$ kPa $\cdot$ 3,14 m = 15,70 kN/m.

Variation in time of the stress-strain behavior under the post footing caused by soil creep was studied for four design cases:

- Thawing is absent ($S = 0$);
- Thawing case (1) (refer to point 1 above) at thaw penetration depth of $S = 1,5$ m;
- Thawing case (2) at thaw penetration depth of $S = 3$ m;
- Thawing case (3) at average thaw penetration $S = 4$ m.

Table 3 shows the values of the vertical post footing movement Δ (post settlement) and the principal normal compressive stress σ_2 of the soil under the post footing respectively obtained for all the above design cases at varying times elapsed after loadings. Term curves of the post settlement Δ and of parameter σ_2 are shown in Figs. 7, 8.

Conclusion

It follows from the above described results that while there is no thaw or it exists at relatively shallow depths, the post foundation settlement caused by the overpass dead load is insignificant (≤ 1 mm). Besides, the increase in foundation settlement caused by the soil creep is also insignificant within the specified time interval. However, an increase in the thaw penetration up to 3÷4 meters from the terrain level results in a more significant settlement (1,3÷1,6 mm). Considering the evolving creep of the frozen soil, this settlement can reach 2,5÷3,8 mm in 120÷150 days after thawing, that is, it can grow by about 2÷2.5 times. At the same time, change of the frozen soil stress state when the post is subjected to loadings with F and q loads is insignificant even if the thaw penetration depth S is substantial ($\sigma_2 \leq 0,111$ MPa). Over time, the principal compressive stress σ_2

decreases for all the above design cases, that is, a stress relaxation occurs.

So, the conducted research may result in the conclusion that the thawing process developing during comparatively short periods (several months) can considerably affect the strained state of the frozen soil under the foundation footing but have low effect on its stress state.

REFERENCES

1. Tsytoovich, N. A. Mechanics of Frozen Soil [Mekhanika myorzylykh gruntov]. Study Guide. Moscow, Vysshaya Shkola publ., 1973, 448 p.
2. Vyalov, S. S. Rheological Fundamentals of Soil Mechanics [Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov]. Study Guide. Moscow, Vysshaya Shkola publ., 1978, 447 p.
3. Ting, John M. On the nature of the minimum creep rate-time correlation for soil, ice, and frozen soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20 (1), pp. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.1139/t83-017>.
4. Tiande Miao, Xuexia Wei, Changqing Zhang. Creep of frozen soil by damage mechanics. *Science in China (Scientia Sinica)*, Series B, Vol. 38, Iss. 8, pp. 996–1002.
5. Songhe Wang, Jilin Qi, Zhenyu Yin, Jianming Zhang, Wei Ma. A simple rheological element based creep model for frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, Vol. 106–107, pp. 47–54. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.06.007.
6. Tsarapov, M. N., Kotov, P. I., Frozen Soil Properties when Thawing [Svoistva myorzylykh gruntov pri ottaivani]. *Put' I putevye khoziasstvo* [Track and Track Facilities], 2013, Iss. 9, pp. 31–34.
7. Özgan, E., Serin, S., Ertürk, S., Vural, I. Effects of freezing and thawing cycles on the engineering properties of soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2015, Vol. 52, Iss. 2, pp. 95–99. DOI: 10.1007/s11204-015-9312-1.
8. Ivanov, V. N., Merzlyakov, V. P., Plotnikov, A. A. Calculation of the Permafrost Thaw Depth for the Multilayer Foundations Subgrade [Raschyot glubiny protaivaniya mnogoletnemerzlykh gruntov v osnovanii mnogosloynnikh pokrytiy]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov* [Substructures, Foundations and Soil Mechanics], 2018, Iss. 5, pp. 25–30.
9. Gioda, G., Gallavresi, F., Locatelli, L. A numerical and experimental study of the artificial freezing of sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, Vol. 31, Iss. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1139/t94-001.
10. Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., Jardine, R. J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Geotechnique*, 2009, Vol. 59, Iss. 3, pp. 159–171. DOI: 10.1680/geot.2009.59.3.159.
11. Veselov, V. A. Design of Substructures and Foundations (Basics of Theory and Calculation Examples) [Proektirovanie osnovaniy i fundamentov]. Study Guide, 3rd ed., rev. and enl., Moscow, Stroyizdat, 1990, 304 p.
12. SP [Codified rules] 52.13330.2012 Permafrost Soil Substructures and Foundations.
13. SP [Codified rules] 52.13330.2016 Buildings and Facilities Foundations.
14. Vyalov, S. S. Frozen Soil Strength and Creep and Ice and Ground Fencing Design [Prochnost' i polzuchest' myorzylykh gruntov i raschyoty lyodogruntovykh ograzhdeniy]. Moscow, USSR Academy of Science publ., 1962, 253 p.
15. SP [Codified rules] 52.13330.2011 Pile Foundations.





Возможности применения мультимодульных плавсредств- трансформеров в процессах освоения Мирового океана



Николай ОСТРОУХОВ



Екатерина ЧУМАКОВА

Остроухов Николай Николаевич – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия.

Чумакова Екатерина Витальевна – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия.*

Мультимодульные плавсредства-трансформеры на основе модулей с вихревыми двигателями могут составить новый класс плавсредств, который существенно расширяет диапазон достижимых параметров в производственных процессах, выполняемых в Мировом океане.

Составляемые из однотипных и способных функционировать автономно модулей с вихревыми двигателями плавсредства, во-первых, могут наращиваться до размеров и форм, недоступных для современных судов традиционной компоновки, а, во-вторых, при необходимости, не имеют ограничений по срокам автономности, так что по совокупности свойств они аналогичны искусственным островам в произвольной акватории Мирового океана, обладая при этом мобильностью.

Цель настоящей работы – оценка перспектив использования мультимодульных плавсредств-трансформеров как носителей технологических комплексов в научно-производственных процессах, выполняемых в Мировом океане.

Для мультимодульных плавсредств-трансформеров с вихревыми двигателями предложены модели их применения в режимах автономного круглогодичного непре-

рывного функционирования в произвольной незамерзающей акватории Мирового океана.

Для оценки эффективности использования предлагаемых плавсредств-трансформеров выполнено имитационное моделирование их функционирования, а также прямое сопоставление их характеристик с традиционными судами, обеспечивающими деятельность научно-производственных комплексов в Мировом океане. Для сопоставления выбраны известные на сегодняшний день морские комплексы, требующие длительного непрерывного функционирования (комбинат по добыче и переработке морепродуктов; предприятие по СПГ).

В работе показано, что применительно к рассмотренным процессам предлагаемые мультимодульные плавсредства-трансформеры обладают, по меньшей мере, двумя потенциальными преимуществами. Во-первых, они позволяют реализовывать непрерывное и длительное (определяемое непосредственным износом основного модуля) функционирование комплекса, а, во-вторых, в режиме автономного функционирования отдельных модулей зоной действия комплекса в целом оказывается акватория с характерным размером в сотни миль.

Ключевые слова: мировой океан, морской транспорт, мультимодульные плавсредства-трансформеры, добыча и переработка морепродуктов, донные металлические конкреции, добыча и переработка сжиженного природного газа.

*Информация об авторах:

Остроухов Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры теоретической электротехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия, vtvnujde@mail.ru.

Чумакова Екатерина Витальевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической электротехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия, ekat.v.ch@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 11.01.2019, актуализирована 08.10.2019, принята к публикации 14.10.2019.

For the English text of the article please see p. 122.

ВВЕДЕНИЕ

Мультимодульные плавсредства-трансформеры на основе модулей с вихревыми двигателями, описанные в [1], могли бы представлять собой новый класс плавсредств, который существенно расширяет диапазон достижимых параметров в производственных процессах, выполняемых в Мировом океане. В частности, они могут обеспечивать непрерывное длительное (в течение нескольких лет) функционирование производственных или научно-технических комплексов в произвольной незамерзающей акватории Мирового океана с поддержанием необходимой транспортной и других видов связи с управляющими центрами и заказчиками на суше. Предпосылки такого преимущества плавсредств-трансформеров состоят в том, что они: во-первых, на стадии проектирования могут быть скомпонованы оптимальными для конкретного производственного процесса, а, во-вторых, имеют большие по сравнению с универсальными судами производительность и экономичность специализированных модулей, выполняющих конкретные производственные операции.

Цель настоящей работы — качественный анализ возможностей совершенствования научно-производственных процессов освоения Мирового океана, в первую очередь перспективных, и оценка перспектив

использования мультимодульных плавсредств-трансформеров как носителей технологических комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Комплекс по добыче и переработке морепродуктов

Одной из областей освоения Мирового океана, для которой очевидна возможность применения судов с вихревыми двигателями, является добыча морских биологических ресурсов в различных районах промысла.

Суда с вихревыми двигателями, снабжённые рыболовными тралами, по своим функциональным возможностям практически ничем не отличаются от судов традиционной компоновки и даже обладают главным преимуществом — значительно меньшим расходом топлива [1].

Однако наибольший интерес представляет комбинированное судно-трансформер, которое может выполнять роль плавучей рыбоперерабатывающей базы. Так, при сохранении состава технологического оборудования современной перерабатывающей плавбазы в промысловую флотилию включают набор однотипных судов-модулей (возможно различного размера), которые в зависимости от выполняемых задач могут объединяться в более крупное судно или функционировать автономно.

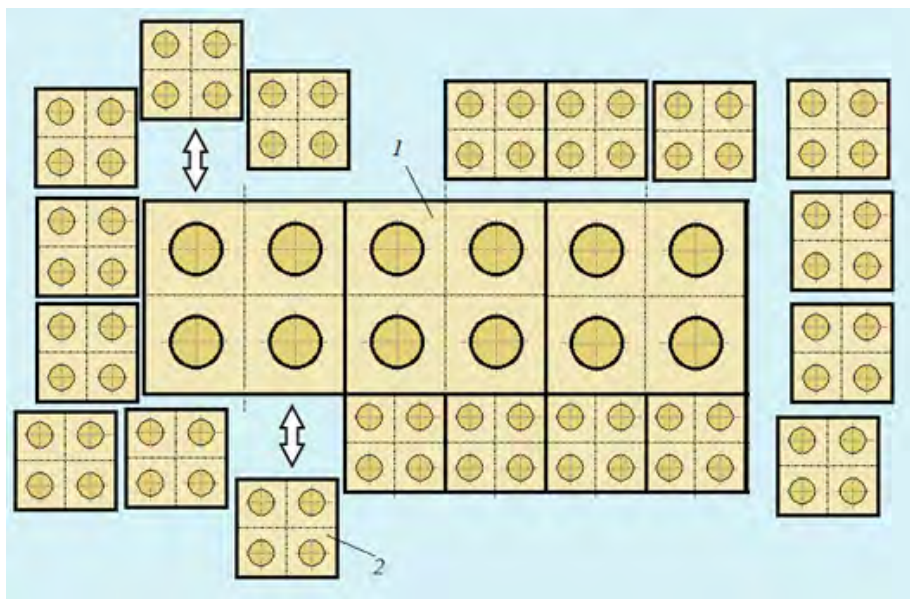


Рис. 1. Схема реализации мультимодульной флотилии рыбоперерабатывающего завода: 1 — центральный модуль плавбазы; 2 — промысловые и транспортные модули.

Традиционный рыбоконсервный плавучий завод представляет собой крупное судно большого водоизмещения (например, крабоконсервная плавбаза (КРКПБ) «Всеволод Сибирцев» водоизмещением 32 тыс. тонн), которое обслуживается 1–2 приёмно-транспортными судами и 10–12 промысловыми судами, а также наливным судном (танкером).

Сохраняя этот подход к промыслу и переработке морепродуктов, возможно использование 2–3 центральных крупных модулей, выполняющих функции плавучего завода, по периметру которых могут пристыковаться от 8–20 однотипных малых плавмодулей, выполняющих промысловые и транспортные функции (рис. 1).

Применение судов с вихревыми двигателями в рыболовном флоте имеет ряд очевидных преимуществ. Во-первых, лёгкая масштабируемость самого плавучего завода в зависимости от зоны и сезона промысла (т.е. от интенсивности улова). Плавучий завод может быть сформирован за счёт различного числа модулей (от одного до трёх и даже четырёх, больше нецелесообразно), от чего зависит общее водоизмещение, грузоподъёмность, объёмы помещений для хранения продукции, площади для размещения технологического оборудования и прочее.

Во-вторых, традиционные плавбазы и траулеры расходуют лишь порядка 30 % топлива на обслуживание технологического оборудования (механизированных линий, холодильных камер и т.п.), остальной объём затрачивается на движение. В то же время суда с вихревыми двигателями потребляют на движение в 2,5 раза меньше топлива [1]. Сравнивая расход топлива КРКПБ «Всеволод Сибирцев», который составляет порядка 5000 тонн за рейд в 9 месяцев, с аналогичным по габаритам и ходовым свойствам мультимодульным комплексом, видно, что для автономного функционирования в течение года необходимо не более 2500 тонн.

В-третьих, меньший расход топлива позволяет, по крайней мере, вдвое увеличить период автономного плавания в отличие от всё того же КРКПБ «Всеволод Сибирцев», который находится в рейде 9 месяцев в году. А при правильно организованной логистике транспортных модулей

(выполняющих отгрузку готовой продукции, смену экипажа, а также доставку топлива и прочих материальных ресурсов) можно обеспечить бесперебойное круглогодичное функционирование плавзавода вплоть до полного технологического износа оборудования плавмодулей.

Для определения оптимального числа модулей, формирующих флотилию плавбазы, построена имитационная модель, позволяющая оценивать эффективность производства продукции (объёмы выпускаемой продукции, загруженность линий) от состава флота, то есть от предполагаемого объёма вылова. Поведение системы в целом зависит от большого числа исходных параметров, таких, как удалённость промысла, габариты базы (число модулей, грузоподъёмность) и т.п., которые учитываются в модели и являются управляющими.

При построении имитационной модели предполагалось, что рыболовные сейнеры аналогичны по таким параметрам как водоизмещение, скорость, грузоподъёмность и объём вылова в сутки малым или средним рыболовным траулерами и регулярно выходят в рейсы-смены одинаковой продолжительности, по истечении которых добытые морепродукты поступают на переработку. Транспортные суда-модули отгружают продукцию на берег, как только её оказывается достаточно для полной их загрузки. Время отгрузки определяется удалённостью базы от берега. Принято, что основной модуль, выполняющий роль носителя технологического оборудования в месте близком к ареалу промысла, курсирует на одинаковом расстоянии от берега. При этом необходимость передвижения за скоплением рыбы, зависящая от зоны и сезона промысла, не известна и поэтому не учитывалась на данном этапе. Такое допущение конечно же может привести к определённым погрешностям полученных результатов, однако эти отклонения не критичны и не могут говорить о их общей недостоверности.

Объёмы вылова задаются случайной величиной, распределённой по показательному закону, со средним объёмом вылова, задаваемым в зависимости от вместимости и мощности промыслового модуля-траулера. В случае необходимости модель

Таблица 1

Результаты моделирования

Объём полученной продукции за год, т (доставленная/в хранилищах базы)	84800/100	96800/7800	128000/300
Загруженность завода (из расчёта 22 ч/сутки)	0,47	0,57	0,71
Количество добывающих/транспортных модулей	8/4	10/2	12/4
Средняя загрузка транспортных судов	0,43	0,99	0,65
Средний объём переработки в сутки, т	230	290	350

может быть уточнена в соответствии с сезоном, интенсивностью вылова и колебанием запасов рыбы [2].

Рассмотрим результаты, полученные на основе моделирования функционирования судна-трансформера, схожего по параметрам и области промысла с КРКПБ «Всеволод Сибирцев». Сопоставимое по габаритам и водоизмещению судно (225 м в длину и 80 м в ширину) состоит из трёх модулей с роторами радиусом 22 м и межосевым расстоянием 40 м. Удалённость промысла задаётся в 1000 км от порта приписки. Роль сейнеров играют модули с несущими роторами диаметром 11 м (расчётной грузоподъёмностью 200 т для транспортных модулей и средним объёмом вылова 100 т для модуля трала). В таблице 1 приведены показатели производительности продукции в зависимости от количества модулей и их функционального распределения.

Из таблицы видно, что оптимизацией количества обеспечивающих судов можно довести загруженность основного перерабатывающего комплекса до 100 %. Теоретический максимум загруженности КРКПБ «Всеволод Сибирцев» не превышает 70 %.

2. Добыча донных полиметаллических конкреций

Донные отложения полиметаллических конкреций [3; 4] рассматриваются в настоящее время как важный и сравнительно доступный ресурс металлургической промышленности. Однако в арсенале добывающих отраслей промышленности в настоящее время нет отлаженных технологий сбора сырья, распределённого тонким слоем на морском (океаническом) дне, нередко на глубинах в сотни и тысячи метров. Очевидно, что при большом разнообразии месторождений конкреций [4] в настоящее время нельзя предложить универсальную технологию их разработки.

В [3] описана технология сбора и подъёма на поверхность конкреций с использованием так называемого кассетного трала, разработанная, судя по всему, для месторождений на слаборельефном морском дне. Сущность технологии и принцип работы кассетного трала представлены на воспроизводимом из [3] рис. 2.

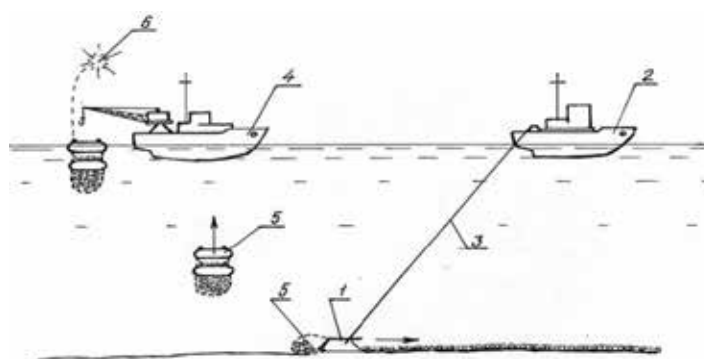
Из приведённых рисунков видно, что для сколько-нибудь полного извлечения конкреций вся поверхность месторождения должна быть «отсканирована» буксируемым тралом, что при характерном размере месторождения L и ширине захватной части трала l требует не менее $N = L/l$ перемещений трала в перпендикулярном к L направлении. По совокупности характеристик месторождений и реальных размеров тралов число N не может быть меньше 10^3 .

Очевидно, что при буксировке трала универсальным судном традиционной компоновки, последнее для обеспечения N перемещений трала должно совершить, по крайней мере, то же количество односторонних рейсов. Существенно, что из-за конечной глубины акватории и наклонной ориентации буксировочного троса пробег судна больше расстояния, на которое перемещается трал. Кроме того, при каждом рейсе буксировочного судна оно должно разворачиваться в противоположном направлении. Наконец, рассматриваемая технология существенно осложняется необходимостью строгого совмещения каждой новой траектории перемещения трала с предыдущей.

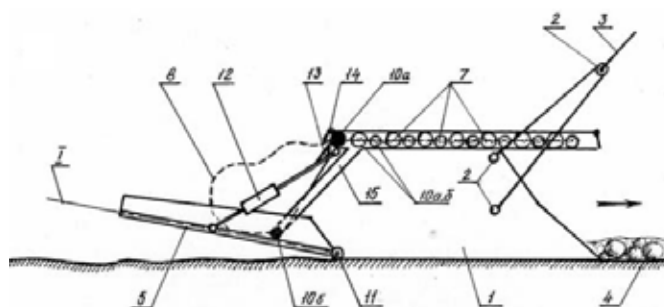
Таким образом, продуктивность одиночного универсального судна на стадии извлечения конкреций кассетным тралом оказывается принципиально невысокой.

Мультимодульное плавсредство-трансформер может быть скомпоновано из условий максимальной эффективности разработки конкретного месторождения.

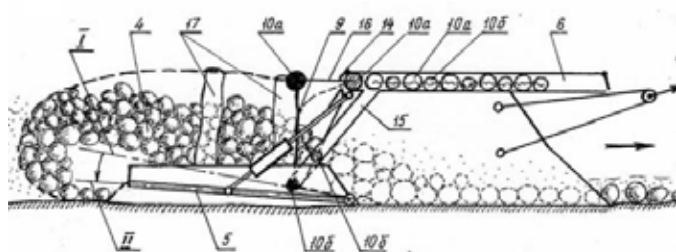




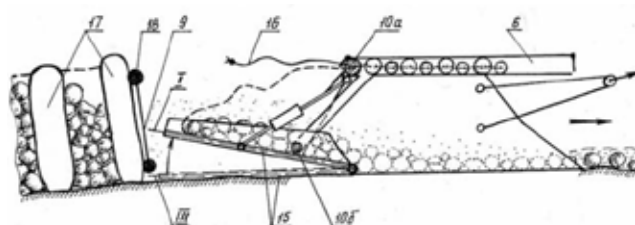
а)



б)

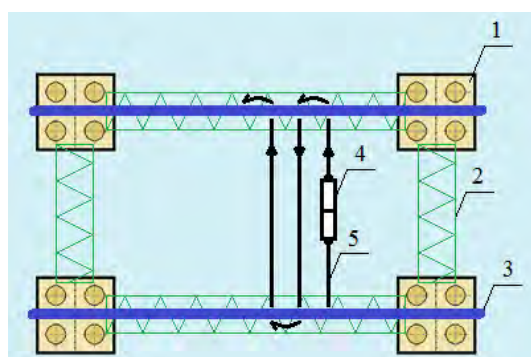


в)

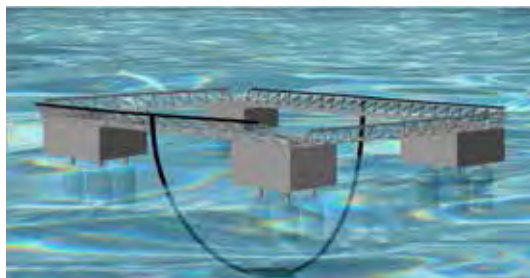


г)

Рис. 2. Принципиальные схемы [3]: (а) разработки месторождения конкреций кассетным тралом: 1 – кассетный ковш-черпак, 2 – буксирное судно, 3 – буксирный трос, 4 – судно-сборщик, 5 – всплывающие тралы, 6 – сигнальное устройство, 7 – залежь конкреций; (б–г) работа кассетного трала: 1 – ковш-черпак, 2 – узел крепления буксировочного троса, 3 – буксирный трос, 4 – конкреции, 5 – качающаяся плита, 6 – кассеты, 7 – тралы, 8 – высокопрочная сеть трала, 9 – гибкий каркас проходного сечения трала, 10а – верхний каток-держатель с баллоном сжатого воздуха, 10б – нижний каток-держатель, 11 – шарнир качающейся плиты, 12 – пружинная тяга, 13 – жёсткий упор-держатель, 14 – пружинная защёлка, 15 – наклонная часть кассеты, 16 – упругая тросовая тяга фал, 17 – подъёмные баллоны-ёмкости, 18 – баллоны со сжатым воздухом, I – рабочее положение плиты, II – загрузочное положение плиты.



а)



б)

Рис. 3. Модель структуры комплекса по извлечению донных металлоконкреций на основе модульного трансформируемого плавсредства: 1 – опорные модули с лебёдками для перемещения трала, 2 – распорные фермы, 3 – валы лебёдок, перемещающих трал, 4 – спаренный двухсторонний трал, 5 – буксировочный трос.

Модель структуры технологического комплекса представлена на рис. 3. Комплекс содержит, по меньшей мере, четыре опорных модуля, расположенных в вершинах прямоугольника со сторонами по осям модулей. Прямоугольник располагается над разрабатываемым участком месторождения конкреций, взаимное положение модулей зафиксировано распорными фермами. По двум параллельным сторонам комплекса над опорными фермами установлены валы лебёдок, перемещающих трал.

При описываемой структуре комплекса целесообразным представляется использование спаренного (двухстороннего) трала с двумя буксируемыми тросами, как это показано на рис. 3. Для перевода такого трала на встречную траекторию достаточно сдвинуть тянущие тросы в поперечном направлении (по валам тянущих лебёдок) приблизительно на ширину заборной части трала.

Описанная компоновка комплекса обеспечивает предельно полное извлечение конкреций с площади, охватываемой периметром комплекса при минимальных

энергозатратах, в частности, существенно меньших, чем при перемещении трала одиночным судном. Действительно, в последнем случае большая часть потребляемой мощности расходуется на перемещение самого судна, по размерам превышающего трал, по крайней мере, на порядок. Соответственно эффективная площадь, воспринимающая скоростной напор, а значит, и мощность, оказываются на 2–3 порядка больше мощности, потребляемой на перемещение трала. Кроме того, каждый отдельный пробег судна-буксировщика всегда больше длины траектории самого трала, по крайней мере, на длину натяжения буксировочного троса.

Оптимизация количества судов-модулей, формирующих опоры добывающего каркаса (зависящего от периметра сканируемой поверхности дна) и количества транспортно-доставляющих модулей (зависящего от дальности месторождения и объёмов добычи) представляется весьма простой задачей, а предложенная структурная модель комплекса, находящегося в стадии становления, не может быть кон-



кретизирована компьютерной моделью его функционирования при отсутствии данных о месторождении.

3. Комплекс по добыче сжиженного природного газа (СПГ)

По мере истощения и выработки традиционных мощных газовых месторождений [5] непрерывно возрастает актуальность разработок трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) газа, в частности, на сравнительно маломощных, но многочисленных шельфовых месторождениях природного газа.

В [5] довольно детально описан плавучий завод СПГ (Prelude FLNG), спроектированный и строящийся корпорацией Royal Dutch Shell* для разработки месторождения на шельфе Западной Австралии. Проект представляется, по сути, модификацией наземного завода, размещаемого на плавучем основании. В настоящее время он является крупнейшим из существующих плавучих объектов на Земле (водоизмещение 600 тыс. тонн). В целом, проект плавучего завода СПГ разработан применительно к одному конкретному месторождению из условия максимальной производительности при работе на нём. То есть, из условия выработки этого месторождения за минимальный срок. Принципиальная возможность перемещения завода на другое месторождение никак не подтверждается техническими характеристиками. В частности, само плавучее основание завода не имеет собственных ходовых движителей и перемещаться может лишь буксирами. По совокупности свойств плавучий завод СПГ оказывается условно мобильным и сложно перемещаемым при переходе к другому месторождению.

Несколько нелогичным для моноблочного завода представляется наличие в нём систем, состоящих из группы параллельно функционирующих одинаковых агрегатов (например, три электромотора, семь морских котлов Kawasaki, шесть танков для хранения СПГ и др.). Такая компоновка завода предполагает, кроме резервирования систем (хотя бы теоретически), его работу не на полную мощность с использованием лишь части систем, выполненных не в единствен-

ном экземпляре. При работе в режиме меньшей производительности неотделяемая часть «большого» завода, очевидно, снижает показатели эффективности всего комплекса.

Из сказанного следует, что эффективный плавучий завод СПГ, предназначенный для разработки различных месторождений, нецелесообразно выполнять по моноблочной схеме.

Мультимодульные плавсредства, предлагаемые в настоящей работе, представляются оптимальным вариантом плавучего СПГ-завода, проектируемого для разработки месторождений со сменой местоположения.

Для прямого сопоставления в работе предложена модель структуры многоцелевого мультимодульного плавсредства-трансформера суммарным водоизмещением 600 тыс. тонн, то есть равного описанному в [5; 6], состоящего из десяти модулей по 60 тыс. тонн каждый. Отдельный модуль, имеющий четыре несущих ротора диаметром 35 м с межосевым расстоянием 45–50 м (в поперечном направлении) и 60 м (вдоль), позволяет получить судно с габаритами: длиной — 515 м, шириной — 170 м.

В зависимости от мощности месторождения и оптимальной потребной производительности завод СПГ на мультимодульном основании может состоять из различного числа модулей от единичного до максимального числа (в данном случае — до десяти). При использовании единственного модуля технология вполне аналогична работе завода [5; 6]. При использовании нескольких модулей их целесообразно располагать по контуру, охватывающему площадь месторождения так, чтобы вся подводная (донная) инфраструктура была в пределах этого контура.

Очевидны некоторые сравнительные преимущества завода на адаптируемом (к месторождению) плавучем основании на основе плавмодулей. Во-первых, использование мощности завода (предприятия), соответствующей мощности месторождения, исключает непроизводительные затраты по обслуживанию неиспользуемых частей «большого» завода. Во-вторых, использование мультимодульного плавучего основания позволяет оптимизировать инфраструктуру подводной (придонной) части добывающего комплекса.

*См. также <https://www.shell.com/about-us/major-projects/prelude-flng.html/> — прим. ред.

Сделать количественную оценку снижения эксплуатационных расходов в общем случае невозможно, но принимая вариант убывающей от некоей начальной величины мощности месторождения (в диапазоне от 1 до 0), разрабатываемого одним плавучим заводом, сокращение расходов можно оценить в 50 %.

ВЫВОДЫ

1. Для основных направлений освоения Мирового океана предложено применение мультимодульных плавсредств-трансформеров с вихревыми движителями. Показано, что такие плавсредства имеют значительные преимущества по сравнению с одиночными традиционными судами при выполнении длительных (вплоть до круглогодичных) непрерывных научно-технических проектов в произвольной акватории Мирового океана.

2. Выполнены оценки основных показателей функционирования для комплексов на основе модульных плавсредств по добыче и переработке морепродуктов, донных полиметаллических конкреций и СПГ. Показано, что во всех трёх рассмотренных процессах в сравнении с традиционными судами удельные энергетические, технологические и трудозатраты меньше. Сопоставление по сравнительно очевидной совокупности параметров позволяет оценить снижение транспортных расходов при переходе от универсальных судов к модульным в 60–80 %, а трудозатрат на выполнение технологических операций не менее чем в 50 %.

3. Указанные преимущества модульных плавсредств обусловлены оптимальным составом модулей, который определяется на основе модели функционирования комплекса. Кроме того, модульный принцип построения даёт возможность выполнения отдельных технологических операций (добыча морепродуктов, транспортировка готовой продукции и др.) отдельными специализированными модулями сравнительно малого водоизмещения, а также пребывания основного технологического модуля, по водоизмещению сравнимого с судами традиционной компоновки, в заданной акватории практически неограниченное время без регулярно-

го непроизводительного возвращения на сухопутную базу.

Данные выводы могут быть уточнены, доработаны или дополнены по мере проведения дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

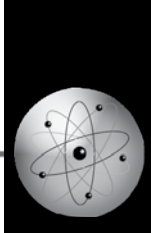
1. Остроухов Н. Н., Чумакова Е. В. Компоновочные схемы и эксплуатационные характеристики водных и воздушных судов с вихревыми движителями // Мир транспорта. — 2018. — № 5. — С. 40–49.
2. Мельников А. В., Мельников В. Н. Управление запасами промысловых рыб и охрана природы: Учеб. пособие. — Астрахань: Изд. АГТУ, 2008. — 544 с.
3. Кириченко В. Ю., Каширский А. С. Технология добычи железомарганцевых конкреций с помощью кассетного трала // Гидромеханизация. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. — 2015. — № 11. — С. 114–121.
4. Базилевская Е. С. Исследование железомарганцевых руд океана // Труды Геологического института. — 2007. — Вып. 518. — 189 с.
5. Скоренко Т. Самый большой корабль в мире // Популярная механика. — 2014. — № 6. [Электронный ресурс]: <https://www.popmech.ru/technologies/16058-probuzhdayushchiy-ktulkhu/#part0>. Доступ 08.10.2019.
6. Shell's massive Prelude hull world's biggest-ever floating vessel and first ocean-based LNG plant, Financial Post (3 December 2013). [Электронный ресурс]: <https://business.financialpost.com/commodities/energy/record-breaking-lng-ship-launched-bigger-one-planned>. Доступ 08.10.2019.

От редакции:

Предлагаемая вниманию читателей статья, посвящённая постановке достаточно нового вопроса, представляется в определённой мере дискуссионной. Предложенные на обсуждение подходы к моделированию, носящие на начальном этапе объяснимо общий характер, в последующем будут нуждаться в более глубоком обосновании, аргументации принятых алгоритмов и допущений. Подлежит дальнейшему рассмотрению и детальное обоснование эффективности вихревого движителя, его тяговых характеристик, КПД, в том числе и экспериментальное, — с учётом возможностей выполнения движителя в виде оболочки на корпусе, связанной с приводным двигателем. Исходя из практики применения модульного принципа построения сложных систем, в том числе при постройке судов, должны быть учтены существенные ограничения его использования в части мореходных качеств: остойчивости, непотопляемости, допустимых характеристик качки и т.д.; обеспечения прочностных свойств мультимодульного объекта во всех, в том числе и экстремальных условиях; решения многокритериальной задачи, в которой оптимизация по одному параметру может существенно ухудшить другие показатели, вплоть до полной неоптимальности конструкции в целом; многократного дублирования систем и средств для безопасного функционирования каждого модуля; экономической эффективности мультимодульного объекта.

Вместе с тем, независимо от результатов обсуждения, сама постановка данных, во многом новых, вопросов, несомненно, может быть полезной для поиска связанных с ними эффективных решений.





Potentiality of Multi-Modular Transformer Watercrafts for Ocean Exploration



Nikolai N. OSTROUKHOV



Ekaterina V. CHUMAKOVA

Ostroukhov, Nikolai N., Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Moscow, Russia.

Chumakova, Ekaterina V., Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Moscow, Russia.*

ABSTRACT

The multi-modular transformer watercrafts based on modules with vortex engines might represent a new class of watercrafts significantly expanding the range of achievable parameters in production processes carried out in the World Ocean.

Composed of modules of the same type and capable of functioning autonomously with vortex propulsion devices, they can, firstly, be assembled to sizes and shapes that are not accessible to modern vessels of traditional design, and secondly, if necessary, they will not have limitations in terms of independent operation, so their properties are similar to artificial islands in any given water area of the Global Ocean, while possessing mobility.

The objective of this paper is to assess the prospects for the use of multi-modular transformer watercrafts as carriers of technological systems for scientific and production processes carried out in the World Ocean.

Models of application of multi-modular transformer watercrafts with vortex propulsion are

suggested for their autonomous year-round continuous operation in given non-freezing waters.

To assess the effectiveness of the use of the proposed transformer watercrafts, a simulation of their operation was carried out, as well as a direct comparison of their specifications with traditional vessels that support operation of scientific and production complexes in the World Ocean. For comparison, the currently known marine complexes are selected that require long-term continuous operation (fish canning floating base; a floating complex for extraction and production of liquefied natural gas).

The paper shows that, in relation to all the considered processes, the proposed multi-modular transformer watercrafts have at least two advantages. Firstly, they make it possible to realize continuous and long-term (determined by direct wear of the main module) functioning of the complex, and secondly, with autonomous functioning of individual modules, the zone of action of the complex as a whole is an area with a characteristic size of hundreds of miles.

Keywords: World Ocean, maritime transport, transformer multi-modal watercraft, seafood production and processing, bottom metal nodules, production and processing of liquefied natural gas.

*Information about the authors:

Ostroukhov, Nikolai N. – Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Associate Professor at the Department of Theoretical Electrical Engineering of Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, vtvnuke@mail.ru.

Chumakova, Ekaterina V. – Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor at the Department of Computer Mathematics of Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, ekat.v.ch@rambler.ru.

Article received 11.01.2019, revised 08.10.2019, accepted 14.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 114.

Background. The multi-modular transformer watercrafts based on modules with vortex engines described in [1] might represent a new class of watercrafts that significantly expanding so the range of achievable parameters in production processes carried out in the World Ocean. In particular, they can provide continuous long-term (for several years) operation of production or scientific and technical complexes in any given non-freezing water area of global oceans and seas with maintenance of the necessary transportation and other types of links with management centers and customers. The prerequisites for such an advantage of transformer watercrafts are that, firstly, at the design stage they can be shaped in the optimal way for a particular production process, and, secondly, they have larger productivity and cost-effectiveness of specialized modules that perform specific production operations as compared with conventional vessels.

Objective. The objective of this paper is focused on a qualitative analysis of the possibilities for improving the scientific and production processes, primarily promising ones, of exploration of the World Ocean, and evaluation of potentiality of the use of multi-modular watercrafts as carriers of technological complexes.

Methods. The authors use general scientific and engineering methods, simulation and modeling.

Results.

1. Complex for fishing and processing of seafood

Exploration of marine biological resources in various fishing areas is one of the areas of exploration of the World Ocean, for which prospects of using vessels with vortex propulsion might be obvious.

Vessels with vortex propellers equipped with fishing trawls practically do not differ in functionality from vessels of a traditional layout and even have an advantage of significantly lower fuel consumption [1].

However, an integrated transformer vessel, which can serve as a floating fish processing base, is of most interest. So, while maintaining the technological equipment of a modern processing floating base, a fishing fleet can comprise a set of module vessels of one and the same type (but possibly of different sizes),

which, depending on the tasks performed, can be integrated into a larger vessel or function autonomously.

The traditional fish canning floating plant is a vessel of large displacement (for example, crab-fish canning floating base (CFCFB) Vsevolod Sibirtsev with a displacement of 32 thousand tons), which is served by 1–2 receiving and transportation vessels and by 10–12 fishing vessels, as well as by a bulk vessel (tanker).

Maintaining this approach to fishing and processing of seafood, it is possible to use 2–3 central large modules that perform the functions of a floating plant, around the perimeter of which 8–20 small floating modules of the same type that perform fishing and transport functions can be docked (Pic. 1).

The use of vessels with vortex propulsion for the fishing fleet has several obvious advantages. Firstly, we can name easy scalability of the floating plant itself, depending on the zone and season of fishing (i.e., on fish and catch intensity). A floating plant can be formed from a different number of modules (from one to three or even four, more is impractical), which determines total displacement, load capacity, volumes of premises for storing products, areas for placement of technological equipment, etc.

Secondly, traditional floating bases and trawlers consume only about 30 % of fuel for servicing technological equipment (mechanized lines, cold rooms, etc.), the rest is spent on movement. At the same time, vessels with vortex propellers consume 2,5 times less fuel for movement [1]. Comparing fuel consumption of CFCFB Vsevolod Sibirtsev, which is about 5000 tons per raid of 9 months, with a multi-modular complex similar in size and driving properties, it is clear that no more than 2500 tons are needed for independent operation during the year.

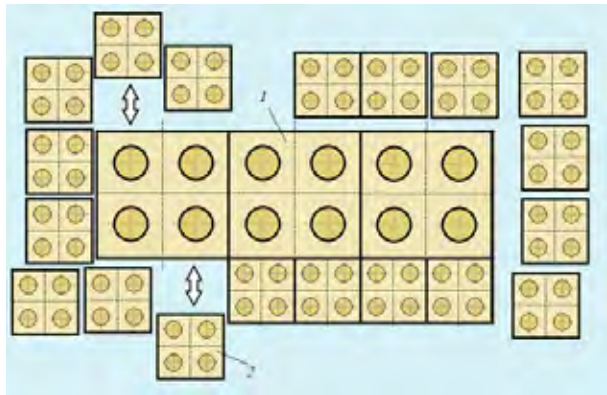
Thirdly, lower fuel consumption allows at least doubling of the independent navigation period, unlike the same CFCFB Vsevolod Sibirtsev, which is in the raid for 9 months a year. And with the properly organized logistics of transport modules (performing shipment of finished products, crew rotation, as well as delivery of fuel and other material resources), it is possible to ensure uninterrupted year-round operation of the plant up to complete technological wear-out of the equipment of floating modules.



Table 1

Modelling results

Volume of production per year, t (delivered/stored at floating base)	84800/100	96800/7800	128000/300
Plant workload (based on 22 h/day)	0,47	0,57	0,71
Number of fishing/transport modules	8/4	10/2	12/4
Average load of transport vessels	0,43	0,99	0,65
Average volume of processing per day, t	230	290	350



Pic. 1. The implementation scheme of a multi-modular fleet of a fish processing plant:
1 – central module of a floating base; 2 – fishing and transport modules.

To determine the optimal number of modules that form the flotilla of the floating base, a simulation model has been built that allows us to evaluate the production efficiency (volume of output, line load) basing on the fleet composition, that is, considering an estimated catch volume. The system behavior as of a whole depends on a large number of initial parameters, such as the remoteness of the field, the dimensions of the base (the number of modules, load capacity), etc., which are taken into account in the model and are deemed to be controlling parameters.

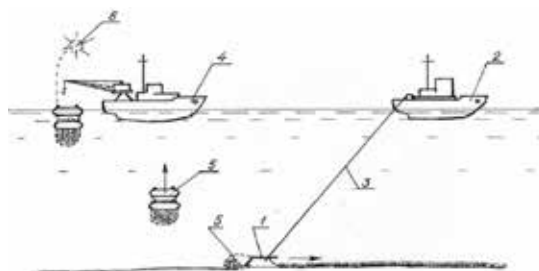
When constructing the simulation model, it was assumed that fishing seiners are similar in such parameters as displacement, speed, carrying capacity and catch volumes per day to small or medium fishing trawlers and regularly go to shift raids of the same duration, after which the caught seafood goes for processing. Modular transport vessels ship products ashore as soon as their volume permits to fully load them. Shipment time is determined by remoteness of the base from the coast. It is accepted that the main module, which serves as the carrier of technological equipment in a place close to the fishing range, runs at the same distance from the coast. At the same time, the need

to follow fish stocks, depending on the zone and fishing season, is not known, and therefore was not considered at this stage. Such an assumption can certainly lead to errors in the results obtained, however, these deviations are not critical and cannot show their general inaccuracy.

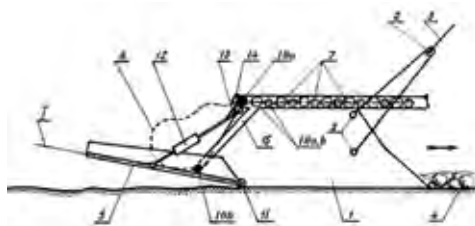
Catch volumes are set by a random variable distributed according to the exponential law, with an average catch volume set depending on capacity and power of the fishing trawler module. If necessary, the model can be refined in accordance with the season, fishing intensity and fluctuation of fish stocks [2].

Let us consider the results obtained through modelling the functioning of a transformer vessel, similar in parameters and field of fishing to CFCFB Vsevolod Sibirtsev. The vessel, comparable in size and displacement (225 m long and 80 m wide) consists of three modules with rotors with a radius of 22 m and an interaxial distance of 40 m. The fishing distance is set at 1000 km from the home port. The role of seiners is played by modules with bearing rotors with a diameter of 11 m (with a rated carrying capacity of 200 tons for transport modules and an average catch volume of 100 tons for a trawl module). Table 1 shows product performance indicators depending on the

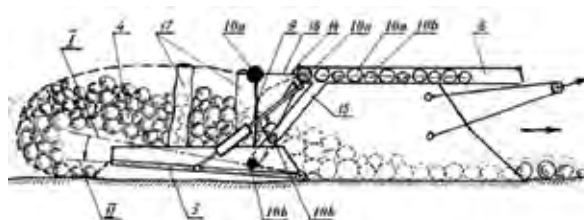
a)



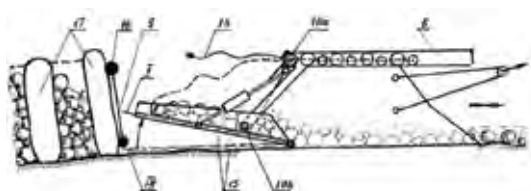
b)



c)



d)



Pic. 2. Schematic diagrams [3]: (a) development of a nodule deposit by a cassette trawl: 1 – cassette ladle, 2 – towing vessel, 3 – towing cable, 4 – picking vessel, 5 – pop-up trawls, 6 – signaling device, 7 – nodule deposit; (b–d) operation of the cassette trawl: 1 – ladle-bucket, 2 – attachment point for the towing cable, 3 – towing cable, 4 – nodes, 5 – swing plate, 6 – cassettes, 7 – trawls, 8 – high-strength trawl net, 9 – flexible frame of the trawl passage section, 10a – upper roller-holder with a cylinder of compressed air, 10b – lower roller-holder, 11 – hinge of the swing plate, 12 – spring rod, 13 – rigid stop-holder, 14 – spring latch, 15 – inclined part of the cassette, 16 – elastic rope traction halyard, 17 – lifting cylinders- containers, 18 – cylinders with compressed air, I – working position of the plate, II – loading position of the plate.

number of modules and their functional distribution.

The table shows that by optimizing the number of supporting vessels, the load of the main processing complex can be increased up to 100 %. The theoretical maximum load of CFCFB Vsevolod Sibirtsev does not exceed 70 %.

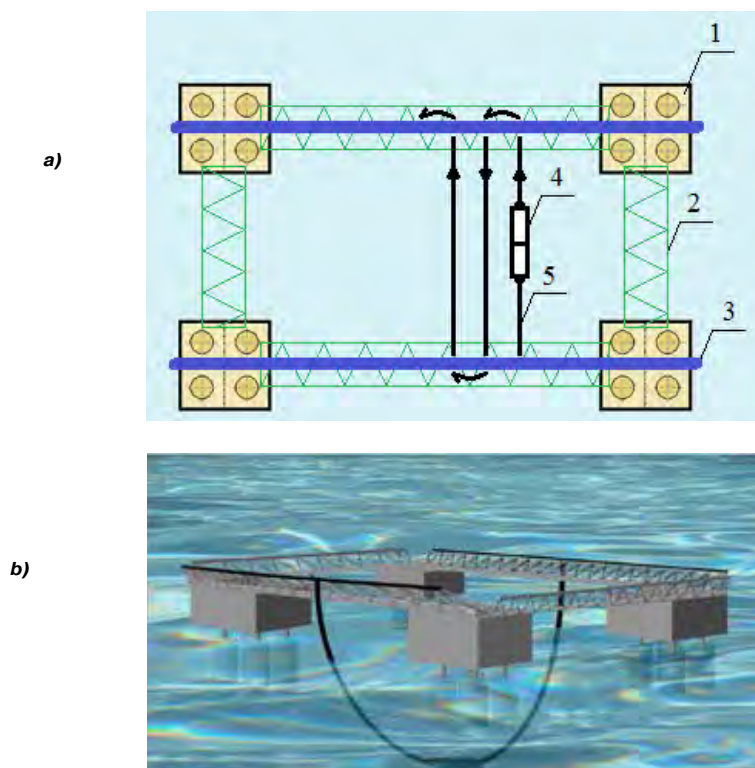
2. Extraction of deep-sea polymetallic nodules

Bottom sediments of polymetallic nodules [3; 4] are currently considered as an important

and relatively accessible resource for the metallurgical industry. However, extractive industries do not currently possess well-established technologies for collecting raw materials distributed in a thin layer on the sea (ocean) floor, often at depths of few hundred and thousand meters. Obviously, while a wide variety of nodule deposits can be mentioned [4], it is currently impossible to propose a universal technology for their development.

In [3], a technology was described for collecting and lifting nodules to the surface using the so-called cassette trawl, developed,





Pic. 3. The model of the structure of the complex for extraction of deep-sea metal nodules on the basis of a modular transformable watercraft: 1 – supporting modules with winches for moving the trawl, 2 – spacer trusses, 3 – shafts of winches moving the trawl, 4 – twin double-sided trawl, 5 – towing cable.

apparently, for deposits on the low-relief seabed. The essence of the technology and the principle of operation of the cassette trawl are presented in the Pic. 2 reproduced from [3].

It can be seen from the pictures that for any complete extraction of nodules the entire surface of the field must be «scanned» by a towed trawl, which, with a characteristic field size L and width of the trailing part of the trawl l , requires at least $N = L/l$ trawl movements perpendicular to L direction. In terms of the combination of field characteristics and real trawl sizes, the number N cannot be less than 10^3 .

Obviously, when towing a trawl with an universal vessel of a traditional layout, the latter must make at least the same number of one-way voyages in order to ensure N movements of the trawl. It is significant that, due to the finite depth of the water area and the inclined orientation of the tow rope, the mileage of the vessel is greater than the distance the trawl moves. In addition, during each voyage of the towing vessel, it must turn in the opposite direction. Finally, the technology under

consideration is significantly complicated by the need to strictly combine each new trajectory of the trawl with the previous one.

Thus, the productivity of a single universal vessel at the stage of nodule extraction with a cassette trawl is fundamentally low.

A multi-modular transformer watercraft can be configured to maximize development of a field.

The model of the structure of the technological complex is presented in Pic. 3. The complex contains at least four basic modules located at the vertices of the rectangle with sides along the axes of the modules. The rectangle is located above the developed area of the nodule deposit, the relative position of the modules is fixed by spacer trusses. On two parallel sides of the complex above the spacer trusses shafts of winches moving the trawl are installed.

In the described structure of the complex, it seems advisable to use a twin (double-sided) trawl with two towed cables, as shown in Pic. 3. To transfer such a trawl to the oncoming trajectory, it is enough to shift the pulling cables

in the transverse direction (along the shafts of the pulling winches) approximately by the width of the intake part of the trawl.

The described layout of the complex provides extremely complete extraction of nodules from the area covered by the perimeter of the complex with minimal energy consumption, significantly less than when moving a trawl by a single vessel. Indeed, in the latter case, most of the consumed power is spent on moving the vessel itself, which is larger than the trawl by at least an order of magnitude. Accordingly, the effective area perceiving the velocity impact, and hence the power, is 2–3 orders of magnitude greater than the power consumed to move the trawl. In addition, each individual mileage of the towing vessel is always greater than the trajectory of the trawl itself, at least by the length of the tow rope tension.

Optimization of the number of module vessels forming the supports of the mining frame (depending on the perimeter of the scanned bottom surface) and the number of transporting and delivering modules (depending on the remoteness of the field and production volumes) seems to be a very simple task, and the proposed structural model of the complex, which is in its infancy, cannot be specified regarding its functioning by a computer model in the absence of data on the field.

3. Complex for production of liquefied natural gas (LNG)

With depletion and exhaustion of traditional powerful gas fields [5], relevance of developing hard-to-recover reserves (HRR) of gas, in particular, in relatively low-grade but numerous offshore natural gas fields, is constantly growing.

The work [5] describes in detail floating liquefied natural gas platform (Prelude FLNG), designed and built by Royal Dutch Shell corporation to develop a field on the shelf of Western Australia¹. The project can be considered, in fact, as a modification of a land plant located on a floating base. Currently, it is the largest of the existing floating facilities on Earth (displacement of 600 000 tons). In general, the design of the Prelude FLNG was developed for one specific field based on the

¹ See also <https://www.shell.com/about-us/major-projects/prelude-flng.html/> – *Ed. note.*

conditions of maximum productivity of its exploration and development of this field in the shortest possible period. It is not evident if the fundamental possibility of moving the plant to another field is confirmed by technical characteristics. In particular, the floating base of the plant itself does not have its own propulsion and can only be moved by tugboats. By combination of properties, the LNG floating plant is conditionally mobile and hardly movable to another field.

It is somewhat illogical for a monoblock plant to have systems consisting of a group of identical units operating in parallel (for example, three electric motors, seven Kawasaki marine boilers, six LNG storage tanks, etc.). Such a plant layout assumes besides system redundancy (at least theoretically) that its operation can be executed not at full capacity using only part of the systems that were not implemented in a single copy. When operating in a mode of lower productivity, the inseparable part of the «large» plant, probably might reduce the efficiency indicators of the entire complex.

It follows from the foregoing that while designing an efficient LNG floating plant to develop various fields, it is better not to follow the monoblock scheme.

The multi-modular watercraft proposed in this paper seems to be better option for a floating LNG plant designed for development of various fields, when a change of location is needed.

For direct comparison, the paper proposes a model of the structure of a multi-purpose multi-module transformer watercraft with a total displacement of 600 000 tons, that is, equal to that described in [5; 6], consisting of ten modules of 60 000 tons each. A separate module, which has four bearing rotors with a diameter of 35 m with an interaxial distance of 45–50 m (in the transverse direction) and 60 m (in the longitudinal direction), allows to get a vessel with the length of 515 m, and the width of 170 m.

Depending on the capacity of the field and the optimal required efficiency, LNG plant on a multi-module basis can consist of a different number of modules from a single to a maximum number (in this case, up to ten). When using a single module, the technology is completely analogous to operation of the plant [5; 6]. When using several modules, it is advisable to arrange them along a circuit covering the area of the



field so that the entire underwater (bottom) infrastructure is within this circuit.

Some comparative advantages of the plant on adaptable (to the field) floating base consisting of floating modules are obvious. Firstly, the use of a plant (enterprise) of capacity corresponding to the field's capacity eliminates unproductive costs of servicing unused parts of a «large» plant. Secondly, the use of a multi-modular floating base makes it possible to optimize the infrastructure of the underwater (bottom) part of the extracting complex.

It is generally impossible to quantify the reduction in operating costs, but taking the option of a field capacity decreasing from a certain initial value (in the range from 1 to 0) developed by a single floating plant, the cost reduction can be roughly estimated at 50 %.

Conclusions.

1. The paper suggests to use multi-modular transformer watercraft with vortex propulsion for the main areas of exploration of the World Ocean. It is shown that such watercrafts have significant advantages compared to traditional vessels when performing long-term (up to year-round) continuous scientific and technical projects in given water areas.

2. The main performance indicators for complexes based on modular vessels for fishing and processing of seafood, extracting deep-sea polymetallic nodules and LNG have been evaluated. It is shown that in all three considered processes, in comparison with traditional vessels, the specific energy, technological and labor costs are less. Comparison of a relatively obvious set of parameters allows to preliminarily estimate the reduction in transportation costs thanks to the transition from universal to modular vessels at 60–80 %, and labor costs for performing technological operations at no less than 50 %.

3. The indicated advantages of modular watercrafts are due to the optimal composition of the modules, which is determined on the basis of the model of the complex's functioning. In addition, the modular construction principle makes it possible to carry out individual technological operations (fishing and seafood production, transportation of finished products, etc.) by separate specialized modules of relatively low displacement, as well as to ensure the stay of the main technological module, which has a displacement comparable to

traditional vessels in a given water area, for almost unlimited time without regular unproductive return to the shore base.

Those conclusions can be specified, improved or complemented depending on further research in that field.

REFERENCES

1. Ostroukhov, N. N., Chumakova, E. V. Layout Diagrams of Water Vessels and Aircrafts with Vortex Propulsion Units. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 5, pp. 40–49.
2. Melnikov, A. V., Melnikov, V. N. Stock management of commercial fish and nature conservation: Study guide [*Upravlenie zapasami promyslovyykh ryb i okhrana prirody: Ucheb. posobie*]. Astrakhan, AGTU publ., 2008, 544 p.
3. Kirichenko, V. Yu., Kashirsky, A. S. Technology of mining ferromanganese nodules using a cassette trawl [*Tekhnologiya dobychi zhelezomargantsevykh konkretnykh pomoshchyu kassetochnogo trala*]. *Gidromekhanizatsiya. Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2015, Iss. 11, pp. 114–121.
4. Bazilevskaya, E. S. Research on iron-manganese ores of the ocean. [*Issledovanie zhelezo-margantsevykh rud okeana*]. *Trudy Geologicheskogo instituta*, 2007, Iss. 518, 189 p.
5. Skorenko, T. The largest vessel in the world [*Samiy bolshoy korabl v mire*]. *Populyarnaya mekhanika*, 2014, Iss. 6. [Electronic resource]: <https://www.popmech.ru/technologies/16058-probuzhdayushchiy-ktulku/#part0>. Last accessed 08.10.2019. Shell's massive Prelude hull world's biggest-ever floating vessel and first ocean-based LNG plant, Financial Post (3 December 2013). [Electronic resource]: <https://business.financialpost.com/commodities/energy/record-breaking-lng-ship-launched-bigger-one-planned>. Last accessed 08.10.2019.

Editorial comments:

The article now offered to our readers is dedicated to the statement of a sufficiently new problem and seems to be to some extent debatable. The approaches to modelling suggested for deliberation are at the initial stage of explicable general character, but further will certainly require deeper argumentation, and discussion on proposed algorithms and assumptions. Further consideration and detailed substantiation are needed regarding vortex engine, its traction, thrust features, efficiency, possibility to shape the engine in the form of a shell located on the ship's hull, linked to the driving motor. Based on the practices of application of modular principles of construction of complex systems, particularly in naval engineering, one should consider significant constraints of their implementation regarding navigability and seaworthiness, stability, sufficient resistance to flooding, pitching and rolling etc.; strength properties of multi-modular structure under all, comprising extreme, conditions; solution of multicriteria problem when optimization of a parameter may cause considerable deterioration of other parameters, up to complete nonoptimality of the whole design and structure; multiple redundancy of systems and units for secure operation of each module; economic efficiency of multi-modular structure.

At the same time, irrespective of the results of discussion, the statement of those rather new problems might by itself be helpful and initiate the search for efficient relevant solutions. ●



ЛОГИСТИКА И ПЕРЕВОЗКИ 130

Транспортировка малотоннажного СПГ: расчёты с использованием регрессионных соотношений.

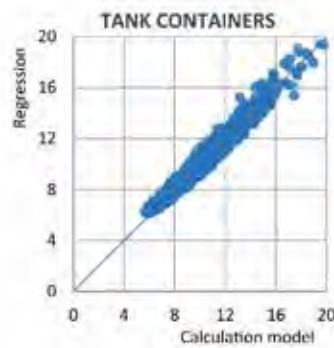


БИЗНЕС-АНАЛИТИКА 164

Методический инструментальный иерархического многоступенчатого факторного анализа: аналитические цепочки информационных панелей. Пример использования на сети железных дорог, перспективы – для других видов транспорта.

LOGISTICS AND TRANSPORTATION 148

Low-tonnage LNG transportation: cost estimations based on regression ratios.



BUSINESS ANALYTICS 175

Methodological toolkit for hierarchical multi-stage factor analysis: analytical chains of information panels and their application for railway network, as well as prospects for other modes of transport.





Расчётная оценка стоимости транспортировки малотоннажного СПГ



Олег ТАРОВИК



Ольга МУДРОВА

*Таровик Олег Владимирович — Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия.
Мудрова Ольга Михайловна — Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота, Санкт-Петербург, Россия*.*

Спрос на малотоннажные перевозки СПГ требует совершенствования логистического обеспечения. Оценка стоимости всех звеньев логистической цепочки является важной составляющей решения задачи оптимизации транспортных расходов как для потребителей, так и для поставщиков СПГ. В связи с ужесточением экологических требований к бункерному топливу особую актуальность получает задача оптимизации поставок СПГ для водного транспорта по стоимости транспортировки.

Целью исследования является разработка универсального подхода к оценке стоимости транспортировки малотоннажного СПГ для бункеровки судов в России.

В основу методологии исследования положен аналитический метод на базе системно-структурного подхода.

В рамках реализации ведомственного проекта Минпромторга России «Развитие газотоплив-

ного флота для навигации в прибрежных водах и на внутренних водных путях» авторами разработаны технико-экономические модели расчёта удельной стоимости перевозки СПГ автомобильным и водным транспортом. Для расчёта удельной стоимости перевозки СПГ железнодорожным транспортом использованы данные информационно-справочной системы «ТМкарта».

На основе модельных расчётов и данных системы «ТМкарта» были получены регрессионные соотношения, позволяющие определить стоимость перевозок для различных вариантов транспортно-технологических схем исходя из ограниченного набора параметров. Также был предложен подход для оценки стоимости перевалки СПГ. Проведена апробация регрессионных соотношений на расчётных маршрутах. В результате были сформулированы выводы о наиболее эффективных вариантах транспортировки СПГ.

Ключевые слова: СПГ, логистика, транспорт, удельная стоимость перевозок, статьи затрат, танк-контейнер, цистерна, регрессионные соотношения, автомобильный транспорт, внутренний водный транспорт.

*Информация об авторах:

Таровик Олег Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник самостоятельного сектора проектирования морских систем освоения шельфа ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия, tarovik_oleg@mail.ru.

Мудрова Ольга Михайловна – кандидат технических наук, заведующий отделом развития морского транспорта АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», Санкт-Петербург, Россия, MudrovaOM@cniimf.ru.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019, актуализирована 10.09.2019, принята к публикации 12.10.2019.

For the English text of the article please see p. 148.

В последние годы в России уверенно растёт спрос на малотоннажные перевозки сжиженного природного газа (СПГ). Это обусловлено как увеличением количества потребителей, так и необходимостью ограничения выбросов вредных веществ в атмосферу. Перспективы использования СПГ связаны с его применением в качестве топлива для различных судов и городского транспорта, а также для получения тепла и электроэнергии в населённых пунктах и на производственных объектах. Так, согласно оценкам авторов статьи, прирост объёмов производства малотоннажного СПГ за период с 2014 по 2018 год составил 88,9 тыс. т. Согласно оценкам [1, с. 163], в течение ближайших 15 лет установленная мощность мини-заводов СПГ в России превысит 5 млн т, то есть возрастет в 35 раз по сравнению с уровнем 2017 года. Помимо экологических причин, рост потребления СПГ обусловлен такими факторами, как невысокая стоимость газа по сравнению с другими энергоносителями, экономичный расход, а также наличие отработанных отечественных технологий для его производства. Всё это способствует благоприятному прогнозу развития отечественного рынка малотоннажного СПГ [2, 3].

В настоящее время во многих регионах России не развита инфраструктура, необходимая для транспортировки и хранения малотоннажного СПГ, её создание должно производиться практически с нуля. Известно, что СПГ может перевозиться различными видами транспорта: автомобильным, железнодорожным и водным. Причём для каждого вида транспорта возможны два альтернативных способа доставки: наливом или в танк-контейнерах [4–6]. Отсутствие готовых инфраструктурных решений и широкий спектр потенциально возможных логистических схем перевозки СПГ приводит к актуальности постановки и решения задач об определении оптимального облика транспортной системы и обосновании мест размещения производств СПГ. Такие задачи относятся к области стратегического логистического планирования и решаются в рамках формальной математической постановки, позволяющей находить оптимальную

логистическую схему для каждого сценария изменения грузопотоков и расположения мест производства и потребления СПГ. Логистическая схема может включать несколько видов транспорта и предусматривать промежуточную перевалку сжиженного газа, если это окажется экономически целесообразным. Поэтому оценка стоимости перевозки СПГ на автомобильном, железнодорожном и водном транспорте наливом и в танк-контейнерах является одним из ключевых аспектов практической реализации алгоритмов стратегического планирования.

Получение таких оценок затруднено тем, что отечественный рынок перевозок малотоннажного СПГ ещё только формируется и натурные данные о стоимости транспортировки практически недоступны.

Целью исследования является разработка технико-экономических моделей для определения интегральной эффективности системы бункеровки судов газовым топливом с учётом затрат на его доставку до портов назначения альтернативными видами наземного транспорта.

Для получения расчётных оценок стоимости перевозки СПГ использовались технико-экономические *методы* и модели, учитывающие различные технические, организационные и экономические особенности, актуальную для России нормативную базу, а также множественность технико-эксплуатационных параметров.

1. ОБЩИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СТОИМОСТИ ПЕРЕВОЗОК СПГ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТРАНСПОРТА

Для получения оценок стоимости перевозки малотоннажного СПГ на автомобильном и водном транспорте были созданы технико-экономические модели работы специализированного автотранспортного предприятия (САП) и специализированной судоходной компании (ССК), работающей на внутренних водных путях. Предполагается, что компании на постоянной основе осуществляют транспортировку СПГ наливом и в танк-контейнерах на выбранной линии. В качестве входных параметров каждой из моделей выступает грузопоток, дистан-



ция перевозок (пробег с грузом), а также комплекс технико-эксплуатационных и стоимостных параметров, позволяющих рассчитать суммарные затраты на транспортировку с учётом всех статей расходов. Особенности реализации этих моделей описаны далее. Для получения оценок стоимости перевозок СПГ на железнодорожном транспорте были использованы данные информационно-справочной системы «ТМкарта»¹, позволяющей выполнять расчёт провозной платы, взимаемой ОАО «РЖД» при перевозках по России, с учётом актуальной информации о транспортной и тарифной сети железных дорог, планов формирования грузовых поездов, единой тарифно-статистической и гармонизированной номенклатур грузов.

Однако прямое использование технико-экономических моделей в задачах логистического планирования достаточно неудобно, поскольку требует ввода и контроля большого количества локальных параметров и стоимостных показателей [7–11].

В случае с железнодорожными перевозками массовые запросы к системе «ТМкарта» существенно замедляют работу расчётных алгоритмов. Поэтому в настоящей работе на основе модельных расчётов и данных системы «ТМкарта» были получены регрессионные соотношения, позволяющие определить стоимость перевозок исходя из ограниченного набора параметров.

Для обеспечения актуальности создаваемых регрессионных зависимостей, которые включают стоимостные показатели на дату выполнения расчётов, структура этих зависимостей была сформирована таким образом, чтобы обеспечить возможность корректировки результатов на текущую дату с учётом инфляции, изменения цен на топливо, изменения стоимости транспортных средств и корректировки тарифов на железнодорожном транспорте.

Затраты C на перевозку СПГ для всех видов транспорта определяются по соотношению:

$$C = (c + c_t) \cdot t \cdot Q \cdot L_{\text{груз}}, \quad (1)$$

где c — удельная стоимость перевозок, руб./т·км;

c_t — удельная стоимость использования тары, руб./т·км;

Q — интенсивность перевозок, т/сут.;

$L_{\text{груз}}$ — дистанция с грузом (в одну сторону), км;

t — длительность периода перевозок, сут.

Удельная стоимость перевозок с определяется на основе регрессионных формул, при получении которых были приняты следующие диапазоны изменения грузопотока и дистанции:

$$20 < Q < 5000, \text{ т/сут.};$$

$$20 < L_{\text{груз}} < 2000, \text{ км.}$$

Необходимое для обеспечения интенсивности Q количество транспортных средств $N_{\text{тр}}$, а также требуемое количество единиц тары (танк-контейнеров или цистерн) $N_{\text{тары}}$ определяются по соотношениям:

$$N_{\text{тр}} = (Q \cdot T_{\text{круг}}) / (M_{\text{СПГ}} \cdot k_{\text{исп}});$$

$$N_{\text{тары}} = n_{\text{ед}} \cdot (N_{\text{тр}} + 2), \quad (2)$$

где $T_{\text{круг}}$ — длительность кругового рейса, сут.;

$M_{\text{СПГ}}$ — грузоподъёмность (по СПГ) транспортного средства (судна, газовева или контейнеровоза, железнодорожного состава), т;

$n_{\text{ед}}$ — количество единиц тары на одном транспортном средстве, шт.;

$k_{\text{исп}}$ — коэффициент использования транспортных средств в ходе периода перевозок, определяемый режимом рабочего времени и временем отдыха водителей, необходимостью обслуживания транспортных средств и т.п. (для автотранспорта принимается $k_{\text{исп}} = 0,49$, для прочих $k_{\text{исп}} = 1,0$).

Число $N_{\text{тары}}$ в формуле (2) определяется, исходя из предположения о том, что и в точке назначения, и в точке отправления имеются дополнительные комплекты тары, с которыми выполняются грузовые операции во время движения транспортных средств.

При расчёте удельной стоимости перевозок принимались следующие допущения:

1. Для удобства учёта налогов, страховых взносов, пошлин и различных нормативов в моделях САП и ССК в качестве периода для определения удельной стоимости принят один год. Расчёт значения c выполняется путём деления годовых затрат на суммарное количество перевезён-

¹ [Электронный ресурс]: <http://www.tmkarta.com/ru/about/long.php>.

ного груза и пробег с грузом. Изменение длительности периода перевозок, которое в формуле (1) моделируется параметром t , не приводит к значимому изменению удельного показателя c .

2. Расчёты всех затрат выполнены в ценах октября 2018 года.

3. Поскольку организации, задействованные в цепочке поставок СПГ, как правило, являются крупными, они обязаны применять общую систему налогообложения и являются плательщиками НДС. Известно, что эти организации могут возмещать уплачиваемый (входящий) НДС от своих поставщиков. Поэтому при калькулировании себестоимости работ/услуг расходы по соответствующим статьям затрат учитываются с НДС. Привлечение кредитных средств не предполагается.

4. При транспортировке СПГ наливом на автомобильном и водном транспорте стоимость ёмкостей, в которых перевозится газ, учитывается в удельной стоимости перевозок c , поскольку такие ёмкости являются неотъемлемой частью транспортных средств. В случае же контейнерных перевозок стоимость контейнеров не включается в транспортные затраты, а учитывается в составе c_t .

5. При перевозке СПГ по железной дороге стоимость вагонов-цистерн и танк-контейнеров не учитывается в удельной стоимости перевозок c , а должна быть рассчитана отдельно как удельная стоимость тары c_t . Это обусловлено тем, что у ОАО «РЖД» в настоящее время практически отсутствуют собственные мощности по перевозке СПГ [1, с. 94].

6. При определении удельной стоимости перевозок характеристики транспортных средств не варьируются, то есть принимаются конкретные типы автоцистерн, танк-контейнеров и железнодорожных цистерн, которые являются наиболее распространёнными и доступными в современных условиях. В качестве судов-перевозчиков СПГ принимаются суда внутреннего плавания с максимальными измерениями, допустимыми по ограничениям единой глубоководной системы (ЕГС).

Для определения наиболее влияющих факторов в моделях САП и ССК был проведён анализ чувствительности каждой

модели, при котором переменные варьировались в характерном для них диапазоне. Переменные, которые оказывают наибольшее влияние, были включены в число параметров регрессионных формул для определения параметра c . Помимо затрат на перевозку далее приводятся сведения о длительности всех звеньев цепочки поставки газа, включая длительность грузовых операций.

Для сравнения всех возможных вариантов доставки малотоннажного СПГ необходимо оценить удельную стоимость использования тары c_t . Существует множество организационных схем владения грузовыми ёмкостями (покупка нового и бывшего в употреблении оборудования, аренда, лизинг), при которых затраты существенно различаются и рассчитываются по-разному. В настоящей работе применён упрощённый подход, в рамках которого при расчёте c_t учитываются только затраты на амортизацию и техническое обслуживание тары:

$$c_t = (k_{\text{обсл}} \cdot C_{\text{тары}} \cdot N_{\text{тары}}) / (T_{\text{сл}} \cdot T_{\text{эксп}} \cdot Q \cdot L_{\text{груз}}), \quad (3)$$

где $C_{\text{тары}}$ — стоимость единицы тары, руб.;

$T_{\text{сл}}$ — срок службы тары, лет;

$k_{\text{обсл}}$ — коэффициент, определяющий уровень годовых расходов на техническое обслуживание и ремонт грузовой ёмкости (для вагона-цистерны принимается $k_{\text{обсл}} = 1,05$, для танк-контейнеров $k_{\text{обсл}} = 1,07$);

$T_{\text{эксп}}$ — количество дней работы транспортных средств в течение года, на которые приходится амортизация тары, сут.

Далее при выполнении расчётов принимаются следующие допущения:

- стоимость танк-контейнера типа КЦМ 40/0,7 по данным производителя² составляет 9 952 000 руб.;

- стоимость вагона-цистерны 15–5106 принята путём корректировки данных [1, с. 94] на дату расчётов и составляет 17 700 000 руб.;

- $T_{\text{сл}} = 20$ лет; $T_{\text{эксп}} = 365$ сут. для железнодорожного транспорта, $T_{\text{эксп}} = 240$ сут. для автотранспорта и равняется периоду навигации ($T_{\text{н}}$) в случае водного транспорта;

- $N_{\text{тары}}$ определяется по формулам (2).

² [Электронный ресурс]: <http://www.cryont.ru/company/bas/store>.



Порядок расчёта расходов по статьям затрат для автомобильных перевозок СПГ

Статья затрат	Порядок расчёта
Заработная плата:	
– водители	средняя по региону для категории водительских прав С, СЕ по вакансиям, опубликованным на сайте www.avito.ru .
– административно-управленческий персонал	средняя по региону для необходимого перечня должностей по вакансиям, опубликованным на сайте www.avito.ru (численность принимается в диапазоне 10–15 % от числа водителей, но не менее четырёх человек).
Страховые взносы:	
– пенсионное, социальное и медицинское страхование	в соответствии с установленными тарифами и базой для начисления страховых взносов в 2018 году (ст. 425, 426 Налогового кодекса РФ).
– травматизм	в зависимости от класса профессионального риска страхователя, установленного в соответствии с ОКВЭД 249.41.1.
Топливо и смазочные материалы:	
– расход	в соответствии с Нормами расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте (распоряжение Минтранса РФ № АМ-23-р от 14.03.2008 г. в редакции от 14.07.2015 г.).
– цена дизельного топлива	средняя цена по региону по данным сайта www.benzin-price.ru .
– цена смазочных материалов	подбор марок смазочных материалов выполняется с помощью портала oil2.ru , исходя из технических характеристик тягача и цен на смазочные материалы по сайту www.auto.ru .
Техническое обслуживание (ТО) и эксплуатационный ремонт	по видам технического обслуживания согласно ГОСТ 21624-81, расходы приняты в размере 3 % от стоимости транспортных средств.
Износ и ремонт шин:	
– норма пробега шин	в соответствии с методикой РД 3112199-1085-02, утверждённой Минтрансом.
– цена шины	в зависимости от марки шин для тягачей и полуприцепов для всесезонных моделей по сайту www.auto.ru .
– стоимость шиномонтажа	скадывалась из расходов на снятие/установку, балансировку и утилизацию шин согласно прайсам, опубликованным на профильных сайтах.
Амортизация подвижного состава	в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 01.01.2002 г. № 1 (в ред. от 28.04.2018 г.) «О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» и ст. 259.1 2 части Налогового кодекса РФ.
Система «Платон»	в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.11.2015 г. № 1191 в ред. от 28.06.2018 г., п. 4, ст. 31.1 Федерального закона от 08.11.2007 г. № 257-ФЗ.
Прочие расходы	включают расходы на мойку, стоянку, оснащение, предрейсовые и послерейсовые технические осмотры и техосмотры для получения диагностической карты транспортных средств, полисы ОСАГО, пошлины за постановку транспортных средств на учёт, медосмотры и экипировку водителей, аренду офисов, обучение персонала, банковское обслуживание; приняты в размере 3 % от суммы расходов по основным статьям затрат.

2. АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

При моделировании перевозок СПГ автомобильным транспортом учитываются требования ДОПОГ (Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов [12]), Правил перевозок грузов автомобильным транспортом и ряда других нормативных документов и регламентов, обязывающих перевозчика

выполнять специальные требования по перевозке опасных грузов и нести соответствующие расходы. Получаемая расчётная сумма расходов корректируется на величину рентабельности деятельности автомобильного грузового транспорта, равную 4 % [13].

Время кругового рейса автопоезда определяется как функция от дистанции пере-



Рис. 1. Структура затрат автотранспортного предприятия при базовых условиях.

возок с использованием регрессионной зависимости, полученной на основе обработки 95 маршрутов с помощью сервиса «Яндекс.Карты». При этом учитывается максимальное время движения по кратчайшему маршруту без использования платных скоростных участков трасс и исходя из отсутствия пробок на маршруте и в местах погрузки/разгрузки. В длительности кругового рейса также учитывается продолжительность грузовых операций, однако она мала (до 2,5 часов) и не оказывает значимого влияния на результаты. При расчёте количества рейсов, выполняемых водителями за рабочую смену, выполняется проверка соблюдения требований, установленных Приказом Минтранса России от 20.08.2004 г. № 15, когда при суммированном учёте рабочего времени водителей время управления автомобилем одним водителем за неделю не может превышать 56 часов. Перевозки производятся круглогодично.

Поскольку в России при автомобильных перевозках СПГ наливом в основном используются автоцистерны объёмом около 50 м³, вмещающие до 20 т СПГ [14], в качестве цистерны был выбран газовоз GT7 СПГ ППЦТ-52³ грузоподъёмностью 18,14 т. Для контейнерной перевозки СПГ был выбран танк-контейнер КЦМ-40/0,7⁴ грузоподъёмностью 14,28 т, который соответствует размерам стандартного 40-футового контейнера. В соответствии с техническими характеристиками грузовых ёмко-

стей были подобраны модели седельного тягача и полуприцепа-контейнеровоза.

Основные источники данных, использованные нормативные документы и порядок расчёта по основным статьям затрат, представлены в табл. 1.

На рис. 1 представлено соотношение статей затрат на транспортировку для условий, которые далее именуются «базовыми» и определяются следующими параметрами: интенсивность перевозок — 500 т/сут., дистанция — 500 км, стоимость топлива — 48 руб./л, стоимость тягача/цистерны/полуприцепа — 7,5/8,66/2,35 млн руб. соответственно, одинаковый пробег с грузом и в порожнем состоянии, зарплата водителей/менеджеров — 64/52 тыс. руб. в месяц. Видно, что отличия структуры затрат на перевозку в автоцистернах и танк-контейнерах незначительны и определяются, главным образом, различиями в грузоподъёмности ёмкостей, числе водителей и стоимости подвижного состава.

Удельная стоимость перевозок при базовом сценарии для автоцистерн и танк-контейнеров составляет 7,6 и 6,9 руб./т • км без учёта НДС. При принятой грузоподъёмности автопоездов это эквивалентно 138 и 99 руб./км. Учёт стоимости танк-контейнеров на основе формул (2) и (3) не приводит к большому удорожанию перевозок, поскольку потребное число танк-контейнеров невелико. Так, при базовых условиях необходимо 47 танк-контейнеров. Это приводит к увеличению удельной стоимости перевозок с 6,9 до 7,3 руб./т • км ($c_t = 0,4$ руб./т • км) или до 104 руб./км.

Расчётные данные можно сравнить с имеющимися данными о стоимости пе-

³ [Электронный ресурс]: <http://gt7.ru/catalog-tr/transportirovshchiki-spg/spg-pptst-52/>.

⁴ [Электронный ресурс]: <http://www.cryont.ru/production/>.



Таблица 2

Регрессионные коэффициенты

Коэффициент	Танк-контейнеры	Автоцистерны
a_1	0,024	0,032
a_2	2,501	2,055
a_3	0,018	0,011
a_4	36,20	38,02
a_5	-0,486	-0,548
a_6	0,119	0,096
a_7	0,738	0,702
a_8	2,598	2,771

ревозок на автотранспорте. При этом необходимо отметить, что в зависимости (1) учитывается только пробег с грузом, тогда как традиционно тарифные ставки на автотранспорте включают также и порожний пробег. Учитывая, что в рассмотренном примере порожний пробег равен пробегу с грузом, разделим полученные значения на 2 и получим следующие оценки указанных ранее стоимостей: 69, 50 и 52 руб./км.

Эти значения можно сопоставить с прайсом компании ООО «ТрансАвтоЦистерна» [15], выполняющей перевозки в автоцистернах по цене от 50 руб./км, и данными портала «АвтоПравозащита.Ру» [16], где стоимость грузоперевозок тягачами оценивается в 55–155 руб./км, а стоимость перевозок обычных грузов автосоставами грузоподъемностью 20 т на большие дистанции варьируется от 30 до 57 руб./км. Сравнение полученных данных позволяет заключить, что перевозки СПГ находятся в верхней ценовой категории, но не выходят за диапазон значений, характерных для автотранспорта.

Далее был выполнен анализ чувствительности модели САП, который показал, что наибольшее влияние на величину c оказывают: дистанция перевозок (0,93), цена топлива (0,48) и доля порожнего пробега (0,33). В скобках указаны значения условного коэффициента, характеризующего степень влияния каждого фактора. Опираясь на эти данные, после выполнения серии массовых численных экспериментов с моделью САП, была получена следующая регрессионная зависимость для определения удельной стоимости перевозок на автотранспорте:

$$c_{\text{авто}} = k_p \cdot (c_{\text{гсм}} + c_{\text{пр}} \cdot k_{\text{ц}}), \quad (4)$$

где $c_{\text{гсм}}$ — удельные затраты на дизельное топливо и смазочные материалы;

$c_{\text{пр}}$ — прочие удельные затраты;

$k_{\text{ц}}$ — коэффициент индекса потребительских цен на товары и услуги, принимаемый по данным Федеральной службы государственной статистики [17], исходя из того, что настоящие расчётные показатели получены в октябре 2018 года;

$k_p = 1,04$ — коэффициент, учитывающий рентабельность перевозок.

Удельные затраты в формуле (4) определяются по следующим соотношениям:

$$c_{\text{гсм}} = a_1 \cdot (L_{\text{пор}}/L_{\text{груз}} + a_2) \cdot c_{\text{топл}}; \quad (5)$$

$$c_{\text{пр}} = [(a_3 \cdot Q + a_4)(L_{\text{груз}})^{a_5 \cdot Q^{a_6}} + a_7] \cdot (L_{\text{пор}}/L_{\text{груз}} + a_8), \quad (6)$$

где $L_{\text{пор}}$ — порожний пробег, км (принимается $L_{\text{груз}} \leq L_{\text{пор}} \leq 2 \cdot L_{\text{груз}}$);

$c_{\text{топл}}$ — стоимость топлива, руб./л (произвольный диапазон значений);

a_1 – a_8 — регрессионные коэффициенты, принимаемые по табл. 2.

Отметим, что при построении зависимостей (5) и (6) принимался следующий диапазон возможных цен на топливо: $40 < c_{\text{топл}} < 90$. Поскольку формула (5) аппроксимирована с нулевыми погрешностями, что объясняется линейностью модели для определения расходов на топливо, в практических расчётах цена топлива может принимать значения от 0 до 1000 руб./л, не приводя к росту погрешностей зависимости (5). Отметим, что в стоимости перевозок, определяемой по формуле (6), не учитывается стоимость контейнерного парка.

Длительность кругового рейса $T_{\text{авто}}$ с учётом длительности грузовых операций составляет:

$$T_{\text{авто}} = 0,0127 \cdot (L_{\text{груз}} + L_{\text{пор}}) + 2,5, \text{ час.} \quad (7)$$

Стандартное отклонение (S) зависимости составляет 0,8 часа, коэффициент детерминации (R^2) равен 0,989, что говорит о высокой степени адекватности линейной модели. Средняя относительная ошибка аппроксимации (A) составляет 8 %, снижаясь с 25–40 % при коротких рейсах (менее 100 км) до 1–3 % при дальних дистанциях (более 1000 км).

Для анализа погрешностей регрессионной формулы (4) по сравнению с расчётами по технико-экономической модели САП был применён следующий подход.

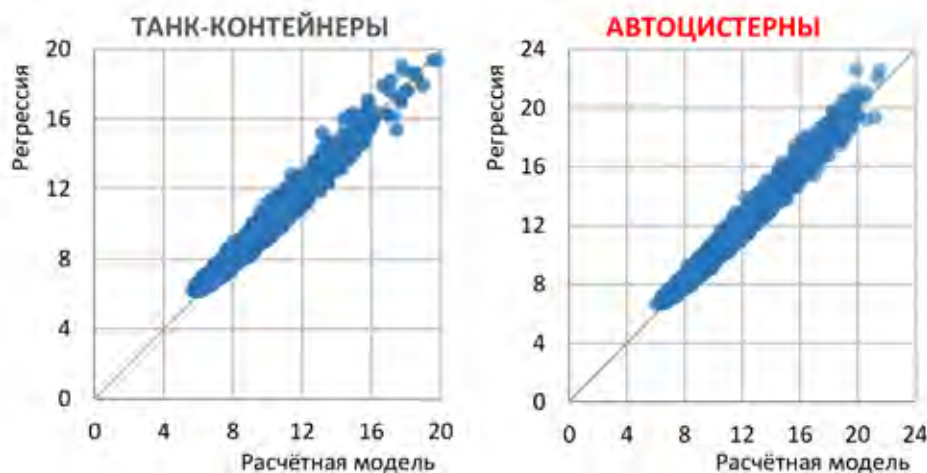


Рис. 2. Соответствие регрессионных значений и результатов расчётной модели САП.

Выполнялся массовый численный эксперимент (30 000 прогонов), в ходе которого на вход модели каждый раз подавался набор всех её параметров, причём каждый параметр был случайным образом выбран из допустимого диапазона значений. Границы диапазонов определялись на основе характерного для текущего времени размаха варьирования различных стоимостных показателей, например, стоимость тягача изменялась от 6,0 до 9,0 млн руб., цена шины — от 18 до 27 тыс. руб., зарплата водителя — от 50 до 80 тыс. руб. в месяц. Параметры регрессионной модели задавались случайным образом наряду с другими параметрами модели. Такой подход обеспечивает комплексную проверку адекватности регрессионной модели и степень учёта ею влияния различных факторов. Полученная картина соответствия регрессионных и модельных значений показана на рис. 2.

Полученные параметры точности регрессионной модели (4) свидетельствуют о её пригодности для выполнения практических расчётов:

- танк-контейнеры $S=0,271$ руб./т • км, $A=2,3\%$, $R^2=0,977$;
- автоцистерны $S=0,275$ руб./т • км, $A=2,1\%$, $R^2=0,983$.

3. ВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ

В основу расчётной модели ССК положена методика АО «ЦНИИМФ» [18], но при этом учтена специфика перевозимого груза и повышенные требования к безопас-

ности, квалификации персонала, техническому оснащению судна и т.п. Логика расчётов затрат при работе судна на линии аналогична логике, используемой в модели САП: вначале определяются суммарные годовые затраты (в навигационный и межнавигационный периоды), затем выполняется их корректировка на величину рентабельности и рассчитывается удельный показатель c .

В качестве расчётных судов для перевозки СПГ были выбраны суда с максимальными размерами по ограничениям ЕГС, так как такие суда будут иметь наибольшую экономическую эффективность. Поскольку построенных газовозов СПГ для работы на внутренних водных путях (ВВП) в настоящее время не существует, для перевозки наливом был принят проект газовоза вместимостью 7100 м³ (100 %), способный перевозить 2500 т СПГ. Основные характеристики судна были получены с использованием данных по газовозу проекта 23070 для перевозки сжиженного нефтяного газа [19]. Стоимость подобного газовоза СПГ оценивается в 32 млн долл. В качестве расчётного судна для контейнерных перевозок было выбрано универсальное судно с характеристиками, близкими к проекту RSD19 [20]. Его стоимость оценивается в 18 млн долл. Поскольку перевозка СПГ-контейнеров возможна только на открытой палубе [21], загрузка судна составляет всего 35 контейнеров типа КЦМ-40/0,7, вмещающих 500 т СПГ, что существенно ухудшает экономические



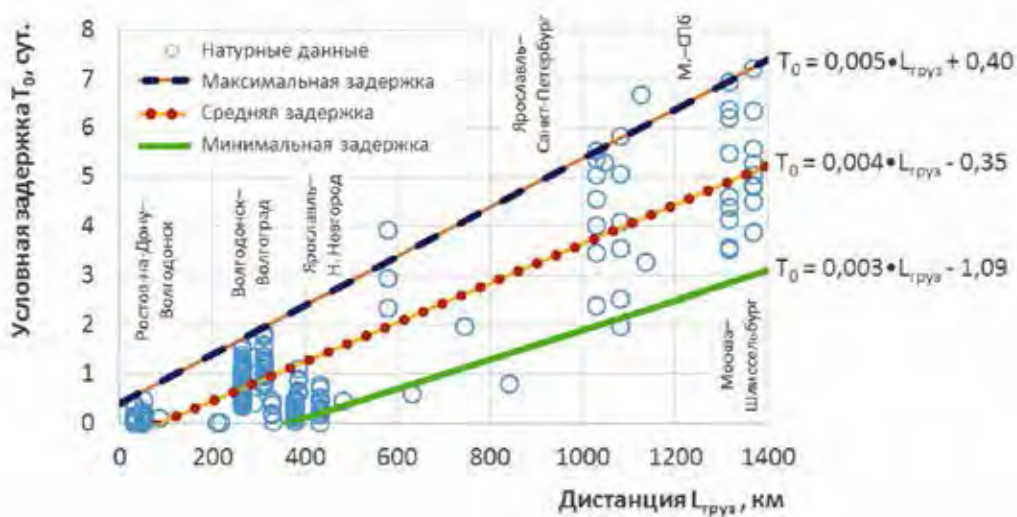


Рис. 3. Условная задержка судна в рейсе при движении по ЕГС.

показатели такой транспортной схемы. Для определённости при расчётах стоимости доставки контейнеров водным транспортом не учитывалась возможность перевозки попутных грузов в трюмах судна.

Важной особенностью эксплуатационной модели судна-газовоза является то, что время рейса рассчитывается не по предопределённой формуле, а является параметром, который может варьироваться. Это обусловлено тем, что задержка судна на ВВП, вызванная шлюзованием, различными навигационными ограничениями и метеоусловиями, сильно зависит от региона перевозок и оказывает существенное влияние на экономическую эффективность всей системы, поэтому должна учитываться отдельно. Для этого в модели полагается, что судно движется по ВВП с наибольшей эксплуатационной скоростью, характерной для реальных рейсов, а прочее время находится в режиме ожидания (простоя). Для получения оценок длительности реальных рейсов судов на ЕГС был выполнен анализ данных АИС-мониторинга движения 14 судов смешанного плавания, совершавших в 2018 году рейсы между 22 портами, расположенными на водных путях от Азова до Санкт-Петербурга (всего 260 рейсов). Данные были приобретены у компании Marinetransport⁵. В ходе

анализа определялось время между сигналами о выходе из одного порта и прибытием в другой порт. Затем из полученного времени вычиталось условное ходовое время, определённое в предположении, что судно движется с максимальной средней рейсовой скоростью, которая, согласно имеющимся данным, составляет 18 км/ч. Полученная условная задержка судна в рейсе показана на рис. 3 как функция от расстояния между портами (некоторые маршруты подписаны). На рисунке также приведены параметры линейной функции, характеризующей максимальную расчётную задержку, среднюю задержку в рейсе и наименьшие натурные значения задержки.

Средняя длительность кругового рейса судна $T_{\text{водн}}$ при принятом условии равенства дистанций с грузом и в балласте ($L_{\text{груз}} = L_{\text{порт}}$) может быть определена по выражению:

$T_{\text{водн}} = 2 \cdot (L_{\text{груз}} / 18 + T_{\text{порт}} + 24 \cdot T_0)$, час, (8)
где T_0 — средняя длительность условной задержки судна (движение в одну сторону), сут.;

$T_{\text{порт}}$ — средняя длительность операций в одном порту, учитывающая погрузочно-разгрузочные работы и вспомогательные операции, час.

В качестве средних значений в модели принято: $T_{\text{порт}} = 5,8$ ч. — для танк-контейнеров, $T_{\text{порт}} = 9,3$ ч. — для судовых танков.

Необходимо отметить, что представленная схема расчёта $T_{\text{водн}}$ является доста-

⁵ [Электронный ресурс]: <https://www.marinetraffic.com>.

**Порядок расчёта расходов по статьям затрат для перевозок
СПГ на внутреннем водном транспорте**

Статья затрат	Порядок расчёта
Содержание экипажа:	
– заработная плата	ФОТ формируется в соответствии с рекомендациями Международной Федерации работников транспорта на основании действующего в настоящее время Договора общей стоимости экипажа.
– рацион питания	Оценивается на базе Постановления Правительства РФ от 07.12.2001 г. № 861 «О рационах питания экипажей морских, речных и воздушных судов» и Приказа Минтранса России от 30.09.2002 г. № 122 «О порядке обеспечения питанием экипажей морских, речных и воздушных судов».
Страховые взносы	0 % до 2027 года согласно пп. 4, п. 1–2, ст. 427 Налогового кодекса РФ.
Топливо и смазочные материалы:	
– расход топлива	Рассчитывается в зависимости от СЭУ и режимов работы судна (на ходу, на стоянке с грузовыми операциями или без них).
– цена топлива	Определяется на основе данных информационно-аналитических изданий в базовом порту.
– цена смазочных материалов	4 % от соответствующих расходов на топливо.
Техническая эксплуатация:	
– материалы и снабжение	0,1 % от стоимости судна.
– текущий ремонт	0,25 % от стоимости судна.
– средний ремонт	3 % от стоимости судна (ремонт выполняется 1 раз в 5 лет).
Страхование	Нормативная ставка расходов на страхование определяется в процентах от стоимости судна в год статистическим методом по базе данных страховых компаний.
Амортизация	В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 01.01.2002 г. № 1 (в ред. от 28.04.2018 г.) «О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» и ст. 259.1 2 части Налогового кодекса РФ.
Прочие расходы	Включают расходы на радиосвязь и навигацию, банковское обслуживание, охрану труда и технику безопасности, подготовку профессиональных кадров; приняты в размере 5 % от суммы постоянных затрат.
Межнавигационные расходы	Определяются расходами на содержание экипажа и топливными расходами на стоянке без ГО.
Регистрация и ежегодное подтверждение регистрации в РМРС	Регламентируются п. 1, пп. 108–109 Налогового кодекса РФ.

точно условной. В частности, средняя скорость движения судна по реке существенно отличается от скорости в 18 км/ч, которая достигается только на участках рек без шлюзов или на водохранилищах. По результатам обработки около 10 тыс. значений мгновенной скорости судна, находящегося в режиме движения в произвольных точках ЕГС, было установлено, что средняя мгновенная скорость составляет 11,5 км/ч, стандартное отклонение $S = 3,2$ км/ч. Однако для обеспечения

возможности моделирования «быстрой» доставки СПГ в модели принимается скорость движения 18 км/ч. Кроме этого, согласно натурным данным, среднерейсовые скорости по течению и против течения различаются на 0,8–1,2 км/ч. Однако поскольку судно, работая на линии, движется как в прямом, так и обратном направлениях, этой разницей было решено пренебречь.

Основные источники данных, использованные нормативные документы и поря-





Рис. 4. Структура затрат на содержание судов при перевозке СПГ.

док расчёта расходов по статьям затрат представлены в табл. 3.

На рис. 4 показано соотношение статей затрат при базовых условиях: дистанция — 500 км, задержка на линии (в одну сторону) — 1,65 сут., стоимость топлива — 25 тыс. руб./т, длительность периода навигации — 215 сут., цена газове/контейнерове составляет 2050/1100 млн руб., средняя зарплата командного/рядового состава равна 80/38 тыс. руб. в месяц, численность экипажа на газове/контейнерове составляет 16/12 человек. Как видно, основные отличия в структуре затрат обусловлены количеством судов и разницей в их стоимости, что определяет размер затрат на топливо и амортизацию судов.

Удельная стоимость перевозок при базовых условиях составляет 12,7 руб./т • км для танк-контейнеров (без учёта их стоимости) и 4,2 руб./т • км для наливного способа перевозки. Если в случае автомобильного транспорта стоимость контейнерного парка практически не сказывается на стоимости перевозок, поскольку из-за высокой скорости доставки число контейнеров невелико, то в случае водного транспорта учёт этого фактора приводит к существенному удорожанию. Так, при базовых условиях необходимы 283 контейнера, что приводит к росту удельной стоимости перевозок на 2,8 руб./т • км (с 12,7 до 15,5 руб./т • км).

Анализ чувствительности модели ССК выполнялся аналогично модели САП. Было выявлено, что доминирующее влияние на удельную стоимость c оказывает дистанция перевозок (6,58). Другими сильно влияющими факторами является задержка судна на линии (0,68), длительность

навигации (0,39), цена судна (0,30) и стоимость топлива (0,17). Интенсивность перевозок не оказывает никакого влияния, то есть абсолютные затраты, прямо пропорциональны объёму перевозок. Это связано с тем, что все затраты, кроме затрат на топливо, в модели ССК принимаются в долях от стоимости судна. Существенное влияние длительности периода навигации обусловлено тем, что полезная работа судна происходит только в навигацию, соответственно все годовые затраты должны быть компенсированы именно в этот период. Опираясь на этот анализ, структура регрессионной зависимости была подобрана таким образом, чтобы учесть два основных ценообразующих фактора — стоимость судна и цену топлива и не вводить никакие другие параметры, учитывающие инфляцию. Удельная стоимость перевозок СПГ водным транспортом определяется по соотношению:

$$c_{\text{водн}} = k_p \cdot (c_{\text{гсм}} + c_{\text{пр}}), \quad (9)$$

где $c_{\text{гсм}}$ — удельные затраты на топливо и смазочные материалы;

$c_{\text{пр}}$ — прочие удельные затраты;

$k_p = 1,035$ — коэффициент, учитывающий рентабельность перевозок.

Составляющие стоимости в формуле (9) определяются по следующим соотношениям:

$$c_{\text{гсм}} = [(T_0 + b_1)/L_{\text{груз}} + b_2] \cdot c_{\text{топл}}; \quad (10)$$

$$c_{\text{пр}} = b_3 \cdot [(b_4 - T_n^{b_5}) \cdot (c_c + b_6) \cdot (T_0 + b_7) / L_{\text{груз}} + (T_0 + 1)^{b_8} + b_9 \cdot c_c], \quad (11)$$

где T_n — длительность навигации, принимаемая в диапазоне от 180 до 365 сут.;

T_0 изменяется в диапазоне от 0 до $T_{0\text{max}} = 0,005 \cdot L_{\text{груз}} + 0,4$;

$L_{\text{груз}}$ — дистанция перевозок (рейс судна с грузом), км;

$c_{\text{топл}}$ — стоимость топлива, тыс. руб./т (произвольный диапазон значений);

c_c — стоимость судна, млн руб. (произвольный диапазон значений);

b_1-b_9 — регрессионные коэффициенты, принимаемые по табл. 4.

В модели принималось, что дистанция плавания судна в балласте равна дистанции с грузом. Анализ погрешностей регрессионной формулы (9) выполнялся так же, как и для модели САП. Диапазоны варьирования различных показателей следующие: стоимость газовоза 1630–2400 млн руб., стоимость контейнеровоза 890–1200 млн руб., зарплата командного состава 1200–1800 долл. в месяц, рядового состава — 450–900 долл. в месяц, курс доллара 50–100 руб./долл.; длительность навигации 180–365 дней.

Соответствие регрессионных и модельных значений показано на рис. 5, который демонстрирует достаточно высокую точность регрессионной модели, имеющей следующие показатели:

- танк-контейнеры $S = 0,538$ руб./т • км, $A = 4,2 \%$, $R^2 = 0,985$;
- судовые танки $S = 0,256$ руб./т • км, $A = 5,0 \%$, $R^2 = 0,980$.

4. ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ

Для получения значений удельной стоимости доставки СПГ железнодорожным транспортом были использованы данные системы «ТМкарта». Опираясь на заданные

Таблица 4

Регрессионные коэффициенты

Коэффициент	Танк-контейнеры	Судовые цистерны
b_1	2,0638	0,7639
b_2	0,0773	0,0091
b_3	1,3957	0,4726
b_4	5,5701	3,8432
b_5	0,2808	0,2180
b_6	157,35	130,01
b_7	0,2206	0,3704
b_8	-0,0861	-0,1063
b_9	0,0014	0,0008

в формуле (1) диапазоны изменения дистанции и интенсивности перевозок, была сформирована расчётная матрица, включающая 44 маршрута и 21 значение суточной интенсивности перевозок. Маршруты выбирались таким образом, чтобы обеспечить изменение дистанции с шагом в 50 км, причём география перевозок охватывала всю европейскую часть России. Интенсивность перевозок также изменялась с постоянным шагом в 250 т/сут. Далее для каждого сочетания маршрута и грузопотока определялись значения тарифной ставки и времени движения для наливных и контейнерных перевозок на малой (грузовой) и большей скоростях.

Плата за перевозку грузов по железной дороге исчисляется за расстояние, определяемое в соответствии с Тарифным руководством № 4, поэтому $L_{\text{груз}}$ принимается равным тарифному расстоянию. Тарифы на перевозку по железной дороге включают плату за пробег гружёных и порожних вагонов с локомотивом и стоимость услуг по

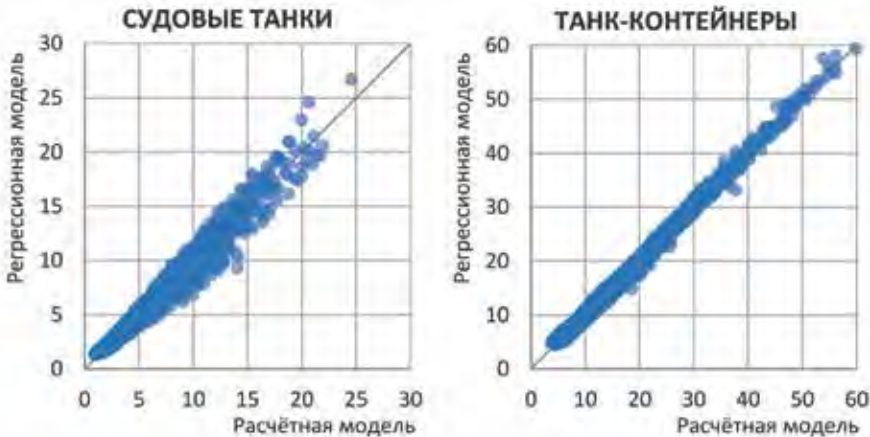


Рис. 5. Соответствие регрессионных значений и результатов расчётной модели ССК.

Таблица 6

Регрессионные коэффициенты

Коэффициент	Танк-контейнеры	Цистерны
e_1	0,1222	0,0454
e_2	0	-64,302
e_3	0	-1,0307
e_4	-7,0141	0,0071
e_5	0,0495	-1,0231
e_6	244,02	106,70
e_7	-0,8709	-0,6673
e_8	0	0,0016
e_9	-16,303	-20,309
e_{10}	0,0347	0,0093
e_{11}	18,811	21,981

использованию инфраструктуры ОАО «РЖД», тогда как плата за грузовые операции должна рассчитываться отдельно. В качестве подвижного состава в расчётах были использованы вагон-цистерна для перевозки СПГ и этилена модели 15–5106 грузоподъёмностью 23,56 т (наливные перевозки), а также четырёхосная фитинговая платформа для перевозки большегрузных контейнеров и контейнер-цистерна модели КЦМ-40/0,7 (контейнерные перевозки). Габариты и посадочные размеры КЦМ-40/0,7 позволяют перевозить по два гружёных танк-контейнера на одной платформе [22, 23]. Количество вагонов в железнодорожном составе принято равным 75, то есть один состав перевозит либо 75 вагонов-

цистерн, либо 150 танк-контейнеров СПГ. Принадлежность платформы указывалась в системе «ТМкарта» как «общий парк», а вагонов-цистерн и танк-контейнеров – как «собственный парк», то есть ни цистерны, ни контейнеры не учитываются в стоимости перевозок.

Анализ полученных данных показал, что факторами, определяющими стоимость перевозок, являются три параметра: грузопоток, дистанция и срочность доставки. Это позволило сформировать следующие зависимости для определения удельной стоимости перевозок СПГ:

$$c_{ж.д.} = k_{6с} \cdot \left[e_1 \cdot Q^{e_2} \cdot L_{г\text{руз}}^{e_3} / \left(L_{г\text{руз}}^{e_4} + e_5 \right) + e_6 \cdot L_{г\text{руз}}^{e_7} \right], \quad (12)$$

где $k_{6с}$ – коэффициент скорости доставки, определяемый по соотношению:

$$k_{6с} = \begin{cases} 1, & \text{малая скорость;} \\ e_8 \cdot \ln(Q) + e_9 \cdot \ln(L_{г\text{руз}})^{e_{10}} + e_{11}, & \text{большая скорость;} \end{cases}$$

a_1 – a_9 – регрессионные коэффициенты, принимаемые по табл. 6.

Несмотря на случайный характер выбора расчётных маршрутов на территории России, удельная стоимость перевозок аппроксимируется с достаточно высокой точностью, что говорит о стабильности удельного показателя в целом. Показатели точности регрессионной модели (12) следующие:

- танк-контейнеры $S = 0,089$ руб./т • км, $A = 1,4 \%$, $R^2 = 0,999$;

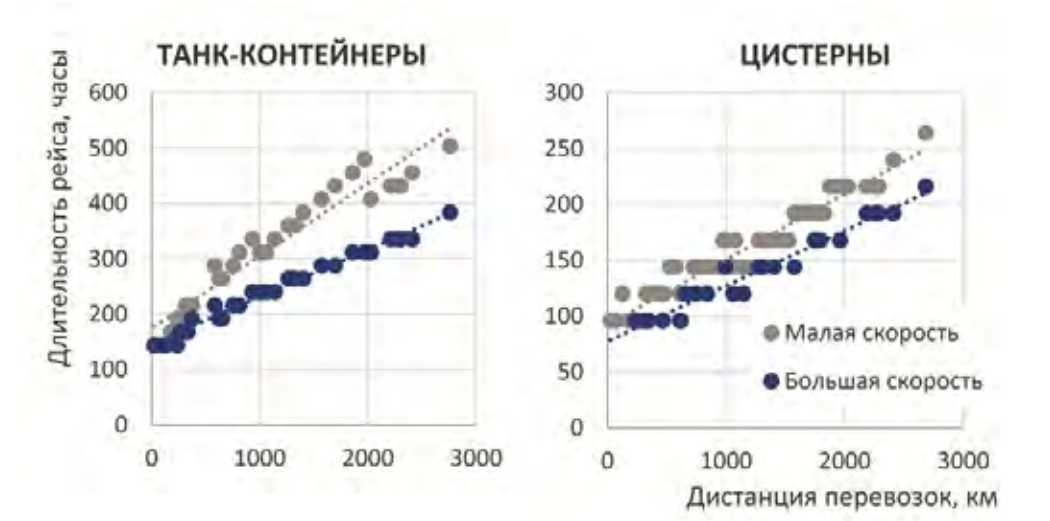


Рис. 6. Длительность перевозки по расчётным маршрутам железной дороги.

Таблица 7

Параметры зависимости для определения длительности перевозок по железной дороге

Параметр	Танк-контейнеры		Цистерны	
	Малая скорость	Большая скорость	Малая скорость	Большая скорость
f_1	0,131	0,085	0,059	0,049
f_2	174	147	92	78
S , часы	28,6	9,5	10,1	7,8
A , %	8,5 %	3,6 %	5,7 %	5,0 %
R^2	0,927	0,979	0,938	0,958

• цистерны $S = 0,170$ руб./т • км, $A = 3,4$ %, $R^2 = 0,997$.

Полученная формула для определения $c_{ж.д.}$ не учитывает влияние инфляционных процессов, поэтому актуализацию получаемых значений на конкретную дату перевозок следует выполнять путём выборочного обновления сведений по расчётным рейсам и корректировки тарифов на соответствующую изменениям величину. Например, с мая по октябрь 2018 года железнодорожный тариф на перевозку газов углеводородных сжиженных (ЕТСНГ 226074) снизился на 3,4 %.

Важным аспектом перевозок по железной дороге является их длительность — $T_{ж.д.}$. При нормировании железнодорожных перевозок срок доставки принимается кратным одним суткам (см. рис. 6), однако для решения расчётных задач удобнее использовать гладкие аппроксимации. В частности, в настоящей работе была использована линейная модель и предполагалось, что длительность возврата порожней тары равна длительности перевозки гружёной:

$$T_{ж.д.} = 2 \cdot (f_1 \cdot L_{груз} + f_2), \text{ час}, \quad (13)$$

где f_1, f_2 — регрессионные коэффициенты, принимаемые по табл. 7.

В таблице 7 также приведены показатели, характеризующие точность зависимости (13) и свидетельствующие о её применимости для решения исследовательских задач. Следует обратить внимание, что длительность доставки танк-контейнеров в два раза превосходит длительность доставки цистерн, что может быть обусловлено особенностями формирования составов различного типа. Зависимость (13) не учитывает длительность грузовых операций, которая, однако, оказывается существенно меньше, чем длительность перевозки, поэтому может не учитываться.

Из таблицы 6 видно, что железнодорожный тариф контейнерных перевозок не зависит от грузопотока, тогда как при перевозке в цистернах такая зависимость существует. При дистанции 500 км, грузопотоке 500 т/сут. и малой скорости доставки удельная стоимость c составляет 2,8 и 3,6 руб./т • км для перевозок в цистернах и танк-контейнерах соответственно. Однако стоимость использования тары очень существенно корректирует итоговую стоимость доставки, увеличивая её более чем вдвое. Так, при указанных условиях необходимо 365 вагонов-цистерн или 998 танк-контейнеров, при этом c_t составляет 3,7 и 5,8 руб./т • км соответственно. Коэффициент срочности доставки при перевозках в цистернах изменяется в диапазоне от 1,293 до 1,463, а при контейнерных перевозках — от 1,337 до 1,839. Применение ускоренной доставки во всех случаях оказывается нецелесообразным с точки зрения общей стоимости перевозок, поскольку снижение затрат на тару при увеличении скорости доставки не компенсирует рост тарифа на перевозку. Например, удельная стоимость доставки с учётом расходов на тару (дистанция — 500 км, грузопоток — 500 т/сут.) при малой/большой скорости доставки составляет 6,5/7,0 руб./т • км для цистерн и 9,4/10,1 руб./т • км для танк-контейнеров соответственно.

5. СТОИМОСТЬ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ

Для получения всех стоимостных составляющих интермодальной логистической схемы перевозки СПГ была выполнена оценка стоимости грузовых операций с контейнерами и железнодорожными цистернами.

Для определения стоимости перевалки цистерн использовались положения



Договора о Международном железнодорожном транзитном тарифе [24], подписанного Россией. В соответствии с разделом III «Дополнительные сборы и платы» сбор за перегрузку наливных грузов, перевозимых в цистернах, на 1 января 2018 года составлял 1,2 швейцарских франка за 100 кг или 19 827 руб. за перевалку расчётной цистерны, то есть 842 руб./т. Авторы [1] определили цену перевалки СПГ в цистерны и из цистерн в Байкальском регионе на начало 2017 г. как 919 руб./т, что позволяет оценить расчётные значения стоимости перевалки железнодорожных цистерн как адекватные.

Грузовые операции при контейнерном способе перевозки СПГ можно разделить на:

- а) операции, выполняемые спецтехникой при погрузке контейнеров на СПГ-заводах;
- б) операции, выполняемые силами и средствами железной дороги;
- в) операции, выполняемые в портах.

Грузовые операции, выполняемые на железной дороге, рассчитаны по ставкам сборов таблицы № 4 Тарифного руководства № 3. Для контейнеров с массой брутто свыше 30 т сбор составляет 160 руб. за контейнеро-операцию, сбор за операции с порожними контейнерами взимается с коэффициентом 0,75. В случае перевалки СПГ-контейнеров между железнодорожным и автотранспортом на один контейнер приходится две контейнеро-операции, а в случае, если порожний контейнер меняется на полный — четыре контейнеро-операции.

Анализ тарифов на перевалку контейнеров в речных портах и тарифов на перевалку контейнеров в каботаже в морских портах России⁶ показал значительный разброс стоимости данных услуг. Например, стоимость перевалки по схеме «транспортное средство—склад—транспортное сред-

ство» для гружёных 40-футовых контейнеров составляет 8 350–12 480 руб./конт., для порожних составляет 4 280–9 110 руб./конт. Кроме того, точные значения тарифов на перевалку груза являются предметом коммерческой тайны оператора порта и грузовладельца. В зависимости от объёма перевалки груза и срока договора могут применяться различные скидки на оказание услуг, достигающие 50 %. При перевалке опасных грузов предусмотрено увеличение базовых тарифов. Хранение грузов сверх нормативного срока оплачивается отдельно. Поэтому для оценки стоимости грузовых операций $C_{го}$ в портах с $N_{ед}$ контейнерами был использован следующий упрощённый подход:

$$C_{го} = c_{пор} \cdot N_{ед} \cdot P_{пор}, \quad (14)$$

где $P_{пор}$ — производительность контейнерного погрузчика соответствующей грузоподъёмности, конт./сут.;

$c_{пор}$ — стоимость аренды контейнерного погрузчика, руб./сут.

По данным порталов аренды строительной техники стоимость аренды контейнерного погрузчика составляет от 1400 до 3000 руб./час. При аренде погрузчика с водителем стоимость аренды повышается. Формула (14) может быть использована также для оценки стоимости грузовых операций, выполняемых спецтехникой при погрузке контейнеров на СПГ-заводах.

6. СРАВНЕНИЕ СТОИМОСТИ ПЕРЕВОЗОК РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТРАНСПОРТА

Визуализация полученных регрессионных формул для определения удельной стоимости перевозок всеми видами транспорта выполнена на рис. 7, где стоимость приведена как функция от дистанции и грузопотока, при этом учтены как затраты на транспортировку, так и расходы на приобретение и содержание тары. Для автотранспорта приняты следующие значения параметров регрессионных формул:

$$L_{пор} = L_{груз}, k_c = 1, c_{топл} = 48 \text{ руб./л.}$$

Для водного транспорта принято: $T_n = 215$ сут, $T_0 = 0,004 \cdot L_{груз}$, $c_{топл} = 25$ тыс. руб./т, стоимость газовоза/контейнеровоза c_c составляет 2050/1100 млн руб. соответственно. При перевозке по железной дороге принято, что доставка произ-

⁶ [Электронные ресурсы]: <http://www.seaport.spb.ru/article/22>;
http://terminals.spb.ru/o_kompanii/raskritie_informacii;
<http://www.fct.ru/disclosure>; <http://ulct.ru/disclosure>,
<http://bscbalt.ru/index.php?id=10#.W450r8J9iUk>;
http://www.nle.ru/for_clients/cargo_tarifs;
<http://rostovport.ru/klientam/uslugi>;
<http://www.arinet.ru>;
<http://yarport.com/uslugi/pogruzochno-razgruzochnye-raboty.php>.

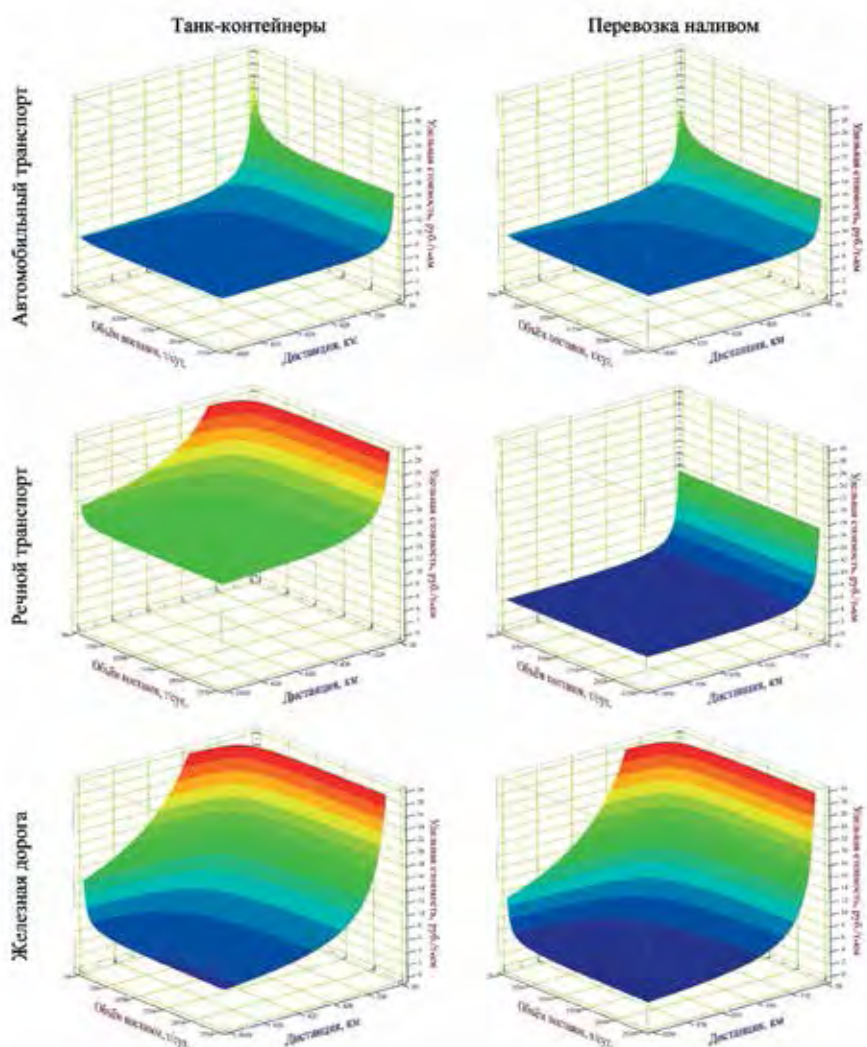


Рис. 7. Характерный вид зависимостей удельной стоимости перевозок (с учётом тары) от дистанции и объёма поставок.

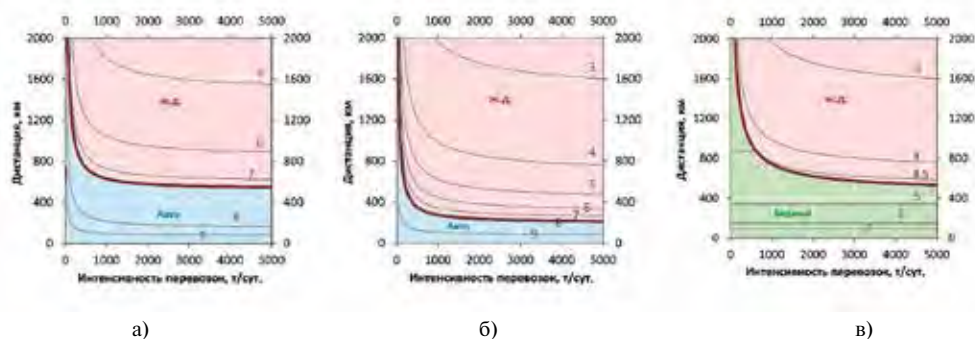


Рис. 8. Области на плоскости «дистанция–интенсивность перевозок», в которых наиболее эффективно использование различных видов транспорта: а – перевозка в танк-контейнерах для пары «автотранспорт–железная дорога»; б – перевозка наливом для пары «автотранспорт–железная дорога»; в – перевозка наливом для пары «водный транспорт–железная дорога». Цифрами на графиках показаны линии равной удельной стоимости перевозок с учётом затрат на использование тары.



водится на малой скорости, поскольку это позволяет снизить общие затраты. Стоимость грузовых операций не учитывается, так как она зависит от логистической схемы, особенностей перевалочных комплексов, и в некоторых случаях может включаться либо в стоимость инфраструктуры, либо в затраты на транспортировку. На рис. 8 показаны области на плоскости «дистанция—грузопоток», в которых наиболее эффективно использование различных видов транспорта из следующих пар: «автотранспорт—железная дорога» при перевозках в контейнерах; «автотранспорт—железная дорога» при перевозках наливом; «водный транспорт—железная дорога» при перевозках наливом.

Представленные графики позволяют сделать несколько *выводов*.

Наименьшую стоимость при высоком грузопотоке и доставке на большие дистанции обеспечивают железнодорожные перевозки в цистернах, однако они имеют большую длительность: средняя скорость доставки даже на высокой скорости не превышает 10–12 км/ч. Стоимость доставки контейнеров по железной дороге оказывается существенно выше, а срок доставки — ещё более длительным (средняя скорость не превосходит 7 км/ч). Если при сопоставлении учесть не только затраты на транспортировку и использование тары, но и затраты, связанные с потерями СПГ от испарения, то низкая скорость доставки существенно ухудшит показатели железнодорожного транспорта. Однако представляется, что и в этом случае при дистанции свыше 800 км и грузопотоке более 1000 т/сут. железнодорожный транспорт будет обеспечивать наилучшие экономические показатели.

Перевозки СПГ судами-газовозами оказываются дешевле, чем перевозки в автоцистернах (за исключением очень коротких дистанций, протяжённостью менее 20–30 км), но уступают по своей эффективности перевозкам по железной дороге при больших дистанциях и грузопотоках. Отметим, что водный транспорт традиционно дешевле, чем железнодорожный, но в данном случае его показатели существенно ухудшаются ограни-

ченным периодом навигации и большой продолжительностью рейса по ЕГС. В случае перевозки СПГ наливом на короткие дистанции, когда задержки в рейсе минимальны, водный транспорт оказывается эффективнее железнодорожного, а в случае, если задержки в рейсе полностью отсутствуют — превосходит железнодорожный при всех сочетаниях дистанции и грузопотока, даже в условиях ограниченной навигации. Контейнерные перевозки по воде характеризуются наибольшими стоимостями и могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Это вызвано, главным образом, малой провозной способностью судов из-за невозможности перевозить СПГ-контейнеры в трюмах, а также тем, что длительная доставка вынуждает иметь очень большой парк контейнеров, увеличивая затраты на содержание тары. Одним из достоинств перевозки СПГ на судах-газовозах является отсутствие потерь газа из-за испарения, что исключает дополнительные затраты от этого фактора. Однако перевозки по ЕГС являются сезонными, поэтому область применения речного транспорта для транспортировки малотоннажного СПГ представляется весьма ограниченной.

Автомобильные перевозки на больших дистанциях уступают по своей эффективности другим видам транспорта, однако на коротких дистанциях (даже при высоком грузопотоке) они оказываются сопоставимы с перевозками по реке, а также превосходят перевозки по железной дороге в большем диапазоне дистанций и грузопотоков. Это вызвано, главным образом, высокой скоростью доставки. Если при сопоставлении автомобильного и железнодорожного транспорта будут учтены расходы, связанные с потерями СПГ от испарения, то диапазоны дистанций и грузопотоков, при которых автотранспорт является предпочтительным, ещё более расширятся. Помимо этого, автотранспорт демонстрирует минимальную разницу между стоимостью доставки наливом и в танк-контейнерах, тогда как для всех прочих видов транспорта эта разница оказывается существенно большей. Причины небольших отличий в случае автотранс-

порта очевидны — это минимальная разница во вместимости танк-контейнера и автоцистерны, а также одинаковые сроки доставки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей работе регрессионные формулы для определения стоимости перевозки СПГ автомобильным, железнодорожным и водным транспортом являются одним из важных элементов решения задачи проектирования инфраструктуры для транспортировки сжиженного природного газа в России.

Структура формул обеспечивает их универсальность и возможность практического применения для оценки стоимости транспортировки СПГ с учётом особенностей интермодальной логистики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Возможности и перспективы развития малотоннажного СПГ в России. Московская школа управления Сколково, 2018. — 187 с. [Электронный ресурс]: <https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/research06-ru.pdf>. Доступ 03.07.2019.

2. Ketoeva, N. L., Orlova, Y. S. The development and energy efficiency of LNG in Russia. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2019, 288:012063. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012063. [Электронный ресурс]: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/288/1/012063/pdf>. Доступ 03.07.2019.

3. Sharples, J. LNG supply chains and the development of LNG as a shipping fuel in Northern Europe. February, 2019. DOI: 10.26889/9781784671266. [Электронный ресурс]: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2019/01/LNG-supply-chains-and-the-development-of-LNG-as-a-shipping-fuel-in-Northern-Europe-NG-140.pdf?v=i9308c5d0596>. Доступ 10.10.2019.

4. Буянова Л. Н., Мудрова О. М. Логистика малотоннажного СПГ // Мир транспорта. — 2019. — № 4. — С. 166—180.

5. MarTech LNG. LNG fuel bunkering procedures in ports and terminals in the south Baltic Sea region. Study On LNG Bunkering Procedures for Current and Potential LNG Stakeholders in the frame of the EU project «Maritime Competence, Technology and Knowledge transfer for LNG (Liquefied Natural Gas) in the South Baltic Sea Region — MarTech LNG» funded by European Regional Development Fund (ERDF) within the South Baltic Programme 2007—2013—2014. [Электронный ресурс]: <http://www.golng.eu/files/Main/PDF/SBSR.pdf>. Доступ 10.10.2019.

6. Guidance on LNG bunkering to port authorities and administrations. Lisbon: European Maritime Safety Agency (EMSA), 2018, 42 p. [Электронный ресурс]: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2018/02/EMSA-Guidance-on-LNG-Bunkering-to-Port-Authorities-and-Administrations-2018_02.pdf. Доступ 04.10.2019.

7. Николайчук В. Е. Логистический менеджмент: Учебник. — 2-е изд. — М.: Дашков и К°, 2017. — 980 с.

8. Мочалин С. М., Левкин Г. Г., Терентьев А. В., Заруднев Д. И. Логистика: Учеб. пособие. — М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. — 168 с.

9. Яшин А. А., Ряшко М. Л. Логистика. Основы планирования и оценки эффективности логистических систем: Учеб. пособие. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. — 53 с.

10. Левкин Г. Г. Основы логистики: Учеб. пособие. — М.: Инфра-Инженерия, 2014. — 240 с.

11. Cepeda, M. F. S., Capraco, J. D. Data envelopment analysis of navigation records improve ship fleet management. Offshore Technology Conference Brasil 2015 (OTC-Brazil 2015). DOI: 10.4043/26298-MS

12. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов. Том 1 и том 2. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121040/. Доступ 10.10.2019.

13. Приложение № 4 к Приказу ФНС России от 30.05.2007 № ММ-3-06/333 «Об утверждении Концепции системы планирования выездных налоговых проверок». [Электронный ресурс]: https://www.nalog.ru/rn77/taxation/reference_work/conception_vnp/. Доступ 12.10.2019.

14. Ибрагимов Ю. Р. Перевозки СПГ автомобильным транспортом. Сайт ООО «Лидер Спец Транс». [Электронный ресурс]: http://lider1.ru/a/perevozki_spg_avtomobilnyum_transportom. Доступ 03.06.2019.

15. Официальный сайт ООО «ТрансАвтоЦистерна». [Электронный ресурс]: http://трансавтоцистерна.рф/prays_list. Доступ 12.10.2019.

16. Тарифы на перевозку грузов по России. Сайт АвтоПравозащита.ру. [Электронный ресурс]: <http://avtopravozashita.ru/perevozki/tarify-na-perevozku-gruzov.html>. Доступ 12.10.2019.

17. Индексы потребительских цен по Российской Федерации в 1991—2018 гг. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс]: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/prices/potr/tab-potr1.htm. Доступ 12.10.2019.

18. Стандарт ЦНИИМФ СТО ЯКУТ.23.01—2019. Технико-экономическое обоснование проектирования и строительства судов. Основные положения.

19. Мацкевич В. А., Романов Р. Ю., Луцкевич А. М., Таровик О. В., Дехтярук Ю. Д., Кораблева М. С. Перспективы транспортировки сжиженного нефтяного газа судами смешанного «река—море» плавания // Судостроение. — 2011. — № 6. — С. 13—17.

20. Официальный сайт Морского Инженерного Бюро. Проект RSD19. [Электронный ресурс]: <http://www.meb.com.ua/dry/RSD19.html>. Доступ 12.10.2019.

21. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом. International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC Code). — СПб.: ЦНИИМФ, 2016. — 474 с.

22. ГОСТ Р 53350-2009 (ИСО 668:1995). Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса (с изм. № 1). [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200072594/>. Доступ 12.10.2019.

23. Подвижной состав. Четырёхосная фитинговая платформа для перевозки большегрузных контейнеров, модель 13-2118. [Электронный ресурс]: http://cargo.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5140&layer_id=3290&id=2169. Доступ 12.10.2019.

24. Договор о Международном железнодорожном транзитном тарифе (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.01.2019). [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/902124118>. Доступ 12.10.2019.





Estimated Transportation Cost of Low-Tonnage LNG



Oleg V. TAROVIK



Olga M. MUDROVA

Tarovik, Oleg V., Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia.

Mudrova, Olga M., Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, Russia.*

ABSTRACT

Demand for low-tonnage transportation of LNG requires improved logistics. Assessing the value of all parts of the supply chain is an important component of solving the problem of optimizing transportation costs for both consumers and LNG suppliers. In connection with tightening of environmental requirements regarding bunker fuel, the task of optimizing the supply of LNG for water transport by the cost of transportation becomes particularly relevant.

The objective of the study is to develop a universal approach to estimating the cost of transporting low-tonnage LNG for bunkering vessels in the Russian Federation.

The research methodology is focused on the analytical method based on a system-structural approach.

As part of the departmental project of the Russian Ministry of Industry and Trade «Development of gas-powered fleet for navigation in coastal waters and inland waterways», the authors developed technical and economic models for calculating the unit cost of LNG transportation by road and water. To calculate the unit cost of LNG transportation by rail, the data of TMkarta information and reference system were used.

Based on model calculations and data of TMkarta system, regression relations were obtained that allow one to determine the cost of transportation for various options of transport and technological schemes based on a limited set of parameters. An approach has also been proposed for estimating the cost of LNG transshipment. The regression ratios were tested for selected routes. As a result, conclusions were drawn about the most effective LNG transportation options.

Keywords: LNG, logistics, transport, unit cost of transportation, cost items, tank container, tank, regression ratios, road transport, inland water transportation.

*Information about the authors:

Tarovik, Oleg V. – Ph.D. (Eng), Senior Researcher of the Independent Sector for Design of Marine Offshore Development Systems of Federal State Unitary Enterprise Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia, tarovik_oleg@mail.ru.

Mudrova, Olga M. – Ph.D. (Eng), Head of the Department of Sea Transport Development of JSC Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, Russia, MudrovaOM@cniimf.ru.

Article received 03.06.2019, revised 10.09.2019, accepted 12.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 130.

Background. In recent years, demand for low-tonnage transportation of liquefied natural gas (LNG) has been steadily growing in Russia. This is due to both an increase in the number of consumers and the need to limit emissions of harmful substances into the atmosphere. Prospects for the use of LNG are associated with its use as fuel for various vessels and public urban traffic, as well as for heat and electricity supply of communities and industrial facilities. So, according to the authors of the article, the increase in production of low-tonnage LNG for the period from 2014 to 2018 has amounted to 88,9 thousand tons. According to estimates [1, p. 163], over the next 15 years, the installed capacity of LNG small-scale plants in Russia will exceed 5 million tons, that is, it will increase by 35 times compared to 2017. In addition to environmental reasons, the increase in LNG consumption is due to factors such as low cost of gas compared to other energy carriers, economically efficient consumption, and availability of well-developed domestic technologies for its production. All this contributes to a favorable forecast for development of the domestic low-tonnage LNG market [2; 3].

Currently, in many regions of Russia, the infrastructure necessary for transportation and storage of low-tonnage LNG is underdeveloped; its creation should be carried out practically from scratch. It is known that LNG can be transported by various modes of transport: road, rail, and water ones. Moreover, for each mode of transport, two alternative delivery methods are possible: in bulk or in tank containers [4–6]. The lack of ready-made infrastructure solutions and the wide range of potentially possible logistic schemes for LNG transportation leads to the relevance of statement and solution of the problems of determining the optimal layout of the transportation system and justification of the location of LNG production facilities. Such tasks belong to the field of strategic logistics planning and are solved within the framework of a formal mathematical formulation, which allows finding the optimal logistic scheme for each scenario of changes in cargo flows and the location of LNG production and consumption sites. The logistics scheme may include several modes of transport and provide for intermediate transshipment of liquefied gas if it proves to be economically feasible. Therefore, estimating

the cost of transporting LNG by road, rail and water transport in bulk and in tank containers is one of the key aspects of practical implementation of strategic planning algorithms.

Obtaining such estimates is hampered by the fact that the domestic market for low-tonnage LNG transportation is still being formed and full-scale data on transportation costs are practically unavailable.

Objective. The objective of the study is to develop technical and economic models for determining the integrated efficiency of a vessel LNG bunkering system, considering the costs of its delivery to ports of destination by alternative modes of inland transport.

Methods. To calculate the estimated cost of LNG transportation, technical and economic methods and models were used that consider various technical, organizational and economic features, the regulatory framework currently applied in Russia, and the multiplicity of technical and operational parameters.

Results.

1. General approach to estimating the cost of LNG transportation by various modes of transport

To obtain estimates of the cost of transportation of low-tonnage LNG by road and inland water transport, technical and economic models of the specialized motor transport enterprise (SME) and of the specialized shipping company (SSC) operating on inland waterways were created. It is assumed that those companies transport LNG in bulk and in tank containers on an ongoing basis on the selected line. The input parameters of each model comprise cargo flow, transportation distance (mileage with cargo), as well as a set of technical and operational and cost parameters that allow calculating the total cost of transportation, taking into account all cost items. The implementation features of these models are described below. To obtain estimates of the cost of LNG transportation by rail, we used the data of TMkarta¹ information and reference system, which allows us to calculate the freightage charged by JSC Russian Railways for transportation in Russia, taking into account current information on the railway transport and tariff network, and plans for

¹ [Electronic resource]: <http://www.tmkarta.com/ru/about/long.php>.



formation of cargo trains, a unified tariff-statistical and harmonized nomenclature of goods.

However, the direct use of technical and economic models in the problems of logistics planning is rather inconvenient since it requires input and control of many local parameters and cost indicators [7–11].

In case of railway transportation, mass requests addressed to TMkarta system will significantly slow down operation of calculation algorithms. Therefore, in the present work, based on model calculations and data from TMkarta system, regression relations were obtained that allow one to determine the cost of transportation based on a limited set of parameters.

To ensure the relevance of the created regression dependencies, which include cost indicators at the date of the calculation, the structure of these dependencies was formed in such a way as to provide the opportunity to adjust the results with regard to the current date taking into account inflation, changes in fuel and vehicles costs, and adjustments in railway transportation tariffs.

Costs C for LNG transportation for all modes of transport are determined by the ratio:

$$C = (c + c_t) \cdot t \cdot Q \cdot L_{\text{cargo}}, \quad (1)$$

where c is the unit cost of transportation, rub./t • km [further on *rub.* means RUB, Russian ruble – *ed. note*];

c_t is the unit cost of using tare, rub./t • km;

Q is the transportation intensity, t/days;

L_{cargo} is the distance run with cargo (one-way), km;

t is duration of transportation period, days.

The unit cost of transportation c is determined based on regression formulas, to obtain them the following ranges of changes in cargo flow and distance were taken:

$20 < Q < 5000$, t/days;

$20 < L_{\text{cargo}} < 2000$, km.

The number of vehicles N_{tr} necessary for ensuring the intensity Q , as well as the required number of tare units (tank containers or tanks) N_{tare} are determined by the ratios:

$N_{\text{tr}} = (Q \cdot T_{\text{round}}) / (M_{\text{LNG}} \cdot k_{\text{use}});$

$N_{\text{tare}} = n_{\text{un}} \cdot (N_{\text{tr}} + 2), \quad (2)$

where T_{round} means duration of a round trip, days;

M_{LNG} is the carrying capacity (for transporting of LNG) of a vehicle (vessel, gas carrier or container vessel, train), t;

n_{un} is the number of tare units per vehicle, pcs.;

k_{use} is the coefficient of the use of vehicles during the transportation period, determined by the working time regime and rest time of drivers, the need to service vehicles, etc. ($k_{\text{use}} = 0,49$ is accepted for road transport, $k_{\text{use}} = 1,0$ for others).

The number of N_{tare} in the formula (2) is determined on the basis of the assumption that at the destination and at the point of departure there are additional sets of containers with which cargo operations are performed while vehicles are moving.

When calculating unit cost of transportation, the following assumptions were made:

1. For convenience of accounting for taxes, insurance contributions, duties, and various standards in the models of SME and SSC, one year is taken as the period for determining the unit cost. The calculation of the value of c is carried out by dividing the annual costs by the total amount of transported cargo and laden running mileage. A change in duration of the transportation period, which is modelled by the parameter t in formula (1), does not lead to a significant change in the specific indicator c .

2. The calculations of all costs were made using October 2018 prices.

3. Since the organizations involved in the LNG supply chain are generally large, they are required to apply a common taxation system and are VAT payers. It is known that these organizations can reimburse the paid (incoming) VAT from their suppliers. Therefore, when calculating the cost of works/services, the costs of the relevant cost items are considered with VAT. Attraction of credit funds is not assumed.

4. When transporting LNG in bulk by road and water transport, the cost of containers in which gas is transported is considered in the unit cost of transportation, since such tanks are an integral part of vehicles. In case of container transportation, the cost of containers is not included in transport costs but is considered as part of c_t .

5. When transporting LNG by rail, the cost of tank cars and tank containers is not taken into account in the unit cost of transportation c but should be calculated separately as the unit cost of tare c_t since JSC Russian Railways currently has virtually no own capacity for LNG transportation [1, p. 94].

6. When determining the unit cost of transportation, the characteristics of vehicles do not vary, that is, specific types of tank cars, tank containers and railway tanks are accepted, which are the most common and affordable in modern conditions. Inland water LNG carriers are accepted as LNG carrying vessels with maximum dimensions permissible under the limitations of the Russian Single deep-water system (SWS).

To determine the most influential factors in SME and SSC models, we analyzed the sensitivity of each model, in which the variables varied within their characteristic range. The variables that have the greatest impact have been included in the number of parameters of the regression formulas for determining the parameter c . In addition to transportation costs, information on duration of all links in the gas supply chain, including duration of cargo operations, is also given below.

To compare all the possible options for delivery of low-tonnage LNG, it is necessary to evaluate the unit cost of using tare c_t . There are many organizational patterns of ownership of cargo tanks (purchase of new and used equipment, rental, leasing), in which the costs vary significantly and are calculated differently. In this paper, a simplified approach is used, in which the calculation of c_t considers only the costs of depreciation and maintenance of tare:

$$c_t = (k_{\text{main}} \cdot C_{\text{tare}} \cdot N_{\text{tare}}) / (T_{\text{ser}} \cdot T_{\text{oper}} \cdot Q \cdot L_{\text{cargo}}), \quad (3)$$

where C_{tare} is the cost of a unit of tare, rub.;

T_{ser} is service life of tare, years;

k_{main} is the coefficient that determines the level of annual costs of maintenance and repair of cargo tanks (for tank car, $k_{\text{main}} = 1,05$ is taken, for tank containers $k_{\text{main}} = 1,07$);

T_{oper} – number of days of vehicle operation during the year, which account for depreciation of tare, days.

Further, when making the calculations, the following assumptions are made:

- cost of the tank container of type KCM 40/0,7 according to the manufacturer² is 9952000 rub.;
- cost of the tank car of type 15–5106 is taken by adjusting the data [1, p. 94] on the calculation date and amounts to 17700000 rub.;

- $T_{\text{ser}} = 20$ years; $T_{\text{oper}} = 365$ days for railway transport, $T_{\text{oper}} = 240$ days for road transport and is equal to the navigation period (T_n) in case of water transport;

- N_{tare} is determined by formula (2).

2. Road transport

When modelling LNG transportation by road, the requirements of ADR (The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road [12]), the Rules on the Carriage of Goods by Road and a number of other regulatory documents and regulations obliging the carrier to fulfill special requirements for transportation of dangerous goods and bear the associated costs are considered. The estimated cost is adjusted by the factor of profitability of road cargo transport, equal to 4 % [13].

The round-trip time of a road train is determined as a function of distance of transportation using the regression dependence obtained through processing 95 routes using Yandex.Maps service, considering the maximum travel time along the shortest route without using toll high-speed sections of routes and taking into account the absence of traffic jams on the route and at the places of loading/unloading. The duration of a round trip also includes the duration of cargo operations, however, it is small (up to 2,5 hours) and does not significantly affect the results. When calculating the number of trips made by drivers per shift, compliance with the requirements established by the Order of the Ministry of Transport of Russia dated August 20, 2004 No. 15 is checked, since considering the total of drivers' working hours, driving time per driver per week cannot exceed 56 hours. Transportation is carried out year-round.

Since in Russia, in bulk transportation of LNG by road, tank trucks with a volume of about 50 m³ are used, containing up to 20 tons of LNG [14], gas carrying truck of type GT7 LNG PPCT-52³ with a carrying capacity of 18,14 tons was chosen as a sample tank truck. A tank container of type KCM-40/0,7⁴ with a carrying capacity of 14,28 tons, which corresponds to the dimensions of a standard 40-foot container was chosen as a sample LNG

² [Electronic resource]: <http://www.cryont.ru/company/bas/store>.

³ [Electronic resource]: <http://gt7.ru/catalog-tr/transportirovshchiki-spg/spg-pptst-52/>.

⁴ [Electronic resource]: <http://www.cryont.ru/production/>.



The procedure for calculating costs by cost items for LNG road transportation

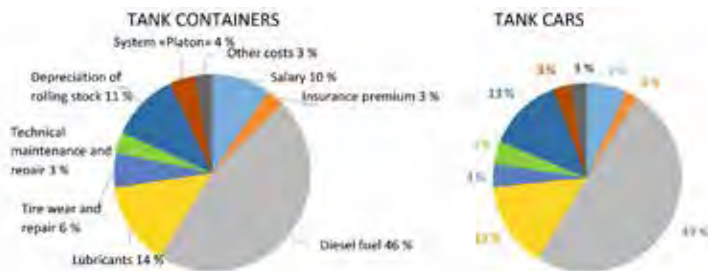
Cost item	Calculation procedure
Salary:	
– drivers	average for the region for driver license of category C, CE for vacancies published on the site www.avito.ru .
– administrative and supervising/managerial staff	average for the region for the required list of job positions for vacancies published on the site www.avito.ru (the number is taken in the range of 10–15 % of the number of drivers, but not less than four).
Insurance premium:	
– pension, social and medical insurance	in accordance with established tariffs and base for calculation of insurance premium as in 2018 (Articles 425, 426 of the Tax Code of the Russian Federation).
– injuries insurance	depending on the class of professional risk of the insurer, established in accordance with OKVED [Russian National Classification of Economic Activities] 249.41.1.
Fuel and lubricants:	
– consumption	in accordance with the Fuel and Lubricant Consumption Standards for Road Transport (Decree of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. AM-23-r dated March 14, 2008 as amended on July 14, 2015).
– price of diesel fuel	average price in the region according to the site http://www.benzin-price.ru .
– price of lubricants	selection of brands of lubricants is performed using the website http://oil2.ru based on technical characteristics of the articulated lorry and on the prices of lubricants published on the Website www.auto.ru .
Technical maintenance and repair:	
	by types of technical maintenance according to GOST [State standard] 21624-81, costs assumed to be at a rate of 3 % of the cost of vehicles.
Tire wear and repair:	
– tire mileage standard	in accordance with the methodology RD3112199-1085-02, approved by the Ministry of Transport.
– tire price	depending on the brand of tires for tractors of articulated lorries and semi-trailers for all-season models published on the site www.auto.ru .
– cost of tire mounting	the sum of costs of removal/installation, balancing and tire recycling according to the prices published on specialized sites.
Depreciation of rolling stock:	
	in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated 01.01.2002, No. 1 (as amended on April 28, 2018) «On classification of fixed assets included in depreciation groups» and Art. 259.1 part 2 of the Tax Code of the Russian Federation.
«Platon» [Platon Electronic Toll Collection] system:	
	in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated 03.11.2015, No. 1191 as amended on June 28, 2018, paragraph 4, Article 31.1 of the Federal Law of 08.11.2007, No. 257-FZ.
Other costs:	
	include cleaning, parking, equipment, pre-trip and post-trip technical inspections for obtaining a diagnostic card for vehicles, compulsory motor third-party liability insurance policies, fees for registering vehicles, medical examinations and outfit of drivers, office rental, staff training, banking services; are calculated in the amount of 3 % of the amount of costs of the main cost items.

tank container. Models of an articulated lorry with a container semi-trailer were selected in accordance with the technical characteristics of the cargo tanks.

The main data sources, the used regulatory documents and the calculation procedure for the main cost items are shown in Table 1.

Pic. 1 shows the ratio of items of transportation costs for conditions that are further referred to as «basic» and are determined by the following parameters: transportation

intensity – 500 t/day, distance – 500 km, fuel cost – 48 rub./l, tractor/tank/semi-trailer cost – 7,5/8,66/ 2,35 mln rub. accordingly, the same mileage with cargo and when empty, salary of drivers/supervisors – 64/52 thous. rub. per month. It can be seen that the differences in the structure of transportation costs in tank trucks and tank containers are insignificant and are determined mainly by differences in capacity of tanks, number of drivers and cost of vehicles.



Pic. 1. The cost structure of a motor transport enterprise under basic conditions.

Unit cost of transportation under the base scenario for tank trucks and tank containers is 7,6 and 6,9 rub./t • km excluding VAT. With the accepted load capacity of road trains, this is equivalent to 138 and 99 rub./km respectively. Accounting for the cost of tank containers based on formulas (2) and (3) does not lead to a large increase in the cost of transportation, since the required number of tank containers is small. So, under basic conditions, 47 tank containers are needed. This leads to an increase in the unit cost of transportation from 6,9 to 7,3 rub./t • km ($c_t = 0,4$ rub./t • km) or to 104 rub./km.

Estimated data can be compared with available data on cost of transportation by road. It should be noted that in dependence (1) only laden mileage is taken into account, while traditionally tariff rates for road transportation also include empty miles. Taking into account that in the considered example, empty miles are equal to laden mileage, we divide the obtained values by 2 and get the following estimates of the previously mentioned costs: 69, 50 and 52 rub./km.

These values can be compared with the price list of the company TransAvtoTsisterna (TransAuto Tank] LLC [15], which carries out transportation in tank trucks at a price of 50 rub./km, and with the data of AvtoPravozashchita.Ru website [16], where the cost of trucking is estimated at 55–155 rub./km, and the cost of transporting ordinary goods by road trains with a carrying capacity of 20 tons over long distances varies from 30 to 57 rub./km. Comparison of the data obtained allows us to conclude that LNG transportation is in the upper price category, but does not go beyond the range of values characteristic of road transport.

Further, the analysis of sensitivity of SME model was performed, which showed that the greatest influence on the value c is exerted by distance of transportation (0,93), fuel price

Regression coefficients

Coefficient	Tank containers	Tank cars
a_1	0,024	0,032
a_2	2,501	2,055
a_3	0,018	0,011
a_4	36,20	38,02
a_5	-0,486	-0,548
a_6	0,119	0,096
a_7	0,738	0,702
a_8	2,598	2,771

(0,48) and fraction of empty miles (0,33). The values of the conditional coefficient characterizing the degree of influence of each factor are indicated in parentheses. Based on these data, after performing a series of mass numerical experiments with SME model, the following regression dependence was obtained to determine the unit cost of road transportation: $c_{road} = k_{pr} \cdot (c_{fl} + c_{oth} \cdot k_{cpi})$, (4) where c_{fl} are unit costs for diesel fuel and lubricants;

c_{oth} are other unit costs;

k_{cpi} is the coefficient of consumer price index for goods and services, taken according to the data of the Federal Statistics Service [17], based on the fact that these estimated indicators were obtained in October 2018;

$k_{pr} = 1,04$ – coefficient, considering profitability of transportation.

Unit costs in formula (4) are determined according to the following ratio:

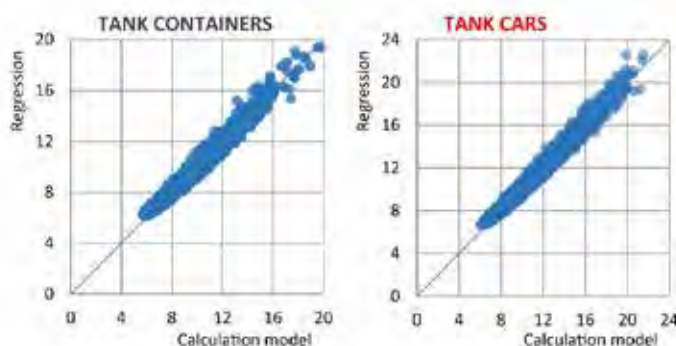
$$c_{fl} = a_1 \cdot (L_{empty} / L_{cargo} + a_2) \cdot c_{fuel}; \quad (5)$$

$$c_{oth} = [(a_3 \cdot Q + a_4) (L_{cargo})^{a_5 \cdot Q^{a_6}} + a_7] \cdot (L_{empty} / L_{cargo} + a_8), \quad (6)$$

where L_{empty} means empty miles, km (taken as $L_{cargo} \leq L_{empty} \leq 2 \cdot L_{cargo}$);

c_{fuel} is cost of fuel, rub./l (arbitrary range of values);





Pic. 2. Correspondence of the regression values and the results of the design model of SME.

a_1 – a_8 are regression coefficients, taken according to Table 2.

Let us note that when constructing dependencies (5) and (6), the following range of possible fuel prices was accepted: $40 < c_{\text{fuel}} < 90$. Since formula (5) is approximated with zero errors, which is explained by linearity of the model for determining fuel costs, in practical calculations fuel price can take values from 0 to 1000 rub./l, without leading to an increase in errors of dependence (5). Let us also note that the cost of transportation, determined by the formula (6), does not include the cost of container fleet.

Duration of a round trip T_{road} considering duration of cargo operations is:

$$T_{\text{road}} = 0,0127 \cdot (L_{\text{cargo}} + L_{\text{empty}}) + 2,5, \text{ hour.} \quad (7)$$

The standard deviation (S) of the dependence is 0,8 hours; the coefficient of determination (R^2) is 0,989, which indicates a high degree of adequacy of the linear model. The average relative approximation error (A) is 8 %, decreasing from 25–40 % for short trips (less than 100 km) to 1–3 % for long distances (more than 1000 km).

To analyze the errors of the regression formula (4) in comparison with the calculations according to the technical and economic model of SME, the following approach was applied. A mass numerical experiment was performed (30 000 runs), during which a set of all its parameters was supplied to the model input each time, and each parameter was randomly selected from an acceptable range of values. The boundaries of the ranges were determined on the basis of the range of different cost indicators that are characteristic of the current time, for example, the cost of the tractor of an articulated lorry varied from 6,0 to 9,0 mln rub., tire price from 18 to 27 thous. rub., and salary of the driver from 50 to 80 thous. rub. per

month. The parameters of the regression model were set randomly along with other parameters of the model. This approach provides a comprehensive check of adequacy of the regression model and the degree to which it considers the influence of various factors. The resulting picture of the correspondence of regression and model values is shown in Pic. 2.

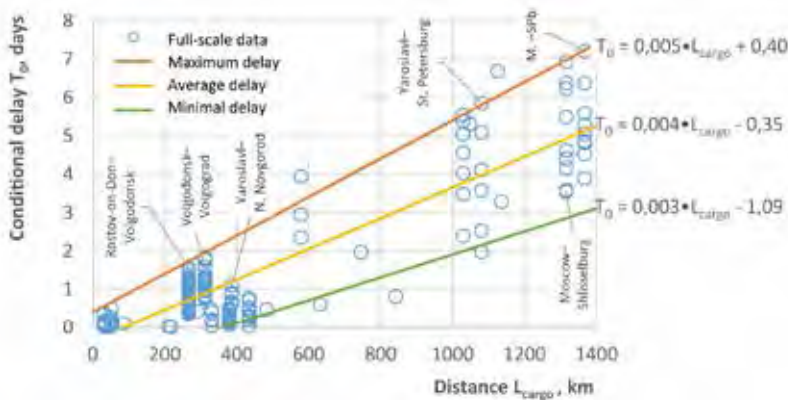
The obtained accuracy parameters of the regression model (4) indicate its suitability for practical calculations:

- tank containers $S = 0,271 \text{ rub./t} \cdot \text{km}$, $A = 2,3 \%$, $R^2 = 0,977$;
- tank trucks $S = 0,275 \text{ rub./t} \cdot \text{km}$, $A = 2,1 \%$, $R^2 = 0,983$.

3. Water transport

The calculation model of SSC is based on the methodology of JSC CNIIMF [Central Marine Research and Design Institute][18], but it takes into account the specifics of the transported cargo and the increased requirements for safety, crew qualifications, technical equipment of the vessel, etc. The logic of calculating the costs when the vessel is operating on the line is similar to the logic used in SME model: first, the total annual costs are determined (during navigation and inter-navigation periods), then they are adjusted for profitability and the specific indicator c is calculated.

The vessels with the maximum dimensions according to the restrictions stipulated for SWS were chosen as design vessels for transportation of LNG since such vessels will have the greatest economic efficiency. Since currently there are no built LNG gas carriers for operation on inland waterways (IWW), a design of a draft gas carrier with a capacity of 7100 m³ (100 %) capable of transporting 2500 tons of LNG was taken for bulk transportation. The main



Pic. 3. Conditional delay of a vessel on voyage when moving along SWS routes.

characteristics of the vessel were obtained using data on the gas carrier of project 23070 for transportation of liquefied petroleum gas [19]. The cost of such an LNG gas carrier is estimated at \$32 million. A universal vessel with characteristics close to RSD19 project was chosen as a design vessel for container transportation [20]. Its cost is estimated at \$18 million. Since transportation of LNG containers is possible only on the open deck [21], the vessel is loaded with only 35 containers of KCM-40/0,7 type, containing 500 tons of LNG, which significantly worsens the economic performance of such a transportation scheme. For certainty, when calculating the cost of shipping containers by water, the possibility of transporting associated cargo in the holds of a vessel was not considered.

An important feature of the operational model of a gas carrier vessel is that the trip time is calculated not according to a predetermined formula, but as a parameter that can vary. This is due to the fact that the vessel's delay on IWW caused by locking, various navigational restrictions and weather conditions, strongly depends on the region of transportation and has a significant impact on the economic efficiency of the entire system, therefore it should be taken into account separately. To do this, the model assumes that the vessel is moving on IWW at the highest operational speed that is characteristic of real voyages, while it is in standby (idle) mode during other periods. To obtain estimates of the duration of real vessel trips within SWS, the analysis of the AIS monitoring data of movement of 14 mixed navigation vessels that made trips between 22 ports located on waterways from Azov to St. Petersburg in 2018 (a total of 260 trips) was performed in 2018. Data was acquired from

Marinetraffic⁵. During the analysis, time was determined between the signals about departure from a port and arrival at another port. Then, the conditional running time, determined under the assumption that the vessel is moving at a maximum average cruise speed, which, according to available data, is 18 km/h, was subtracted from the obtained time. The received conditional delay of the vessel in the voyage is shown in Pic. 3 as a function of the distance between the ports (some routes are signed). The picture also shows the parameters of a linear function that characterizes the maximum calculated delay (orange/higher line), the average trip delay (yellow/middle line), and the smallest full-scale delay values (green/lower line).

The average duration of the round trip of the vessel T_{water} under the accepted condition of equality of distances with the load and in the ballast ($L_{\text{cargo}} = L_{\text{empty}}$) can be determined from the expression

$$T_{\text{water}} = 2 \cdot (L_{\text{cargo}} / 18 + T_{\text{port}} + 24 \cdot T_0), \text{ hour, (8)}$$

where T_0 is average duration of conditional delay of a vessel (one-way trip), days;

T_{port} is average duration of operations in a port, taking in account loading-unloading works and auxiliary operations, hour.

As average values in the model it is taken that $T_{\text{port}} = 5,8 \text{ h}$ – for tank containers, $T_{\text{port}} = 9,3 \text{ h}$ – for vessel tanks.

It should be noted that the presented calculation scheme of T_{water} is rather arbitrary. In particular, average speed of the vessel along the river differs significantly from speed of 18 km/h, which is achieved only in sections of rivers without locks or in reservoirs. According to the results of processing about 10 thousand values

⁵ [Electronic resource]: <https://www.marinetraffic.com>.

**The procedure for calculating costs by cost items for LNG transportation
by inland water transport**

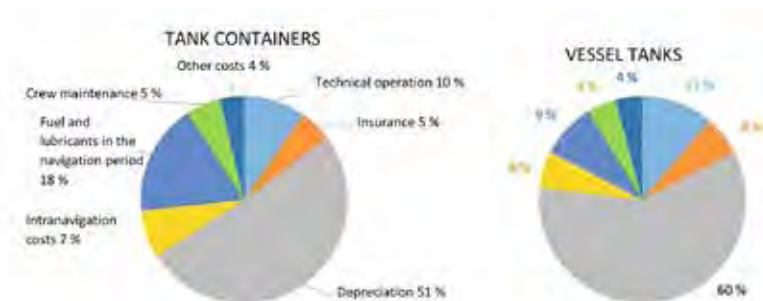
Cost item	Calculation procedure
Crew costs:	
– payroll	is formed in accordance with the recommendations of the International Transport Workers' Federation based on the currently valid Total Crew Cost agreement.
– food ration	is estimated based on the Decree of the Government of the Russian Federation dated December 7, 2001 No. 861 «On food rations for crews of sea, river vessels and aircraft» and Order of the Ministry of Transport of Russia dated September 30, 2002 No. 122 «On the procedure for providing meals to crews of sea, river vessels and aircraft».
Insurance contributions	0 % until 2027 according to sub-paragraph 4, paragraph 1–2, Art. 427 of the Tax Code of the Russian Federation.
Fuel and lubricants:	
– fuel consumption	is calculated depending on ship power plant and operating modes of the vessel (in operation, during dockage, with cargo loading/unloading operations or without them).
– fuel price	is determined on the basis of information and analytical publications with regard to the base port.
– price of lubricants	4 % of the corresponding fuel costs.
Technical operation:	
– materials and supply	0,1 % of the vessel cost.
– maintenance	0,25 % of the vessel cost.
– average ship repair	3 % of the vessel cost (repair is performed once per 5 years).
Insurance:	
	The standard rate of insurance costs is determined as a percentage of the vessel cost per year by the statistical method based on a database of insurance companies.
Depreciation:	
	is calculated in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated 01.01.2002 No. 1 (as amended on April 28, 2018) «On classification of fixed assets included in depreciation groups» and Art. 259.1 of part 2 of the Tax Code of the Russian Federation.
Other costs:	
	include costs for radio communications and navigation, banking services, labor protection and safety measures, training of staff (crew) and are estimated as the amount of 5 % of the total amount of fixed costs.
Internavigational costs:	
	are determined by crew cost and fuel costs during dockage without cargo operations.
Registration and annual confirmation of registration in RMRS [Russian Maritime Register of Shipping]:	
	are calculated as regulated by paragraph 1, sub-paragraphs 108–109 of the Tax Code of the Russian Federation.

of instantaneous speed of vessels, moving at arbitrary points of SWS, it was found that average instantaneous speed is 11,5 km/h, standard deviation $S = 3,2$ km/h. However, in order to simulate the «fast» LNG delivery, the model takes a speed of 18 km/h. In addition, according to full-scale data, average trip speeds upstream and against the current differ by 0,8–1,2 km/h. However, since the vessel, working on the line, moves in both forward and reverse directions, it was decided to neglect this difference.

The main data sources, regulatory documents used and the procedure for

calculating costs by cost items are presented in Table 3.

Pic. 4 shows the ratio of cost items under basic conditions: distance – 500 km, delay on the line (one way) – 1,65 days, fuel price – 25 thous. rub./t, duration of the navigation period – 215 days, gas carrier/container vessel price is 2050/1100 mln rub., the average salary of command/rank staff is 80/38 thous. rub. per month, crew number on gas carrier/ container vessel is of 16/12 people. As it can be seen, the main differences in the cost structure are due to the number of vessels and the difference in



Pic. 4. Cost structure for maintaining vessels during LNG transportation.

their cost, which determines the amount of fuel costs and depreciation of vessels.

Unit cost of transportation under basic conditions is 12,7 rub./t • km for tank containers (excluding their cost) and 4,2 rub./t • km for a bulk method of transportation. If in case of road transportation, the cost of container fleet practically does not affect the cost of transportation, since the number of containers is small due to high speed of delivery, then in case of water transport, taking this factor into account leads to a significant rise in price. So, under basic conditions, 283 containers are needed, which leads to an increase in unit cost of transportation by 2,8 rub./t • km (from 12,7 to 15,5 rub./t • km).

The sensitivity analysis of SSC model was performed similarly to SME model. It was found that the dominant influence on the unit cost c is exerted by transportation distance (6,58). Other highly influential factors are vessel delay on the line (0,68), navigation duration (0,39), vessel cost (0,30), and fuel cost (0,17). The transportation intensity has no effect, that is, the absolute costs are directly proportional to the volume of transportation. This is because all costs except fuel costs in SSC model are accepted in fractions of the vessel cost. The significant influence of duration of the navigation period is due to the fact that useful work of the vessel occurs only during navigation, accordingly, all annual costs must be compensated for in this period. Based on this analysis, the structure of the regression dependence was chosen in such a way as to take into account two main pricing factors, which are vessel cost and fuel price, and not to introduce any other parameters that take into account inflation. Unit cost of LNG transportation by water transport is determined by the ratio:

$$c_{\text{water}} = k_{\text{pr}} \cdot (c_{\text{fl}} + c_{\text{oth}}), \quad (9)$$

where c_{fl} means unit costs for fuel and lubricants;

c_{oth} means other unit costs;

$k_{\text{pr}} = 1,035$ is the coefficient, considering profitability of transportation.

The cost components in formula (9) are determined by the following relationships:

$$c_{\text{fl}} = [(T_0 + b_1)/L_{\text{cargo}} + b_2] \cdot c_{\text{fuel}}; \quad (10)$$

$$c_{\text{oth}} = b_3 \cdot [(b_4 - T_n^{b_5}) \cdot (c_v + b_6) \cdot (T_0 + b_7) / L_{\text{cargo}} + (T_0 + 1)^{b_8} + b_9 \cdot c_v], \quad (11)$$

where T_n means duration of navigation, taken in the range from 180 to 365 days;

T_0 varies in the range from 0 to $T_{0 \text{ max}} = 0,005 \cdot L_{\text{cargo}} + 0,4$;

L_{cargo} is the distance of transportation (vessel trip with cargo), km;

c_{fuel} is the fuel price, thous. rub./t (arbitrary range of values);

c_v is the vessel cost, mln rub. (arbitrary range of values);

$b_1 - b_9$ are regression coefficients taken according to Table 4.

The model assumed that the distance run by the vessel in ballast is equal to the distance run by a laden vessel. The error analysis of the regression formula (9) was performed in the same way as for SME model. The ranges of variation of various indicators are as follows: the cost of a gas carrier vessel is 1630–2400 mln rub. the cost of a container vessel is 890–1200 mln rub. payroll of command personnel is \$1200–1800 per month, that of the rank personnel is \$450–900 per month, dollar rate is 50–100 rub./dollar; duration of navigation is 180–365 days.

Correspondence of regression and model values is shown in Pic. 5, which demonstrates a fairly high accuracy of the regression model having the following indicators:

- tank containers $S = 0,538$ rub./t • km, $A = 4,2$ %, $R^2 = 0,985$;
- vessel tanks $S = 0,256$ rub./t • km, $A = 5,0$ %, $R^2 = 0,980$.



Table 4

Regression coefficients

Coefficient	Tank containers	Vessel tanks
b_1	2,0638	0,7639
b_2	0,0773	0,0091
b_3	1,3957	0,4726
b_4	5,5701	3,8432
b_5	0,2808	0,2180
b_6	157,35	130,01
b_7	0,2206	0,3704
b_8	-0,0861	-0,1063
b_9	0,0014	0,0008

4. Railway transport

To obtain the values of the unit cost of LNG delivery by rail, the data of TMkarta system were used. Based on the ranges of distance and transportation intensity specified in formula (1), a calculation matrix was formed that includes 44 routes and 21 values of daily transportation intensity. Routes were chosen in such a way as to ensure a change in distance by increments of 50 km, and so that the geography of transportation would cover the entire European part of Russia. The transportation intensity also varied with a constant step of 250 t/day. Further, for each combination of route and cargo flow, the values of the tariff rate and travel time for bulk and container transportation at low (cargo speed, speed of laden train) and high speeds were determined.

The fee for transportation of goods by rail is calculated for the distance determined in accordance with Tariff Guide No. 4, therefore L_{cargo} is taken equal to the tariff distance. Tariffs for transportation by rail include fee for mileage of loaded and empty wagons with a locomotive and cost of services for using the infrastructure of JSC Russian Railways, while fees for cargo (loading/unloading) operations must be

calculated separately. As rolling stock in the calculations, we used a tank car for transportation of LNG and ethylene of model 15–5106 with a carrying capacity of 23,56 tons (bulk transportation), as well as a four-axle fitting platform for transportation of heavy containers and a tank container model KCM-40/0,7 (container transportation). The dimensions and landing dimensions of KCM-40/0,7 allow transporting two loaded tank containers on a single platform [22; 23]. The number of cars in the train was assumed to be 75, that is, a single train carries either 75 tank cars or 150 LNG tank containers. The platform's ownership was indicated in TMcard system as «common fleet», and tank cars and tank containers as its own fleet, that is, neither tanks nor containers are included in the cost of transportation.

The analysis of the obtained data showed that the factors determining the cost of transportation comprise three parameters: cargo flow, distance and urgency of delivery. This made it possible to form the following relationships for determining the unit cost of LNG transportation:

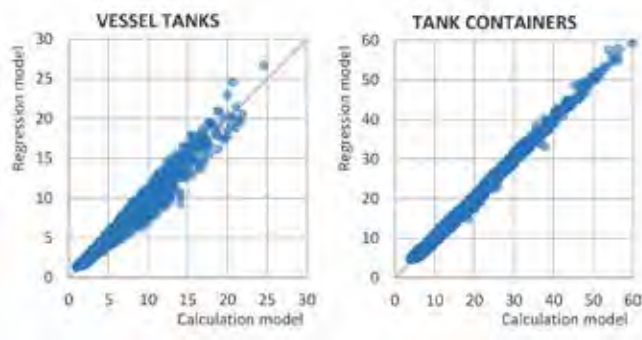
$$c_{\text{railway}} = k_{\text{ds}} \cdot \left[\frac{e_1 \cdot Q^{e_2} \cdot L_{\text{cargo}}^{e_3}}{(L_{\text{cargo}}^{e_4} + e_5) + e_6 \cdot L_{\text{cargo}}^{e_7}} \right], \quad (12)$$

where k_{ds} is the coefficient of delivery speed, determined according to the ratio:

$$k_{\text{ds}} = \begin{cases} 1, & \text{low speed;} \\ e_8 \cdot \ln(Q) + e_9 \cdot \ln(L_{\text{cargo}})^{e_{10}} + e_{11} & \text{high speed;} \end{cases}$$

$a_1 - a_9$ are regression coefficients, taken according to Table 6.

Despite the random nature of choice of estimated routes in Russia, unit cost of transportation is approximated with fairly high accuracy, which indicates stability of the



Pic. 5. Correspondence of the regression values and the results of the calculation model of SSC.

Table 6

Regression coefficients

Coefficient	Tank containers	Tank cars
e_1	0,1222	0,0454
e_2	0	-64,302
e_3	0	-1,0307
e_4	-7,0141	0,0071
e_5	0,0495	-1,0231
e_6	244,02	106,70
e_7	-0,8709	-0,6673
e_8	0	0,0016
e_9	-16,303	-20,309
e_{10}	0,0347	0,0093
e_{11}	18,811	21,981

specific indicator as a whole. The accuracy indicators of the regression model (12) are as follows:

- tank containers $S = 0,089 \text{ rub./t} \cdot \text{km}$, $A = 1,4 \%$, $R^2 = 0,999$;

- tank cars $S = 0,170 \text{ rub./t} \cdot \text{km}$, $A = 3,4 \%$, $R^2 = 0,997$.

The resulting formula for determining c_{railway} does not take into account influence of inflationary processes, therefore, actualization of the obtained values for a specific date of transportation should be carried out by selective updating of information on design trips and by adjusting tariffs with regard to corresponding value. For example, from May to October 2018, the railway tariff for transportation of liquefied hydrocarbon gases (ETSNG [Single tariff and statistics nomenclature of cargo] 226074) had decreased by 3,4 %.

An important aspect of railway transportation is its duration T_{railway} . When normalizing data for railway transportation, delivery time is taken as a multiple of one day (see Pic. 6), however, it is more convenient to use smooth approximations to solve the calculation problems. In particular, in this work, a linear model was used, and it was assumed that duration of return of empty containers is equal to duration of laden transportation:

$$T_{\text{railway}} = 2 \cdot (f_1 \cdot L_{\text{cargo}} + f_2), \text{ hour}, \quad (13)$$

where f_1, f_2 are regression coefficients, taken according to Table 7.

Table 7 also shows indicators characterizing accuracy of dependence (13) and indicating its applicability for solving research problems. It should be noted that duration of delivery of tank containers is twice the duration of delivery of tank cars, which may be due to the peculiarities of formation of trains of various types. Dependence (13) does not consider duration of cargo operations, which, however, turns out to be significantly less than duration of transportation, and therefore may not be taken into account.

From Table 6 it can be seen that the railway tariff for container transportation does not depend on cargo flow, whereas when transported in tanks, such a dependence exists. With a distance of 500 km, a cargo flow of 500 t/day and low speed of delivery, the unit cost is 2,8 and 3,6 rub./t • km for transportation in tank cars and tank containers, respectively. However, cost of using tare very significantly adjusts the final

cost of delivery, increasing it by more than double. So, under these conditions, 365 tank cars or 998 tank containers are needed, while c_i is 3,7 and 5,8 rub./t • km, respectively. The coefficient of urgency of delivery for transportation in tank cars varies in the range from 1,293 to 1,463, and for container transportation from 1,337 to 1,839. The use of expedited delivery in all cases is impractical from the point of view of the total cost of transportation since a decrease in tare costs with an increase in delivery speed does not compensate for increase in tariff for transportation. For example, unit cost of delivery, taking into account tare costs (distance – 500 km, cargo flow – 500 t/day) at a low/high speed of delivery is 6,5/7,0 rub./t • km for tank cars and 9,4/10,1 rub./t • km for tank containers, respectively.

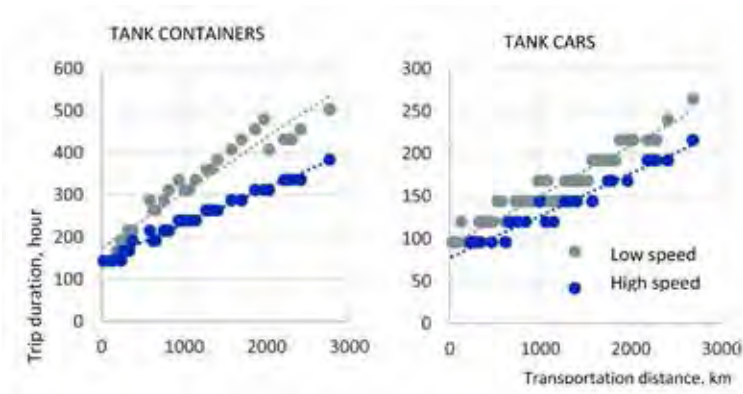
5. Cost of cargo operations

To obtain all the cost components of the intermodal logistic scheme for LNG transportation, the cost of cargo operations with containers and railway tank cars was estimated.

To determine the cost of transshipment of tank cars, the provisions of the Agreement on the International Railway Transit Tariff (MTT) [24]⁶ signed by Russia, were used. In accordance with section III «Additional fees and charges», fee for transshipment of liquid cargo carried in tank cars as of January 1, 2018 amounted to 1,2

⁶ OSJD Website http://osjd.org/doco/public/ru/STRUCTURE_ID=5034&layer_id=6073&refererLayerId=6076&id=1105 – ed. note.





Pic. 6. Duration of transportation on considered railway routes.

Table 7

Dependence parameters to determine duration of transportation by railway

Parameter	Tank containers		Tank cars	
	Low speed	High speed	Low speed	High speed
f_1	0,131	0,085	0,059	0,049
f_2	174	147	92	78
S, hours	28,6	9,5	10,1	7,8
A, %	8,5 %	3,6 %	5,7 %	5,0 %
R^2	0,927	0,979	0,938	0,958

CHF (Swiss francs) per 100 kg or 19827 rub. for transshipment of a design tank car, i.e. 842 rub./t. The authors of [1] determined the price of LNG transshipment into tank cars and from tank cars in Baikal region at the beginning of 2017 as 919 rub. per ton, which allows us to assess the estimated values for transshipment of railway tank cars as adequate.

Cargo operations during the container mode of transporting LNG can be divided into:

a) operations performed by special equipment when loading containers at LNG plants;

b) operations performed by forces and equipment of railway;

c) operations performed in ports.

Cargo operations performed on railway are calculated at the rates of fees of table No. 4 of Tariff Guide No. 3. For containers with gross weight of more than 30 tons, fee is 160 rub. per container operations, fee for operations with empty containers is charged with a coefficient of 0,75. In case of transshipment of LNG containers between rail and motor transport, two container operations fall on one container, and in case that an empty container is changed to loaded one there are four container operations.

Analysis of container transshipment tariffs in river ports and container transship-

ment tariffs in cabotage in Russian seaports⁷ showed a significant variation in the cost of those services. For example, cost of transshipment according to the «vehicle–warehouse–vehicle» scheme for loaded 40-foot containers is 8 350–12 480 rub./cont., and for empty ones the cost is of 4280–9110 rub./cont. In addition, exact values of cargo transshipment tariffs are subject to commercial secrets of port operator and cargo owner. Depending on the volume of cargo transshipment and the terms of the contract, various discounts on provision of services up to 50 % may be applied. In case of transshipment of dangerous goods, an increase in base tariffs is envisaged. Storage of goods beyond the normal time is paid separately. Therefore, to assess cost of cargo operations C_{co} in the ports with N_{un} containers, the following simplified approach was used:

⁷ [Electronic resources]:

<http://www.seaport.spb.ru/article/22>;
http://terminals.spb.ru/o_kompanii/raskritie_informacii;
<http://www.fct.ru/disclosure>;
<http://ulct.ru/disclosure>;
<http://bscbalt.ru/index.php?id=10#.W450r8J9iUk>;
http://www.nle.ru/for_clients/cargo_tarifs;
<http://rostovport.ru/klientam/uslugi>;
<http://www.arpnet.ru>;
<http://yarport.com/uslugi/pogruzochno-razgruzochnye-raboty.php>.

$$C_{co} = c_{load} \cdot N_{un} / P_{load}, \quad (14)$$

where P_{load} is productivity of a container loader of corresponding loading capacity, cont./day;

c_{load} is the cost of renting a container loader, rub./day.

According to the Websites of construction equipment rental companies, the cost of renting a container loader is from 1400 to 3000 rub. per hour. When renting a loader with a driver, rental price increases. Formula (14) can also be used to estimate the cost of cargo operations performed by special equipment when loading containers at LNG plants.

6. Comparison of cost of transportation by various modes of transport

Visualization of the obtained regression formulas for determining unit cost of transportation by all modes of transport is performed in Pic. 7, where the cost is given as a function of distance and cargo flow, while considering both the cost of transportation and the cost of acquiring and maintaining the container. For road transport, the following values of the parameters of the regression formulas are accepted:

$$L_{empty} = L_{cargo}, k_{pr} = 1, c_{fuel} = 48 \text{ rub./l.}$$

For water transport it is accepted that $T_n = 215$ days, $T_0 = 0,004 \cdot L_{cargo}$, $c_{fuel} = 25$ thous. rub./t, cost of a gas carrier/container vessel c_v is 2050/1100 mln rub. respectively. For rail transportation it is accepted that delivery is carried out at a low speed, since this reduces the total cost. The cost of cargo operations is not considered, since it depends on the logistic scheme, the characteristics of transshipment complexes, and in some cases can be included either in the cost of infrastructure or in transportation costs. Pic. 8 shows the areas on «distance—cargo flow» plane, illustrating where the use of various modes of transport is the most efficient regarding the following pairs: «road—railway» when transported in containers; «motor transport—railway» for bulk transportation; «water transport—railway» for bulk transportation.

The presented graphs allow us to draw several conclusions.

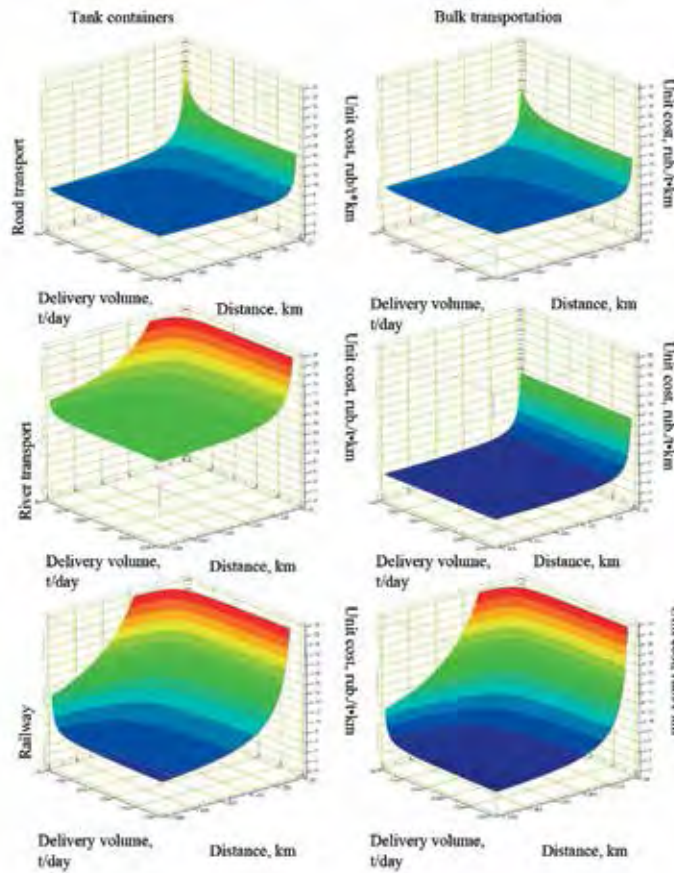
Railway transportation in tanks provides the lowest cost in case of high cargo flow and long-distance delivery, but they have a longer duration: average delivery speed even at high speeds does not exceed 10–12 km/h. The cost of delivering containers by railway is significantly

higher, and delivery time is even longer (average speed does not exceed 7 km/h). If the comparisons consider not only the costs of transportation and use of tare, but also the costs associated with the loss of LNG from evaporation, then low speed of delivery will significantly worsen performance of railway transport. However, it seems that in this case too, in case of a distance of over 800 km and a cargo flow of more than 1000 t/day railway transport will provide the best economic performance.

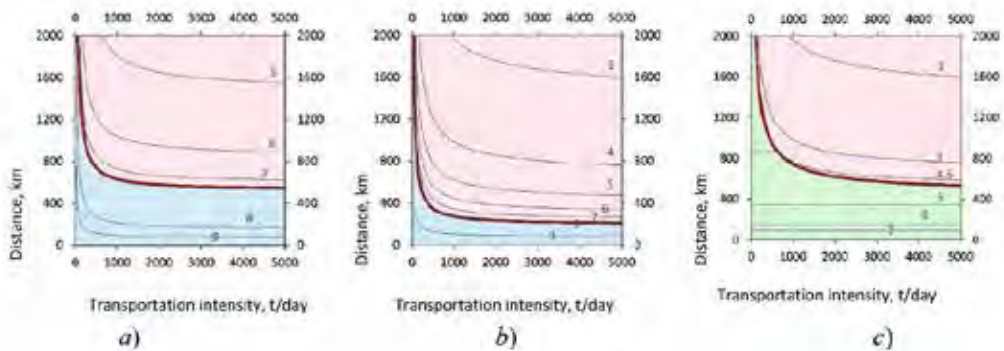
LNG transportation by gas carrier ships is cheaper than transportation in tank trucks (with the exception of very short distances, with a length of less than 20–30 km), but they are inferior in terms of efficiency to railway transport at long distances and greater cargo flows. Let us note that water transport is traditionally cheaper than railway, but in this case, its performance is significantly deteriorated by the limited navigation period and long duration of the voyage along SWS. In case of LNG transportation in bulk at short distances, when trip delays are minimal, water transport is more efficient than railway, and if there are no trip delays, it surpasses the railway for all combinations of distance and cargo flow, even in conditions of limited navigation. LNG container transportation by water is characterized by higher cost and can be excluded from further consideration. This is mainly due to low carrying capacity of vessels due to inability to transport LNG containers in the holds, as well as to the fact that long delivery period forces to have a very large fleet of containers, increasing the cost of maintaining tare. One of the advantages of LNG transportation with gas carriers is the absence of gas losses due to evaporation, which eliminates the additional costs due to this factor. However, transportation along SWS is seasonal, so the scope of river transport for transportation of low-tonnage LNG is rather limited.

Road transportation at long distances is inferior in effectiveness to other modes of transport, however, at short distances (even with high cargo flow), it is comparable to river transportation, and also surpasses railway transportation by a wider range of distances and cargo flows. This is explained mainly thanks to high delivery speed. If, when comparing road and railway transport, the costs associated with





Pic. 7. A characteristic shape of dependence of unit cost of transportation (including tare) on distance and delivery volume.



Pic. 8. Areas on «distance–transportation intensity» plane where the use of various modes of transport is most efficient: a – transportation in tank containers for «vehicle–railway» pair; b – transportation in bulk for a pair of «motor transport–railway»; c – bulk transportation for «water transport–railway» pair. The numbers on the graphs show lines of equal unit cost of transportation, considering the costs of using tare.

LNG losses from evaporation are considered, the ranges of distances and cargo flows at which motor transport is preferred will be further extended. In addition, road transport shows a minimal difference between cost of delivery in bulk and in tank containers, while for all other modes of transport this difference is much

larger. The reasons for small difference in case of road transport are obvious and comprise the minimum difference in capacity of the tank container and tank truck, as well as the same delivery time.

General conclusion. The regression formulas presented in this paper for determining the cost

of LNG transportation by road, railway and water transport are among core elements in solving the problem of designing infrastructure for transportation of liquefied natural gas in Russia.

The structure of the formulas ensures their versatility and the possibility of practical application for estimating the cost of LNG transportation, considering the features of intermodal logistics.

REFERENCES

1. Possibilities and prospects for development of small-scale LNG in Russia [*Vozможности i perspektivy razvitiya malotonnazhnogo SPG v Rossii*]. Moscow School of Management Skolkovo, 2018, 187 p. [Electronic resource]: <https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEnC/research06-ru.pdf>. Last accessed 03.07.2019.
2. Ketoeva, N. L., Orlova, Y. S. The development and energy efficiency of LNG in Russia. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, 288:012063. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012063. [Electronic resource]: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/288/1/012063/pdf>. Last accessed 03.07.2019.
3. Sharples, J. LNG supply chains and the development of LNG as a shipping fuel in Northern Europe. February, 2019. DOI: 10.26889/9781784671266. [Electronic resource]: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2019/01/LNG-supply-chains-and-the-development-of-LNG-as-a-shipping-fuel-in-Northern-Europe-NG-140.pdf?v=i9308c5d0596>. Last accessed 10.10.2019.
4. Buyanova, L. N., Mudrova, O. M. Logistics of Low-Tonnage LNG. *World of Transport and Transportation*, Vol. 17, 2019, Iss. 4, pp. 166–180.
5. MarTech LNG. LNG fuel bunkering procedures in ports and terminals in the south Baltic Sea region. Study On LNG Bunkering Procedures for Current and Potential LNG Stakeholders in the frame of the EU project «Maritime Competence, Technology and Knowledge transfer for LNG (Liquefied Natural Gas) in the South Baltic Sea Region – MarTech LNG» funded by European Regional Development Fund (ERDF) within the South Baltic Programme 2007–2013–2014. [Electronic resource]: <http://www.golng.eu/files/Main/PDF/SBSR.pdf>. Last accessed 10.10.2019.
6. Guidance on LNG bunkering to port authorities and administrations. Lisbon: European Maritime Safety Agency (EMSA), 2018, 42 p. [Electronic resource]: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2018/02/EMSA-Guidance-on-LNG-Bunkering-to-Port-Authorities-and-Administrations-2018_02.pdf. Last accessed 04.10.2019.
7. Nikolaychuk, V. E. Logistic management: Textbook [*Logisticheskiiy menedzhment*], 2nd ed. Moscow, Dashkov and Co., 2017, 980 p.
8. Mochalin, S. M., Levkin, G. G., Terentyev, A. V., Zarudnev, D. I. Logistics: Study guide [*Logistika: Ucheb. posobie*]. Moscow-Berlin, Direct-Media publ., 2016, 168 p.
9. Yashin, A. A., Ryashko, M. L. Logistics. Fundamentals of planning and evaluating the effectiveness of logistics systems: Study guide [*Logistika. Osnovy planirovaniya i otsenki effektivnosti logisticheskikh sistem: Ucheb. posobie*]. Yekaterinburg, Publishing House of the Ural University, 2014, 53 p.
10. Levkin, G. G. Fundamentals of logistics: Study guide [*Osnovy logistiki: Ucheb. posobie*]. Moscow, Infra-Engineering, 2014, 240 p.
11. Cepeda, M. F. S., Caprace, J. D. Data envelopment analysis of navigation records improve ship fleet management. Offshore Technology Conference Brasil 2015 (OTC-Brazil 2015). DOI: 10.4043/26298-MS. Last accessed 10.10.2019.
12. European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. Vol. 1 and Vol. 2, United Nations, New York and Geneva, 2018. Last accessed 10.10.2019.
13. Appendix No. 4 to the Order of the Federal Tax service of Russia dated 30.05.2007 No. MM-3-06/333 «On Approving the Concept of a Planning System for Field Tax Audits». [Electronic resource]: https://www.nalog.ru/rn77/taxation/reference_work/conception_vnp/. Last accessed 12.10.2019.
14. Ibragimov, Yu. R. LNG transportation by road [*Perevozki SPG avtomobilnym transportom*]. Website of Leader Special Trans LLC. [Electronic resource]: http://lider1.ru/a/perevozki_spg_avtomobilnym_transportom. Last accessed 03.06.2019.
15. TransAvtoCistern LLC Website. [Electronic resource]: http://трансавтоцистерна.рф/prays_list. Last accessed 12.10.2019.
16. Tariffs for transportation of goods in Russia [*Tarify na perevozku gruzov po Rossii*]. Website AvtoPravozashchita.ru. [Electronic resource]: <http://avtopravozashchita.ru/perevozki/tarify-na-perevozku-gruzov.html>. Last accessed 12.10.2019.
17. Consumer price indices for the Russian Federation in 1991–2018 [*Indeksy potrebitelskikh tsen po Rossiiskoi Federatsii v 1991–2018*]. The official Website of the Federal State Statistics Service. [Electronic resource]: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/prices/potr/tab-potr1.htm. Last accessed 12.10.2019.
18. Standard CNIIMF STO YAKUT.23.01-2019. Feasibility study for design and construction of vessels. The main provisions.
19. Matskevich, V. A., Romanov, R. Yu., Lutskevich, A. M., Tarovik, O. V., Dekhtyaruk, Yu. D., Korablyova, M. S. Prospects for transportation of liquefied petroleum gas by vessels of mixed river–sea navigation [*Perspektivy transportirovki szhizhennogo neftyanogo gaza sudami smeshannogo «reka–more» plavaniya*]. *Sudostroenie*, 2011, Iss. 6, pp. 13–17.
20. The official Website of the Marine Engineering Bureau. RSD19 project. [Electronic resource]: <http://www.meb.com.ua/dry/RSD19.html>. Last accessed 12.10.2019.
21. International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC Code). St. Petersburg, CNIIMF, 2016, 474 p.
22. GOST R [Russian State standard] 53350-2009 (ISO 668:1995). Series 1 freight containers – Classification, dimensions and ratings (as amended by No. 1) [*GOST R53350-2009 (ISO 668:1995). Konteynery gruzovye serii 1. Klassifikatsiya, razmery i massa (s izm. № 1)*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200072594/>. Last accessed 12.10.2019.
23. Rolling stock. Four-axle fitting platform for transportation of heavy containers, model 13-2118 [*Podvizhnoy sostav. Chetyrekhsnaya fitingovaya platforma dlya perevozki bolshegruznykh konteynerov, model' 13-2118*]. [Electronic resource]: http://cargo.rzd.ru/static/public/ru/STRUCTURE_ID=5140&layer_id=3290&id=2169. Last accessed 12.10.2019.
24. Agreement on the International Railway Transit Tariff (MTT) (with amendments and additions as of 01.01.2019). [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/902124118>. Last accessed 12.10.2019. ●





Совершенствование бизнес-аналитики в управлении на транспорте



Пастухов Сергей Сергеевич — Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), Москва, Россия.*

Сергей ПАСТУХОВ

При решении актуальных вопросов совершенствования процессов управления на транспорте важным направлением роста эффективности является развитие бизнес-аналитики, являющейся источником объективной и наглядной информации, необходимой менеджменту для принятия решений.

Одной из актуальных сфер её применения на железнодорожном транспорте является сравнительный анализ вклада локальных и региональных подразделений в совокупную деятельность железнодорожной инфраструктурной или операторской компании.

В случае ОАО «РЖД» чрезвычайно востребованной является оценка эффективности деятельности региональных центров корпоративного управления, в зоне ответственности которых находится координация деятельности в границах железных дорог — филиалов компании.

Целью статьи является изложение новых методических и практических аспектов формирования и развития инструментария бизнес-аналитики процесса построения экономических оценок долевого вклада каждой железной дороги (рассматриваемой как совокупность структурных подразделений в составе регионального центра корпоративного управления) в результаты деятельности ОАО «РЖД».

Ключевые слова: транспорт, управление транспортом, железные дороги, экономические модели, ключевые показатели эффективности, факторный анализ, бизнес-аналитика, информационные панели.

*Информация об авторе:

Пастухов Сергей Сергеевич — кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник Научного центра «Экономика комплексных проектов и тарифообразование» АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ), Москва, Россия, pastuhovsergey@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 08.07.2019, принята к публикации 17.10.2019.

For the English text of the article please see p. 175.

ВВЕДЕНИЕ

В эру цифровой экономики развитие информационных систем поддержки принятия решений становится для компаний ключевым аспектом обеспечения высокой рыночной конкурентоспособности [1, с. 1–28].

Одним из важнейших компонентов таких систем является инструментарий бизнес-аналитики [1, с. 210–240; 2, с. 2–67], который служит для менеджмента источником исчерпывающей, объективной и наглядной информации, требуемой для формирования своевременных эффективных управленческих решений.

Изучение накопленного зарубежного опыта и современных тенденций развития теории и практики бизнес-аналитики [1–5] позволяет сделать вывод, что залогом её эффективности является разработка и последующее непрерывное развитие следующих тесно интегрированных механизмов:

- сбор, обработка данных и формирование специализированных показателей, характеризующих деятельность компании, её конкурентов и состояние рынка;
- создание экономико-математических и статистических моделей, а также алгоритмов их использования для анализа и прогнозирования с целью выявления ключевых приоритетов при решении управленческих задач;
- формирование визуального интерфейса для удобного взаимодействия менеджера с исходными данными, применяемыми показателями, настройками моделей, а также механизмами наглядного представления результатов моделирования и анализа в виде, удобном для принятия управленческих решений с учётом специфики изучаемого бизнес-процесса.

По мнению зарубежных специалистов, [6, с. 1–6], для транспортных компаний именно активизация развития бизнес-аналитики является наиболее перспективным драйвером рыночного роста в текущих рыночных условиях.

Поэтому чрезвычайно важной и актуальной представляется необходимость дальнейшего совершенствования аппарата бизнес-аналитики в системах управления на транспорте.

Целью статьи является изложение новых методических аспектов совершенствования

аналитического инструментария, ориентированного на исследование комплексных экономических процессов в сфере управления железнодорожным транспортом, с рассмотрением практического аспекта применительно к построению бизнес-аналитики процесса формирования экономических оценок комплексных показателей эффективности (далее КПЭ) региональных центров корпоративного управления ОАО «РЖД» (далее – РЦКУ). При этом представляемая *методология* может быть легко адаптирована под специфику решения схожих задач и в других компаниях.

ВЛИЯНИЕ СПЕЦИФИКИ КПЭ СДВ РЦКУ НА ФОРМИРОВАНИЕ БИЗНЕС-АНАЛИТИКИ

Для обеспечения роста эффективности механизмов управления региональными структурами ОАО «РЖД» на основе территориального принципа (уровень начальников железных дорог) сотрудниками ВНИИЖТ ведётся непрерывная работа по формированию и развитию методологии КПЭ, основанных на экономических оценках сравнительного долевого вклада (далее СДВ) региональных центров корпоративного управления в результаты работы ОАО «РЖД».

Ключевые этапы в развитии методологии КПЭ СДВ РЦКУ, перечень утверждённых ОАО «РЖД» руководящих распоряжений, характеризующих её востребованность, а также текущее состояние аппарата расчётов детально рассмотрены в [7, с. 107–114; 8, с. 182–190].

В соответствии с решаемыми управленческими задачами, действующая система КПЭ СДВ представляет собой сложный, взаимоувязанный комплекс специальных алгоритмов расчёта [8, с. 184–185]:

- переменной части долевого вклада, определяемой на основе ежеквартальной обработки и агрегирования различных стоимостных суммарных сетевых сверхплановых величин в разнообразных аналитических разрезах (грузовые перевозки, пассажирские перевозки, прочие виды деятельности и т.д.) с последующим их распределением на основе специализированных измерителей;
- фиксированной части долевого вклада, формируемой на основе ежегодного



определения стоимостных суммарных сетевых сверхплановых величин по различным составляющим (с последующим их распределением на основе различных измерителей);

- удельной части долевого вклада, определяемой на основе ежеквартального агрегирования и сравнительной оценки показателей производительности и себестоимости;

- суммарного долевого вклада, рассчитываемого ежеквартально (на базе фиксированной, переменной и удельной частей) с использованием взвешивающих коэффициентов для обеспечения сбалансированности системы с точки зрения решения целей и задач управления, а также применением (при необходимости) механизмов коррекции долевых значений по верхнему/нижнему порогу.

Для выработки эффективных управленческих решений инструментарий бизнес-аналитики КПЭ СДВ должен обеспечивать руководству удобный доступ к исчерпывающей информации о ключевых факторах, определивших динамику величин СДВ каждого РЦКУ в результате сложившихся соотношений плановых и фактических величин для текущего и прошлого (базового) расчётных периодов.

Наличие в системе КПЭ СДВ множества различных алгоритмов, каждый из которых подразумевает реализацию многоэтапных расчётов [8, с. 185–190], с последующим агрегированием всех результатов при определении суммарного долевого вклада для каждого РЦКУ, во многом определяет необходимость использования концепции иерархического анализа в рамках методологии RCA [9, с. 35–54], хорошо зарекомендовавшей себя в комплексной аналитике сложных взаимоувязанных моделей зависимостей для целей управления железнодорожным транспортом [10–13].

Одним из важнейших аспектов достижения высокой оперативности и эффективности в принятии управленческих решений является обеспечение в рамках единого информационного окна максимальной доступности и наглядности сведений, требуемых руководству и аналитикам [5, с. 1–6; 14, с. 71–72;], что требует построения комплексных механизмов визуализации процесса и результатов расчёта

оценок влияния факторов на основе использования современных принципов формирования панелей инфографики (детальное изложение которых дано, например, в [11, с. 38–147]).

Объединение и группировку инфопанелей, в свою очередь, целесообразно осуществлять в рамках специализированного интерфейса на базе методологии построения интеллект-карт, как одного из наиболее удобных для аналитического восприятия инструментов структурного анализа применительно к данным большой размерности [16, с. 53–60].

Таким образом, инструментарий бизнес-аналитики, исходя из решаемых задач и специфики построения системы расчётов КПЭ СДВ РЦКУ, формируется на базе использования многоступенчатого факторного анализа (МФА), результаты которого представляются в виде инфопанелей, выстраиваемых на основе древовидного иерархического структурирования и ранжирования факторов по силе влияния на динамику анализируемой величины (рис. 1) от уровня итоговых агрегированных величин через все промежуточные этапы расчётов (принцип RCA «5 почему») до уровня неделимых показателей (например, цифр официальной отчётности), для которых дальнейшее деление на составляющие уже нецелесообразно с точки зрения решения задач управления.

МЕТОДОЛОГИЯ МФА И МЕХАНИЗМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ НА ПРИМЕРЕ БИЗНЕС-АНАЛИТИКИ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ РАБОТЫ РЕГИОНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА БАЗЕ КПЭ СДВ

Предлагаемая методология МФА подразумевает формирование «ядра» аналитических алгоритмов с последующим поэтапным выстраиванием на его основе иерархических цепочек из специализированных типов инфопанелей для наглядного и удобного представления необходимых сведений:

- о величине и динамике ключевых величин, а также результатах оценки (алгоритмами «базового ядра») сравнительной силы влияния изучаемых факторов в рамках исследуемой модели;

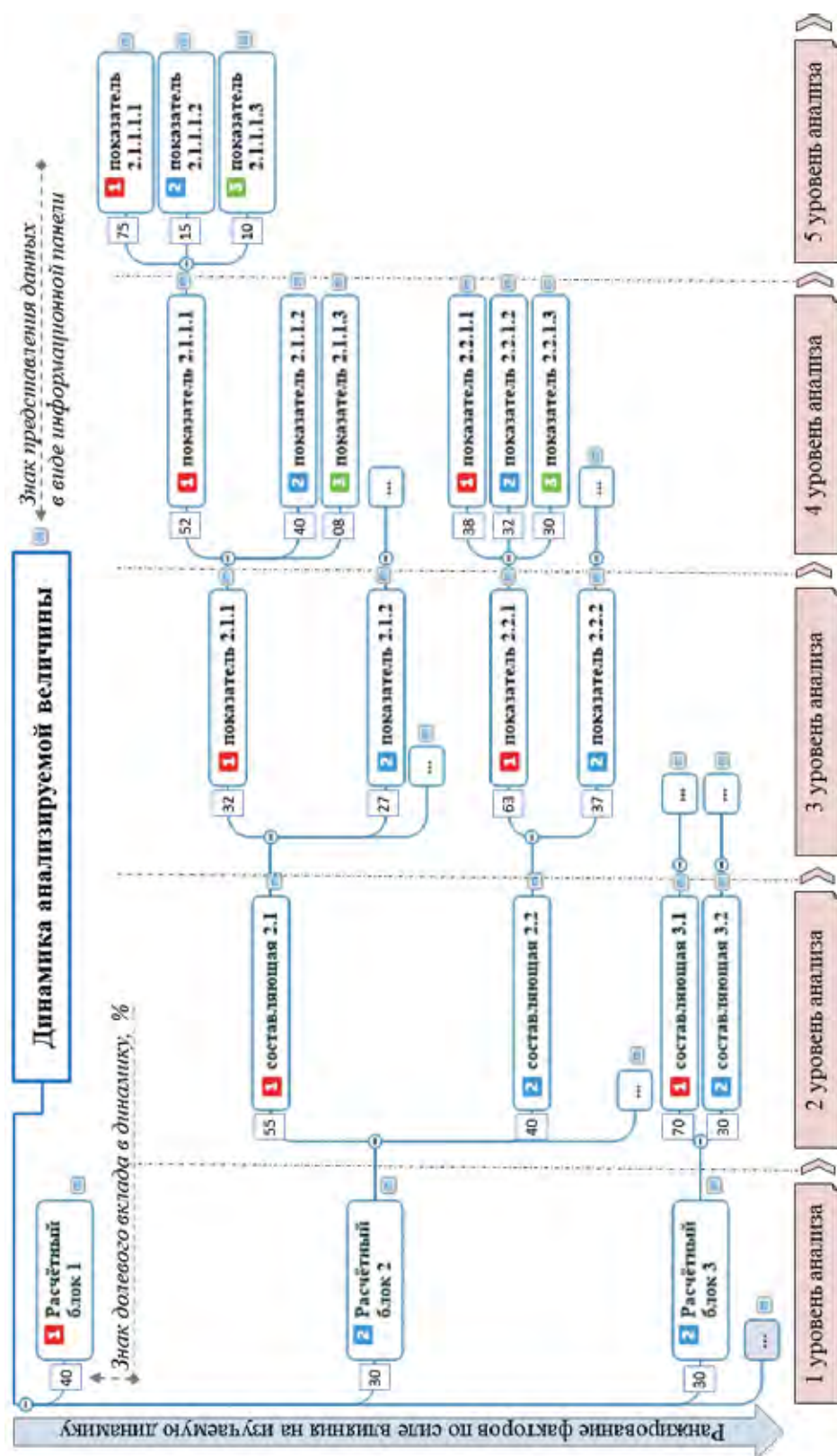


Рис. 1. Схема многоступенчатого факторного анализа с использованием инфопанелей в рамках иерархического древовидного структурирования и ранжирования факторов по силе влияния.

Изменение в 1кв17 по сравнению с 4кв16 (1кв17-4кв16)	Сверхплановые доходы от грузовых перевозок			Сверхплановая прибыль от прочих ВД			Всего				
	фиксир. часть	перем. часть	сумма	фиксир. часть	перем. часть	сумма	фиксир. часть	уд. часть	перем. часть	корр. по инжн. порогу	сумма
1 ОКТ	0,06%	-0,46%	-0,40%	0,34%	0,15%	0,48%	-0,99%	0,00%	-0,76%	0,03%	-1,72%
2 КЛГ	0,01%	0,09%	0,10%	0,03%	0,10%	0,13%	0,03%	0,00%	0,19%	-0,22%	0,00%
3 МСК	0,15%	-0,65%	-0,50%	0,89%	-0,61%	0,27%	-0,07%	0,00%	-1,14%	0,03%	-1,18%
15 ЗАБ	0,23%	0,33%	0,57%	0,09%	0,08%	0,18%	0,18%	0,08%	0,44%	0,02%	0,71%
16 ДВС	0,14%	0,00%	0,14%	0,25%	0,15%	0,39%	0,23%	0,03%	0,16%	0,01%	0,43%
Итого	2,50%	-0,50%	2,00%	3,84%	0,39%	4,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
ΣΔ%/порога	0,16%	0,27%	0,33%	0,25%	0,11%	0,27%	0,24%	0,08%	0,39%	0,03%	0,53%

Рис. 2. Фрагмент основной инфопанели 1 ступени МФА для оценки динамики СДВ в разрезе всех составляющих (представлены условные цифры).

• о вспомогательных аналитических метриках детализации различных аспектов факторного влияния, включая отражение значений и динамики для исходных неделимых (для конкретного уровня анализа) величин.

«Ядро» аналитических алгоритмов, учитывая специфику построения системы расчётов КПЭ СДВ РЦКУ, базируется на комбинировании трёх методов факторного анализа: долевого участия; цепных подстановок; усреднения влияния по полному перебору перестановок параметров в модели (называемого также методом взвешенных конечных разностей [17, с. 38]).

Более детально предлагаемые подходы к формированию «ядра» МФА и его визуализации будут рассмотрены непосредственно на примере построения базовой цепочки ключевых типов опорных инфопанелей, используемых в бизнес-аналитике процесса ежеквартальной комплексной оценки динамики эффективности работы региона железных дорог. Стоит отметить, что, исходя из решаемых задач, и наблюдаемых результатов, количество, вид и последовательность инфопанелей в аналитической цепочке могут существенно варьироваться,

и в рамках статьи не ставится задача представить их полный перечень, который в настоящее время по всем уровням иерархии включает в себя 26 различных типов.

Одна из важных задач, решаемых в рамках бизнес-аналитики КПЭ методом МФА, заключается в выявлении ключевых факторов, определяющих (в общей модели расчётов) изменения агрегированного показателя СДВ (используемого, в том числе, и в распределении мотивационного фонда начальника железной дороги [8, с. 182]), для целей выработки управленческих решений, направленных на ликвидацию «узких мест», не позволивших (в наблюдаемом периоде) добиться необходимой руководству динамики СДВ.

Учитывая комплексный характер расчётов с наличием множества различных взаимосвязанных алгоритмов, цепочка поиска ключевых факторов, как правило, начинается (первая ступень детализации МФА) с изучения данных основной инфопанели динамики изменения СДВ в разрезе всех составляющих (рис. 2). Важно отметить, что формат статьи не позволяет в полной мере отразить все реализуемые в инфопанелях решения по интерактивности. Так, для ин-

Изменение в фикс. части	Фикс. часть вклада в сверхплановые доходы от грузовых перевозок			Фикс. часть вклада в сверхплановую прибыль от прочих ВД			Фикс. часть вклада в экономию затрат, за искл. амортизации			Итоговая величина фикс. части		
	12м15	12м16	+/-	12м15	12м16	+/-	12м16	12м17	+/-	12м15	12м16	+/-
1 ОКТ	3,92%	3,98%	0,06%	1,17%	1,51%	0,34%	0,00%	0,00%	0,00%	8,11%	7,13%	-0,99%
16 ДВС	4,40%	4,54%	0,14%	0,97%	1,22%	0,25%	0,00%	0,00%	0,00%	5,67%	5,91%	0,23%
Итого	52,82%	55,32%	2,50%	13,82%	17,66%	3,84%	0,00%	0,00%	0,00%	80,00%	80,00%	0,00%
ΣΔ%/порога			0,16%			0,25%			0,00%			0,24%

Рис. 3. Фрагмент одной из вспомогательных инфопанелей первой ступени МФА (представлены условные цифры).

Дорога	Изменение переменной части вклада в индекс (1кв17–4кв16)	в том числе из-за изменений:				Размер сверхпланового условного дохода по дороге, млн руб.		
		Размера сверхпланового условного дохода по дороге (ΔА)	Размера сверхпланового условного дохода по сети (ΣΔА)	Суммы сверхплановых доходов от грузовых перевозок (Σгр)	Суммарного индекса вклада (И)	4кв16	1кв17	1кв17 / 4кв16
ОКТ	-0,46%	-0,582%	0,140%	-0,170%	0,149%	898,8	154,1	0,22
КЛГ	0,09%	0,034%	0,066%	-0,080%	0,070%	40,7	72,2	1,78
МСК	-0,65%	-0,650%	0,003%	0,000%	0,000%	838,3	0,0	0,00
ГОР	0,25%	0,263%	0,223%	-0,272%	0,238%	0,0	215,5	—
СЕТЬ	0,50%	3,32%	3,32%	4,04%	3,53%	6756,24	3651,21	0,54
Значение суммарного индекса вклада (И), млн руб.:						11191,87	5307,72	0,47
Размер сверхплановой величины в суммарном индексе (0,1*0,7*Σгр), млн руб.:						808,57	356,69	0,44

Рис. 4. Фрагмент основной инфопанели второй ступени МФА по переменной части вклада от грузовых перевозок (представлены условные цифры).

фопанели (рис. 2) предусматривается, что при наведении курсора мышки на ячейку инфопанели во всплывающем окне демонстрируются исходные величины изучаемых кварталов, а при правом щелчке мышью по ячейке, даётся возможность добавления текстовой заметки либо выбора другого типа инфопанели, включающей в себя значения данной ячейки (например, инфопанели, представленной на рис. 3).

Представленные в инфопанелях значения наблюдаемой динамики на уровне отдельных РЦКУ и в целом по сети (в разрезе всех составляющих суммарного индекса) определяются на основе использования факторного анализа методом долевого участия [17, с. 39], согласно формуле:

$$\Delta_{\chi-i} = \alpha_{\chi-i} - \alpha_{\chi-i}^{base}, \tag{1}$$

где $\alpha_{\chi-i}$, $\alpha_{\chi-i}^{base}$ – текущее (изучаемое) и базовое (выбранное как основа для сравнения) значения долевого вклада (в процентах) по i -му РЦКУ, полученные на основе применения χ -го вида алгоритма расчёта (детально описаны в [8, с. 185–190]), определяемого типом расчётной части (фиксированная, переменная, удельная, корректирующая) и видом деятельности (грузовые перевозки, пассажирские перевозки, прочие виды деятельности).

Анализ в разрезе каждой из первых 16 строк инфопанели (рис. 2), с использованием приёма визуализации «тепловая карта» позволяет наглядно увидеть, из чего сложилось наблюдаемое на конкретной дороге изменение суммарного долевого индекса, а также понять, какой тип расчёт-

ной части и вид деятельности оказали наибольшее влияние.

Строка итогов, в свою очередь, отражает перераспределение совокупного влияния в рамках суммарного вклада конкретных видов деятельности и в разрезе применяемых типов расчёта.

Кроме того, в рамках инфопанели динамики изменения СДВ для сравнения силы влияния χ -х видов алгоритмами расчётов на наблюдаемый уровень изменчивости долевого вклада дорог, применяется аналитическая метрика «Средняя величина наблюдаемых изменений в расчёте на одну дорогу» (последняя строка инфопанели), определяемая по формуле:

$$v_{\chi} = \frac{\sum_{i=1}^{16} |\Delta_{\chi-i}|}{16}, \tag{2}$$

где $\Delta_{\chi-i}$ – значения наблюдаемой динамики по i -му РЦКУ, полученные на основе применения χ -го вида алгоритма расчёта.

Следует отметить, что в итоговой стадии долевого расчётов [7, с. 107–114; 8, с. 185–190] по каждому из изучаемых видов деятельности используется универсальная модель из четырёх элементов:

- выбранный интегральный «измеритель распределения» для железных дорог (оказывающий непосредственное влияние на формирование сверхплановых финансовых величин и в наибольшей степени подходящий для целей сравнения деятельности в рамках решения конкретных управленческих задач);
- сумма интегрального «измерителя распределения» по всем железным дорогам;



- сверхплановая финансовая величина для распределения, полученная всеми железными дорогами;

- суммарный индекс долевого вклада, агрегирующий все сформированные сверхплановые финансовые величины.

Поэтому на второй ступени детализации МФА по выделенным видам деятельности (оказавшим наиболее сильное влияние на динамику суммарного долевого вклада) проводится поиск ключевых факторов влияния на основе применения метода цепных подстановок (общий механизм которого изложен в [17, с. 33–34]; а различные аспекты использования для решения практических задач железнодорожного транспорта – в [13, с. 51–59; 18, с. 41–178; 19, с. 254–262]).

Для фиксированной и переменной расчётных частей по каждому из видов деятельности сопоставимое доленое влияние исследуемых факторов определяется решением системы уравнений:

$$\begin{aligned} S_{a_j}^{\psi_z} &= 100 \% \left(\Delta \Phi_{a_j}^{\psi_z} / \sum_{z=1}^4 \Delta \Phi_{a_j}^{\psi_z} \right); \\ \Delta v_{a_j} &= \sum_{z=1}^4 \Delta \Phi_{a_j}^{\psi_z} = \\ &= k_{ja} y_{ja} \left(\left(u_{oia} / \sum_{i=1}^{16} u_{oia} \right) (S_{oja} / v_{oa}) - \right. \\ &\quad \left. - \left(u_{hia} / \sum_{i=1}^{16} u_{hia} \right) (S_{hja} / v_{ha}) \right); \\ \Delta \Phi_{a_j}^{\psi_1} &= k_{ja} y_{ja} \left((u_{hia} - u_{oia}) / \sum_{i=1}^{16} u_{hia} \right) (S_{hja} / v_{ha}); \\ \Delta \Phi_{a_j}^{\psi_2} &= k_{ja} y_{ja} u_{oia} \left(1 / \sum_{i=1}^{16} u_{oia} - 1 / \sum_{i=1}^{16} u_{hia} \right) (S_{hja} / v_{ha}); \\ \Delta \Phi_{a_j}^{\psi_3} &= k_{ja} y_{ja} \left(u_{oia} / \sum_{i=1}^{16} u_{oia} \right) ((S_{oja} - S_{hja}) / v_{ha}); \\ \Delta \Phi_{a_j}^{\psi_4} &= k_{ja} y_{ja} \left(u_{oia} / \sum_{i=1}^{16} u_{oia} \right) S_{oja} (1 / v_{oa} - 1 / v_{ha}), \end{aligned} \quad (3)$$

где a – тип части долевого вклада (фиксированная либо переменная);

y_{ja} – коэффициент взвешивания, обеспечивающий сбалансированность влияния анализируемой a -ой части долевого вклада дороги в суммарном индексе с точки зрения выполнения задач мотивации [8, с. 188];

k_{ja} – взвешивающий коэффициент для j -ого вида деятельности при расчёте суммарного индекса в рамках a -ой части долевого вклада;

Δv_{a_j} – наблюдаемое изменения в суммарном индексе долевого вклада в рамках его a -ой части по j -ому виду деятельности на i -ой дороге;

$\Delta \Phi_{a_j}^{\psi}$ – влияние фактора ψ на изменение Δv_{a_j} при сравнении начальных (h) и окончательных (o) условий расчёта;

ψ_1 – фактор динамики применяемого измерителя распределения (u) на i -ой дороге;

ψ_2 – фактор динамики суммарной для всех дорог величины измерителя распределения;

ψ_3 – фактор динамики распределяемой сверхплановой финансовой величины (S);

ψ_4 – фактор динамики суммарного индекса долевого вклада (v);

$S_{a_j}^{\psi_z}$ – величина, отражающая долю влияния z -го фактора ψ на изменчивость Δv_{a_j} .

Применение метода цепных подстановок на данном этапе факторного анализа обосновано тем, что использование динамики суммарного индекса долевого вклада в качестве последнего изучаемого фактора позволяет отразить в нём (через неразложимый остаток) влияние взаимодействия остальных факторов, что полностью соответствует методической сути суммарного индекса вклада дорог, являющегося интегральным показателем для оценки сравнительной результативности деятельности [7, с. 106–108; 8, с. 184–186].

Тип инфопанелей, используемый для визуализации результатов второй ступени МФА в разрезе фиксированной и переменной частей расчёта по видам деятельности, представлен на рис. 4.

Для каждой из дорог в столбцах 2–6 инфопанели по каждой из первых 16 строк представлены (с использованием приёма инфографики «тепловая карта») оценки влияния каждого из четырёх факторов элементов на динамику долевого вклада.

В столбцах 7–9 представлены используемые в анализе абсолютные величины измерителей для изучаемых временных разрезов (с визуализацией на основе «гистограмм»), а также вспомогательная аналитическая метрика, характеризующая темп их изменения.

Сравнение (в разрезе каждой из строк) величин, представленных во втором и третьем столбцах (с привлечением, при необходимости, данных последних

Вклад в суммарный индекс по сети от:	Величина, млн руб.			Доля в суммарном индексе вклада (И), %		Изменение структуры вклада (1кв17-4кв16), %	Доля 1кв17 в суммарном индексе вклада 4кв16, %	Вклад в наблюдаемое изменение суммарного индекса, %
	4кв16	1кв17	1кв17-4кв16	4кв16	1кв17			
Сумма сверхплановых доходов от грузовых перевозок (группа 0,7)	5085,7	3560,9	0,4	72,2%	67,2%	-5,0%	71,9%	-80,1%
Сумма сверхплановых доходов в части плат. перевозок (группа 0,7)	892,4	389,8	0,6	6,2%	7,3%	1,2%	5,5%	-21,7%
Сумма сверхплановой прибыли (слага)	2414,6	1251,0	0,9	21,6%	25,5%	3,9%	12,1%	-9,5%
Суммарный индекс (И)	11191,8	5397,7	0,8	100,0%	100,0%	-	47,4%	-52,6%

Рис. 5. Пример основной инфопанели третьей ступени МФА для аналитики суммарного индекса вклада в его переменной части (представлены условные цифры).

Дорога	4кв16				1кв17				1кв17-4кв16		1кв17/4кв16	
	План, млн руб.	Факт, млн руб.	Сверхпл. пол., млн руб.	Сверхпл. пол., %	План, млн руб.	Факт, млн руб.	Сверхпл. пол., млн руб.	Сверхпл. пол., %	Вклад в изменение сверхпл. пол. по сравнению с 4кв17	Сверхпл. пол., %	План	Факт
ОКТ	29968,630	29911,268	942,638	3,16%	31302,484	31444,241	141,757	0,45%	-0,93%	-5,38%	1,08	1,05
КРС	18448,607	18908,997	460,390	2,49%	18679,695	19245,602	565,907	3,03%	0,91%	7,32%	1,01	1,02
ВСБ	16671,237	16927,573	256,336	1,54%	16436,707	17003,636	566,929	3,45%	2,69%	3,99%	0,99	1,00
БАБ	3282,349	3211,421	219,702	6,70%	3103,548	3254,797	171,939	5,54%	-0,38%	1,55%	0,94	0,94
ДВС	27747,365	28540,188	792,823	2,86%	28947,873	29166,476	218,603	0,75%	-4,97%	-2,58%	1,04	1,02
Итого	326464,7	335015,73	11551,025	3,54%	339850,161	344545,795	5095,619	1,49%	-55,89%	0,00%	1,04	1,02

Рис. 6. Фрагмент основной инфопанели третьей ступени МФА для аналитики суммы сверхплановых доходов в переменной части вклада от грузовых перевозок (представлены условные цифры).

Дор.	Выгрузка плат., % в плане усл. дох.	Погрузка плат., % в плане усл. дох.	Опл. порож. пробег плат., % в плане усл. дох.	Грузов. тарифный планд., % в плане усл. дох.	Усредн. доход плат., %	Выгрузка факт., % в плане усл. дох.	Погрузка факт., % в плане усл. дох.	Опл. порож. пробег факт., % в плане усл. дох.	Грузов. тарифный факт., % в плане усл. дох.	Усл. доход факт., % в плане усл. дох.	Усл. доход (факт. - план), %	Сверхпл. доход, %
1кв17	0,80%	0,17%	1,89%	4,31%	7,37%	0,78%	0,31%	1,92%	4,14%	7,43%	0,06%	4,22%
ДВС	0,52%	0,19%	2,35%	5,23%	8,28%	0,50%	0,15%	2,34%	5,22%	8,24%	-0,04%	0,00%
Сеть	4,44%	4,99%	25,82%	64,76%	100,00%	4,45%	5,01%	26,31%	65,51%	101,23%	1,28%	100,00%
4кв16	0,73%	0,38%	1,78%	4,12%	7,03%	0,76%	0,39%	1,85%	4,27%	7,15%	0,25%	10,34%
ДВС	0,42%	0,20%	2,73%	5,24%	8,29%	0,50%	0,20%	2,99%	5,19%	8,19%	-0,10%	0,00%
Сеть	4,51%	5,01%	26,14%	64,34%	100,00%	4,61%	5,12%	26,45%	66,18%	102,36%	2,36%	100,00%

Рис. 7. Фрагмент основной инфопанели третьей ступени МФА для аналитики влияния показателей работы в переменной части от грузовых перевозок (представлены условные цифры).

№	Фиксация	План, млн руб.	Факт, млн руб.	Сверхпл. пол., млн руб.	Сверхпл. пол., %	План, млн руб.	Факт, млн руб.	Сверхпл. пол., млн руб.	Сверхпл. пол., %	Сверхпл. пол., %	Сверхпл. пол. абс.	План	Факт	Сверхпл. пол., млн руб.
1 ГВЦ		5,28	7,01	1,73	0,07%	0,05	0,71	0,65	0,05%	0,02%	-1,08	0,01	0,10	0,35
21 ДВРЗ		0,26	0,27	0,02	0,00%	0,24	0,33	0,09	0,01%	0,31%	0,46	0,95	1,25	5,91
Итого по ВСБ		-295,99	-45,01	299,14	12,39%	-310,31	-187,45	122,86	9,08%	13,0%	-176,27	1,89	4,16	0,41
СЕТЬ		5670,23	7360,38	2413,99	100,00%	4189,56	5265,12	1351,82	100,00%	-	-1062,97	0,74	0,72	0,56

Рис. 8. Фрагмент основной инфопанели четвертой ступени МФА для аналитики суммы сверхплановой прибыли от прочих видов деятельности в рамках расчёта переменной части (представлены условные цифры).

трёх столбцов), позволяет соотнести влияние на долевого вклад действий данной дороги (характеризуемых используемыми измерителями) относительно действий других дорог. Сопоставления каждой из строк четвертого и пятого столбцов показывают выявленное влияние динамики сверхплановых доходов

по изучаемому виду деятельности относительно сверхплановых величин по другим видам деятельности, сформировавшим в итоге значение суммарного индекса.

На третьей ступени детализации МФА по расчётам фиксированной и переменной частей долевого вклада осуще-



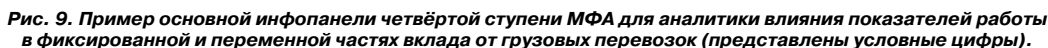


Рис. 10. Фрагмент основной инфопанели второй ступени МФА для аналитики удельной части долевого вклада (представлены условные цифры).

текущий и базовый) выделяются три группы расчётно-аналитических столбцов, характеризующих данные в разрезе железных дорог.

В первой группе (2–6 столбцы) на основе метода долевого участия демонстрируется влияние плановых значений каждого из показателей на интегральную величину распределения. При этом изменения долевого распределения плановых значений (в текущем временном разрезе по сравнению с базовым) выделяются с использованием приёма инфографики «двухцветные шкалы» (применительно к фону ячеек).

Во второй группе (7–11 столбцы) отдельно для базового и текущего периодов на основе выявления соотношений фактических значений к общей цифре плана, демонстрируется вклад каждого показателя в наблюдаемые изменения измерителя распределения (с визуализацией изменений в виде двухцветных шкал).

В третьей группе (12–13 столбцы) отражаются вклад дорог в формирование сверхплановой величины (для изучаемого вида деятельности), а также отклонения от плановых значений для измери-

теля распределения (при этом попарное сравнение ячеек первой и второй группы столбцов позволяет выявить влияние соответствующих показателей).

На четвёртой и последующих ступенях МФА по расчётам фиксированной и переменной частей долевого вклада осуществляется (при необходимости) дальнейшая детализация используемой в моделях информации, включая как разложение показателей, так и снижение уровней агрегирования используемых данных с целью выявления ключевых факторов влияния более низкого иерархического уровня (примеры инфопанелей даны на рис. 8 и 9).

При этом важно отметить, что метод цепных подстановок используется только на второй ступени МФА (при анализе универсальной модели из четырёх элементов), так как порядок факторов в моделях более низкого уровня уже не может быть однозначно обоснован. Там, где невозможно применить концепцию метода долевого участия, используется метод усреднения влияния по полному перебору перестановок параметров в модели. Наглядное пояснение метода и детали его практического использования изложены в [13, с. 56–58] на основе решения следующей универсальной (для любого типа модели при любом количестве параметров) системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} S_{\phi_i} &= 100 \% \left(\Delta F_{\phi_i} / \sum_{v=1}^z \Delta F_{\phi_v} \right); \\ \Delta F_{\phi_i} &= \left(\sum_{M=1}^z \sum_{w=1}^{(z-1)!} \Delta \Phi_M^{\text{var}_w} \right) / (z!); \\ 1 &< m < z; \\ \Delta \Phi_1^{\text{var}_w} &= f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{h_w}, \Phi_z^{h_w} \} - \\ &- f \{ \Phi_1^{h_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{h_w}, \Phi_z^{h_w} \}; \\ \Delta \Phi_m^{\text{var}_w} &= f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_m^{o_w}, \Phi_{m+1}^{h_w}, \dots, \Phi_z^{h_w} \} - \\ &- f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_m^{h_w}, \dots, \Phi_z^{h_w} \}; \\ \Delta \Phi_z^{\text{var}_w} &= f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{o_w}, \Phi_z^{o_w} \} - \\ &- f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{o_w}, \Phi_z^{h_w} \}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где S_{ϕ_i} — величина, отражающая долю влияния i -го фактора на изменчивость результирующей переменной $\sum_{v=1}^z \Delta F_{\phi_v}$ в сравнении с изучаемыми факторами;

ΔF_{ϕ_i} — величина, характеризующая (для целей сопоставления) абсолютное влияние i -го фактора в изучаемой модели взаимосвязи, содержащей z факторов, на наблюдаемую изменчивость результирующей переменной;

$\Delta \Phi_M^w$ — оценка влияния (на результирующую переменную) фактора, стоящего на M -ом месте в w -ом варианте перестановки факторов в изучаемой модели;

$z! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot z$ — факториал z , отражающий полное количество всех возможных вариантов перестановок факторов в изучаемой модели зависимости;

$f \{ \Phi_1, \dots, \Phi_{z-1}, \Phi_z \}$ — значение результирующей переменной, определяемое значениями факторов $\Phi_1, \dots, \Phi_{z-1}, \Phi_z$;

$\Phi_1^{o_w}, \Phi_m^{o_w}, \Phi_z^{o_w}$ — конечное значение фактора, стоящего, соответственно, на первом, m -ом и последнем местах в w -ом варианте перестановки факторов в изучаемой модели;

$\Phi_1^{h_w}, \Phi_m^{h_w}, \Phi_z^{h_w}$ — исходное значение фактора, стоящего, соответственно, на первом, m -ом и последнем месте в w -ом варианте перестановки факторов в изучаемой модели.

Используемые подходы к формированию многоступенчатых визуально-аналитических цепочек и соответствующего дизайна инфопанелей МФА в рамках удельной и корректирующей расчётных частей аналогичны изложенным выше (в рамках анализа по видам деятельности). Так, для второй ступени МФА в инфопанелях применяются механизмы долевого участия совместно с массивом вспомогательной цифровой и визуальной информации (пример используемого типа инфопанели анализа удельной части представлен на рис. 10). Для последующих ступеней детализации влияние ключевых факторов определяется исключительно на основе метода усреднения влияния по полному перебору перестановок параметров в модели (формула 4).

ВЫВОД

В рамках совершенствования аппарата бизнес-аналитики комплексных экономических процессов в системах управления на транспорте разработан и обоснован



новый методический инструментарий иерархического многоступенчатого факторного анализа с использованием аналитических цепочек информационных панелей, объединяемых в древовидные структуры, согласно принципам построения интеллект-карт.

Представленные методические подходы успешно реализованы при построении бизнес-аналитики процесса формирования экономических оценок сравнительного долевого вклада железных дорог, используемых для контроля и управления их деятельностью, а также расчёта мотивационных средств филиалов ОАО «РЖД».

Важным и актуальным представляется интегрирование разработанных методических механизмов в формируемую сейчас систему бизнес-аналитики производственно-экономической модели Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД».

Изложенные методические подходы, без существенных изменений, могут быть использованы для совершенствования бизнес-аналитики экономических процессов в системах управления морским, речным, воздушным и другими видами транспорта.

Последовательное развитие представленного методического инструментария, наряду с расширением сфер его использования, должно способствовать дальнейшему росту качества принимаемых управленческих решений и эффективности работы транспортного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baltzan, P., Phillips, A. Business Driven Information Systems. 4th ed., Denver, McGraw-Hill/ Irwin, 2014, 516 p.
2. Liebowitz, J. Big Data and Business Analytics. Boca Raton, CRC Press, 2013, 304 p.
3. Alan, R. S. Modern Enterprise Business Intelligence and Data Management: A Roadmap for IT Directors, Managers, and Architects. Waltham, Morgan Kaufmann, 2014, 96 p.
4. Kantardzic, M. Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms. New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2019, 638 p.
5. Sacha, D. Knowledge generation in visual analytics: integrating human and machine intelligence for exploration of Big Data. Konstanz, University of Konstanz, 2018, 195 p.
6. Fagan, T., Gavin, R., Reis, S., Valdivieso, M. Advanced analytics can drive the next wave of growth for travel and logistics companies. McKinsey, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.mckinsey.com/business-functions/marketing-and-sales/our-insights/advanced-analytics-can-drive-the-next-wave-of-growth-for-transportation-and-logistics-companies.pdf>. Доступ 20.02.2019.
7. Мирошниченко О. Ф., Огинская А. Е., Пастухов С. С. Построение системы расчётов доли вклада каждой железной дороги (как совокупности подразделений в границах железной дороги) в оценку результатов работы ОАО «РЖД» // Актуальные проблемы экономики железнодорожного транспорта и пути их решения: сборник трудов учёных к 70-летию отделения экономики и финансов ВНИИЖТ / Под ред. д.э.н., проф. О. Ф. Мирошниченко. — М.: ВМГ-Принт, 2014. — С. 106–115.
8. Мирошниченко О. Ф., Огинская А. Е., Пастухов С. С. Развитие алгоритмов оценки вклада совокупности подразделений в границах каждой железной дороги в результат работы ОАО «РЖД» // Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение / Под ред. О. Ф. Мирошниченко. — М.: РАС, 2019. — С. 182–190.
9. Gano, D. L. Apollo root cause analysis: a new way of thinking. 2 ed., Apollonian Publications, 2003, 188 p.
10. Пастухов С. С. Определение приоритетов пассажиров при оценке качества и выявление наиболее эффективных направлений улучшения качества транспортной услуги и сопутствующего ей сервиса в фирменных поездах (методология и результаты) // Вестник ВНИИЖТ. — 2008. — № 1. — С. 23–27.
11. Пастухов С. С. Определение основных путей повышения эффективности работы вагонов-ресторанов на основе маркетингового анализа // Вестник ВНИИЖТ. — 2008. — № 2. — С. 42–47.
12. Пастухов С. С. Разработка методов исследования качества транспортного обслуживания населения в сфере железнодорожных пассажирских перевозок дальнего следования / Дис... канд. экон. наук. — М.: МИИТ, 2011. — 204 с.
13. Пастухов С. С. Алгоритм структурного факторного анализа как новый элемент системы методов сравнения силы влияния компонентов в экономических моделях железнодорожного транспорта // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Часть 1 / Под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричани. — М.: РАС, 2019. — С. 51–59.
14. Мирошниченко О. Ф., Милевская В. А., Пастухов С. С. Информационные технологии в маркетинговых исследованиях пассажирских железнодорожных перевозок // Экономика железных дорог. — 2007. — № 8. — С. 71–80.
15. Few, S. Information dashboard design: the effective visual communication of data. Italy, O'Reilly Media, 2006, 223 p.
16. Buzan, T. The mind map book: how to use radiant thinking to maximize your brain's untapped potential. London, BBC Books, 1993, 332 p.
17. Блюмин С. Л., Суханов В. Ф., Чеботарёв С. В. Экономический факторный анализ: Монография. — Липецк: ЛЭГИ, 2004. — 148 с.
18. Витченко М. Н. Анализ финансово-хозяйственной деятельности предприятий железнодорожного транспорта: Учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта. — М.: Маршрут, 2003. — 240 с.
19. Пастухов С. С., Толкачева Е. В. Методические подходы к оценке влияния изменения размера скидок по абонементным билетам на финансовые результаты // Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр. АО «ВНИИЖТ» / Под ред. Г. В. Гогричани. — М.: Интекст, 2010. — С. 254–262. ●



Development of Business Intelligence in Transport Management



Pastukhov, Sergey S., Railway Research Institute (VNIIZhT), Moscow, Russia.*

Sergey S. PASTUKHOV

ABSTRACT

Development of business intelligence is an important area of efficiency growth when solving urgent issues of improving transport management processes. The business intelligence is a source of objective and clear information necessary for management to make decisions. This is particularly pertinent when business intelligence is applied in railway transport for comparative analysis of contribution of regional and local divisions and units to the overall activity of railway infrastructure or operation company. In Russia, in the case of JSC Russian Railways there is a great need for assessment of the efficiency of regional corporate management centers whose responsibility is to coordinate activity within the boundaries of railways which are branches of the company.

The objective of the article is to present new methodological and practical aspects of designing and development of business intelligence tools for the process of economic assessment of share contribution of each railway (considered as a set of structural units within the regional corporate

management center) to the results of the activity of JSC Russian Railways.

The research while developing and justifying the proposed methodological apparatus used tools for system analysis, methods of decomposition and synthesis, methodology of economic and mathematical modelling, fundamentals of information design theory, as well as methods of factor analysis.

As a result, within the framework of improving the business analytics apparatus for complex economic processes as applied to transport management systems, the paper suggests a methodological apparatus for development of multi-stage factor analysis (MFA) based on application of the hierarchical construction principle and the provisions of the root cause analysis (RCA) methodology, comprising integrated mechanisms for visualizing the results of analytical work by shaping chains of information panels, combined into tree structures, according to the principles of building mind maps. The suggested methodological apparatus approved by the considered case may also be applied to a wide range of similar problems in other modes of transport, multimode and combined transportation.

Keywords: transport, transport management, management, railways, economic models, key performance indicators, factor analysis, business intelligence, business analytics, information panels, mind maps.

*Information about the author:

Pastukhov, Sergey S. – Ph.D. (Economics), Leading Researcher of the Research Center of Economics of Complex Projects and Tariff Setting of JSC Railway Research Institute (VNIIZhT), Moscow, Russia, pastuhovsergey@bk.ru.

Article received 08.07.2019, accepted 17.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 164.

Introduction. During the era of digital economy development of information systems for decision-making support becomes a key aspect for the corporate efforts to ensure their high market competitiveness [1, pp. 1–28].

Decision support systems comprise among the most important components the tools of business analytics [1, pp. 210–240; 2, pp. 2–67], which serve as a source of management for comprehensive, exhaustive, objective and descriptive information required for making timely and effective management decisions.

Studying the accumulated international practices and current trends in development of theory and practice of business analytics [1–5] allows us to conclude that the key to its effectiveness is associated with the design and subsequent continuous development of the following closely integrated mechanisms:

- collection, processing of data and development of specialized indicators characterizing the activities of the company, its competitors and market conditions;
- creation of economic, mathematical and statistical models, as well as algorithms for their use for analysis and forecasting in order to identify key priorities in solving managerial problems;
- development of a visual interface for convenient interaction of a manager with source data, indicators used, model settings, as well as with mechanisms of visualization of the results of modelling and analysis in a form convenient for making managerial decisions considering the specifics of the business process under study.

According to international experts, [6, pp. 1–6], the intensification of development of business intelligence and analytics is the most promising driver of market growth in the current market conditions for transport companies.

Therefore, it is extremely important and urgent to continue to improve the apparatus of business intelligence in transport management systems.

Objective. *The objective* of the article is to present new methodological aspects of improving analytical tools focused on the study of complex economic processes in the field of railway transport management, with consideration of the practical aspect in relation to development of business analytics of the process of economic assessment of complex

performance indicators (hereinafter CPI) of regional corporate management centers of JSC Russian Railways (hereinafter RCMC). The suggested methodology can be readily adapted to features of solving similar problems in other companies.

Results.

Influence of the specifics of CPI of comparative share contribution of RCMC on development of business intelligence

To ensure an increase in the efficiency of mechanisms for managing regional structures of JSC Russian Railways based on the territorial principle (level of heads (superior managers) of railways, branches of JSC Russian Railways) VNIIZhT employees continuously work on design and development of a CPI methodology based on economic assessments of the comparative share contribution (hereinafter referred to as CSC¹) of regional corporate management centers into the results of the integrated work of JSC Russian Railways.

The key stages in development of methodology of complex performance indicators of comparative share contribution of regional corporate management centers (hereinafter referred to as CPI CSC RCMC methodology), the list of guidelines approved by JSC Russian Railways that characterize its relevance, as well as the current state of the calculation apparatus, are considered in detail in [7, pp. 107–114; 8, pp. 182–190].

In accordance with management tasks to be solved, the current CPI CSC system is a complex, interconnected complex of special calculation algorithms [8, pp. 184–185], allowing to evaluate:

- variable part of share contribution, determined on the basis of quarterly processing and aggregation of various cost above-target values of the total network in various analytical sections (freight transportation, passenger transportation, other activities, etc.) with their subsequent distribution based on specific indices;

¹ The term comparative share contribution used by the author in its original meaning does not refer to any legal aspect concerning liability or shares of joint stock company, etc., and denominates only managerial aspects of assessment of intra-corporate contribution of regional centres into overall activity and efficiency of the company as will be described further in the text.
— ed.note.

- a fixed part of share contribution, formed on the basis of annual determination of the cost above-target values of the total network for various components (with their subsequent distribution on the basis of various indices);

- specific part of share contribution, determined on the basis of quarterly aggregation and comparative assessment of performance and cost indicators;

- total share contribution calculated quarterly (based on fixed, variable and specific parts) using weighting coefficients to ensure the balance of the system in terms of achieving management goals and objectives, as well as applying (if necessary) mechanisms for correcting share values by adjusting them to the upper / lower threshold.

To develop effective managerial decisions, the business intelligence toolkit of CPI CSC should provide management with convenient access to comprehensive information about key factors that determined the dynamics of CSC values of each RCMC as a result of the existing ratios of planned and current values for the current and past (base) calculation periods.

The presence in CPI CSC system of many different algorithms, each of which implies implementation of multi-stage calculations [8, pp. 185–190], with subsequent aggregation of all the results for determining the total share contribution for each RCMC, largely determines the need to use the concept of hierarchical analysis in the framework of root cause analysis (RCA) methodology [9, pp. 35–54], which has proven itself in analytics of complex, interconnected dependency models for railway transport management [10–13].

One of the most important aspects of achieving high efficiency and effectiveness in making managerial decisions is to ensure, within the framework of a single information window, maximum availability and visibility of the information required by management and analysts [5, pp. 1–6; 14, pp. 71–72;], which requires construction of complex mechanisms for visualizing the process and the results of calculating estimates of influence of factors based on the use of modern principles of infographic panels (a detailed description of which is given, for example, in [11, pp. 38–147].

It is advisable to carry out the combination and grouping of information panels within the framework of a specialized interface based on the

methodology of constructing mind maps, which is one of the most convenient tools for structural analysis for analytical perception with respect to large-dimensional data [16, pp. 53–60].

Thus, the business analytics toolkit, based on the tasks to be solved and the specifics of constructing CPI CSC RCMC calculation system, is formed on the basis of the use of the multi-stage factor analysis (MFA), the results of which are presented in the form of information panels built on the basis of a tree-like hierarchical structuring and ranking of factors according to the force of their influence on the dynamics of the analyzed value (Pic. 1) from the level of total aggregated values through all intermediate stages of calculations (RCA principle «5 why») to the level of indivisible indicators (for example, the official figures reporting), for which further division into components is already impractical from the point of view of solving management tasks.

MFA methodology and mechanisms for visualizing its results using an example of business analysis of the process of evaluating the work of a region based on CPI CSC

The proposed MFA methodology implies formation of a «core» of analytical algorithms with subsequent phased construction of hierarchical chains of specialized types of information panels for visual and convenient presentation of the necessary information:

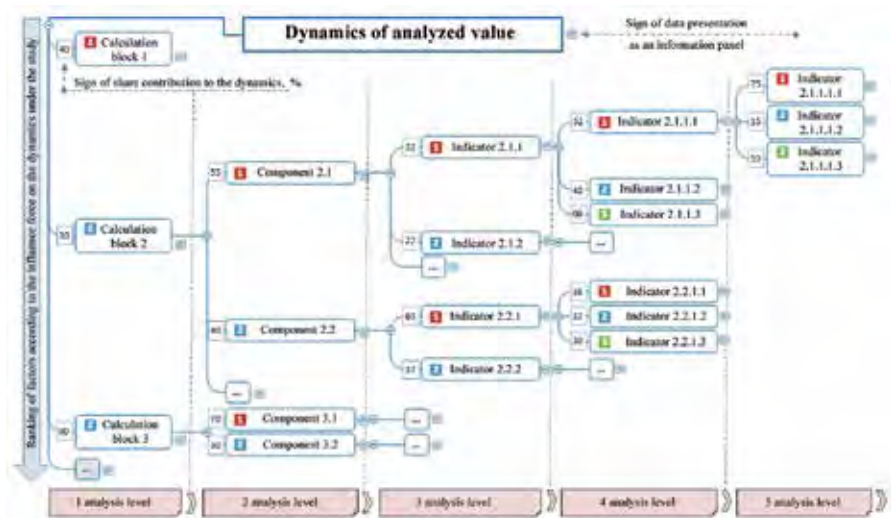
- on the magnitude and dynamics of key values, as well as on the results of assessment (by the algorithms of the «basic core») of the comparative strength of influence of the studied factors within the framework of the studied model;

- on auxiliary analytical metrics for detailing various aspects of factor influence, including reflection of values and dynamics for initial indivisible (for a specific level of analysis) values.

The «core» of analytical algorithms, considering the specifics of constructing CPI CSC RCMC calculation system, is based on a combination of three methods of factor analysis: share contribution; chain substitutions; averaging the influence over the exhaustive search of permutations of parameters in the model (also called the method of weighted finite difference [17, p. 38]).

In more detail, the proposed approaches to formation of MFA «core» and its visualization





Pic. 1. The scheme of multistage factor analysis using information panels in the framework of a hierarchical tree-structured and ranking of factors according to the strength of influence.

Change in the first Quarter 2017 as compared to the fourth Quarter 2016	Above-target profits (freight transportation)			Above-target profit (other activity)			Total			
	fixed part	variable part	sum	fixed part	variable part	sum	fixed part	specific part	variable part	adjustment to lower limit
1 OCT	0,06%	-0,46%	-0,40%	0,34%	0,15%	0,48%	-0,99%	0,00%	-0,76%	0,03%
2 KLG	0,01%	0,09%	0,10%	0,03%	0,10%	0,13%	0,03%	0,00%	0,19%	-0,22%
3 MSK	0,15%	-0,65%	-0,50%	0,88%	-0,61%	0,27%	-0,07%	0,00%	-1,14%	0,03%
15 ZAB	0,23%	0,33%	0,57%	0,09%	0,08%	0,18%	0,18%	0,08%	0,44%	0,02%
16 DVS	0,14%	0,00%	0,14%	0,25%	0,15%	0,39%	0,23%	0,03%	0,16%	0,01%
Total	2,50%	-0,50%	2,00%	3,84%	0,39%	4,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
ΣΔ%/railway (branch)	0,16%	0,27%	0,33%	0,25%	0,11%	0,27%	0,24%	0,08%	0,39%	0,03%

Pic. 2. A fragment of the main information panel of the 1st stage of MFA for assessing the dynamics of CSC in the context of all components (hereinafter in the tables all the figures presented are conditional as well as their belonging to railways, and are not based on real data; abbreviations like OCT, KLG, MSK, ZAB, DVS, etc. mean names of 16 railways – branches of JSC Russian Railways).

will be considered directly at the example of constructing a basic chain of key types of supporting information panels used in business analytics of the process of quarterly comprehensive assessment of the dynamics of the region of responsibility of a railway (railway region). It is worth noting that, based on the tasks being solved and the observed results, the number, type and sequence of information panels in the analytical chain can vary significantly, and the article does not set out to present their complete list, which currently includes 26 various types based on the levels of the hierarchy.

One of the important tasks to be solved within the framework of CPI business analytics using MFA method is to identify key factors that determine (in the general calculation model) changes in the aggregate indicator of CSC (used, inter alia, in distribution of the

incentive payments to employees by the head of a railway [8, p. 182]), for the purpose of developing managerial decisions aimed at eliminating «bottlenecks» that did not allow (in the observed period) to achieve the necessary CSC dynamics required by the management.

Given the complex nature of calculations with the presence of many different interlinked algorithms, the search chain for key factors, as a rule, begins (the first step in detailing MFA) with the study of data of the main information panel of the dynamics of changes in CSC in the context of all components (Pic. 2).

It is important to note that the format of the article does not allow to fully reflect all the interactive solutions implemented in the information panel. So, for the information panel (Pic. 2), it is provided that when you hover the mouse over the cell of the info panel, the initial values of the studied quarters are

Change in the fixed part	Fixed part of contribution to above-target profits (freight transportation)			Fixed part of contribution to above-target profits (other activity)			Fixed part of contribution to cost saving, excl. depreciation			Total value of the fixed part		
	12m2016	12m2017	+/-	12m2016	12m2017	+/-	12m2016	12m2017	+/-	12m2016	12m2017	+/-
1 OCT	3,92%	3,98%	0,06%	1,17%	1,51%	0,34%	0,00%	0,00%	0,00%	8,11%	7,13%	-0,99%
16 DVS	4,40%	4,54%	0,14%	0,97%	1,22%	0,25%	0,00%	0,00%	0,00%	5,67%	5,91%	0,23%
Total	52,82%	55,32%	2,50%	13,82%	17,66%	3,84%	0,00%	0,00%	0,00%	80,00%	80,00%	0,00%
$\Sigma \Delta\% / \text{railway (branch)}$			0,16%	—	—	0,25%	—	—	0,00%	—	—	0,24%

Pic. 3. A fragment of one of the auxiliary information panels of the 1st stage of MFA (conditional figures are presented; abbreviation 12m 15 means a given period (e.g. 12 months of 2015, etc.).

shown in a pop-up window, and when you right-click on the cell, you can add a text note or select another type of information panel that includes values of this cell (for example, the information panel shown in Pic. 3).

The values of the observed dynamics presented in the information panels at the level of individual RCMC and for the whole network (in the context of all components of the total index) are determined based on the use of factor analysis by share participation method [17, p. 39], according to the formula:

$$\Delta_{\chi-i} = \alpha_{\chi-i} - \alpha_{\chi-i}^{base}, \quad (1)$$

where $\alpha_{\chi-i}$, $\alpha_{\chi-i}^{base}$ are respectively the current (studied) and basic (selected as the basis for comparison) values of the share contribution (in percent) for the i -th RCMC obtained using the χ -type calculation algorithm (described in detail in [8, pp. 185–190]) determined by the type of calculated part (fixed, variable, specific, corrective) and the type of activity (freight transportation, passenger transportation, other activities).

An analysis of each of the first 16 lines of the information panel (Pic. 2), using the «heatmap» visualization technique, allows to visually see what has contributed to the change in the total fractional index observed on a particular railway, and also to understand what type of calculated part and type of activity has shown the greatest impact.

The row of results, in turn, reflects redistribution of cumulative influence within the total contribution of specific activities and in the context of the types of calculation used.

In addition, in the framework of the information panel of the dynamics of changes in CSC, to compare the strength of influence of χ types of calculation algorithms on the observed level of variability of the railway

contribution, the analytical metric «Average value of the observed changes per railway» (the last row of the information panel), determined by the formula, is used:

$$v_{\chi} = \frac{\sum_{i=1}^{16} |\Delta_{\chi-i}|}{16}, \quad (2)$$

where $\Delta_{\chi-i}$ are values of the observed dynamics of the i -th RCMC, obtained based on the application of the χ -th type of calculation algorithm.

It should be noted that at the final stage of share calculations [7, pp. 107–114; 8, pp. 185–190] for each of the studied activities, a universal model of four elements is used:

- the selected integral «distribution meter» for railways (which has a direct impact on achievement of above-target financial values and is most suitable for comparing activities within the framework of solving specific management tasks);
- sum of the integral «distribution meter» for all railways;
- above-target financial value for distribution received by all railways;
- total share contribution index, aggregating all generated above-target financial values.

Therefore, at the second stage of MFA that provides detailing by the selected types of activity (which had the strongest influence on the dynamics of the total share contribution), a search is made for key factors of influence based on the use of the chain substitution method (the general mechanism of which is described in [17, pp. 33–34]; and its various aspects for solving practical problems of railway transport are described in [13, pp. 51–59; 18, pp. 41–178; 19, pp. 254–262]).

For a fixed and variable calculated parts for each of the types of activities, the comparable share influence of the studied factors is



determined by the solution of the system of equations:

$$\begin{aligned} S_{a_{ji}}^{\psi_z} &= 100 \left(\frac{\Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi_z}}{\sum_{z=1}^4 \Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi_z}} \right); \\ \Delta v_{a_{ji}} &= \sum_{z=1}^4 \Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi_z} = \\ &= k_{ja} y_{ja} \left(\left(\frac{u_{oia}}{\sum_{i=1}^{16} u_{oia}} \right) (S_{oja} / v_{oa}) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{u_{hia}}{\sum_{i=1}^{16} u_{hia}} \right) (S_{hja} / v_{ha}) \right); \\ \Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi_1} &= k_{ja} y_{ja} \left(\frac{u_{hia}}{\sum_{i=1}^{16} u_{hia}} \right) (S_{hja} / v_{ha}); \\ \Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi_2} &= k_{ja} y_{ja} u_{oia} \left(1 / \sum_{i=1}^{16} u_{oia} - 1 / \sum_{i=1}^{16} u_{hia} \right) (S_{hja} / v_{ha}); \\ \Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi_3} &= k_{ja} y_{ja} \left(\frac{u_{oia}}{\sum_{i=1}^{16} u_{oia}} \right) ((S_{oja} - S_{hja}) / v_{ha}); \\ \Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi_4} &= k_{ja} y_{ja} \left(\frac{u_{oia}}{\sum_{i=1}^{16} u_{oia}} \right) S_{oja} (1 / v_{oa} - 1 / v_{ha}), \end{aligned} \tag{3}$$

where *a* is the type of part of share contribution (fixed or variable);

y_{ja} is the weighting coefficient, providing a balanced influence of the analyzed *a*-part of the railway's share contribution on the total index from the point of view of fulfilling motivation tasks [8, p. 188];

k_{ja} is the weighting coefficient for the *j*-th activity when calculating the total index in the framework of the *a*-th part of the share contribution;

$\Delta v_{a_{ji}}$ are observed changes in the total index of share contribution in the framework of its *a*-th part for the *j*-th type of activity on the *i*-th railway;

$\Delta \Phi_{a_{ji}}^{\psi}$ is the influence of the factor ψ on the change of $\Delta v_{a_{ji}}$ when comparing the initial (*h*) and final (*o*) calculation conditions;

ψ_1 is the dynamics factor of the used distribution meter (*u*) on the *i*-th railway;

ψ_2 is the dynamics factor of the total value of the distribution meter for all railways;

ψ_3 is the dynamics factor of the distributed above-target financial value (*S*);

ψ_4 is the dynamics factor of the total share contribution index (*v*);

$S_{a_{ji}}^{\psi_z}$ is the value reflecting the share of the influence of the *z*-th factor ψ on variability of $\Delta v_{a_{ji}}$.

The use of the method of chain substitutions at this stage of factor analysis is justified by the fact that using the dynamics of the total share contribution index as the last studied factor allows us to reflect in it (through an indecomposable remainder) the influence of interaction of other factors, which fully corresponds to the methodological essence of the total railway contribution index, which is an integral indicator for assessing comparative performance of activities [7, pp. 106–108; 8, pp. 184–186].

The type of information panels used to visualize the results of the second stage of the MFA in the context of the fixed and variable parts of the calculation by type of activity is shown in Pic. 4.

For each of the railways, in columns 2–6 of the information panel for each of the first 16 rows (using the infographic «heatmap» method) areas of the influence of each of the four factors-elements on the dynamics of the share contribution are shown.

Columns 7–9 show the absolute values of the meters used in the analysis for the studied time sections (with visualization based on «histograms»), as well as an auxiliary analytical metric characterizing the rate of change.

A comparison (in the context of each row) of the values presented in the second and third columns (using, if necessary, the data of the last

Railway	Change of the variable part of contribution to the index	including due to changes in:				Amount of the above-target conditional profit of the railway, mln rub.		
		Amount of the above-target conditional profit of the railway (ΔA)	Amount of the above-target conditional profit of the network (ΣΔA)	Amount of the above-target profit from freight transportation (Sfr)	Total contribution index (I)	4 th Q 2016	1 st Q 2017	1 st Q 17 / 4 th 16
OCT	-0,46%	-0,582%	0,140%	-0,170%	0,149%	698,8	154,1	0,22
KLK	0,09%	0,034%	0,066%	-0,080%	0,070%	40,7	72,2	1,78
MSK	-0,65%	-0,650%	0,000%	0,000%	0,000%	608,3	0,0	0,00
GOR	0,45%	0,263%	0,223%	-0,272%	0,238%	0,0	245,5	—
NETWORK	-0,50%	-3,32%	3,32%	-4,04%	3,53%	6756,34	3651,21	0,54
Value of total contribution index (I), mln rub.:						11191,87	5307,72	0,47
Amount of above-target value in total index (0,1•0,7•Sfr), mln rub.:						808,57	356,69	0,44

Pic. 4. A fragment of the main information panel of the 2nd stage of MFA on the variable part of contribution from cargo transportation (conditional figures are presented).

Contribution to the total network index from:	Value, mln rub.		1 st Q 2017 / 4 th Q 2016	Share in the total contribution index (I), %		Change in contribution structure (1 st Q 2017 / 4 th Q 2016), %	Share of the 1 st Q 2017 in the total contribution index of the 4 th Q 2016, %	Contribution to the observed change in total contribution index, %
	4 th Q 2016	1 st Q 2017		4 th Q 2016	1 st Q 2017			
Sum of above-target profit from freight transportation (Sfr•0,7)	8085,7	3566,9	0,4	72,2%	67,2%	-5,0%	31,9%	-40,4%
Sum of above-target profit from passenger transportation (Spass•0,7)	692,2	389,8	0,6	6,2%	7,3%	1,2%	3,5%	-2,7%
Sum of above-target profit from other activities (Soth)	2414,0	1351,0	0,6	21,6%	25,5%	3,9%	12,1%	-9,5%
Total index (I)	11191,9	5307,7	0,5	100,0%	100,0%	—	47,4%	-52,6%

Pic. 5. An example of the main information panel of the 3rd stage of MFA for analysis of the total contribution index in its variable part (conditional figures are presented).

Railway	4 th Q 2016				1 st Q 2017				Contribution to change in above-target value as compared with 4 th Q	1 st Q 2017 / 4 th Q 2016		1 st Q 2017 / 4 th Q 2016	
	Planned, mln rub.	In fact, mln rub.	Above-target value, mln rub.	Above-target value, %	Planned, mln rub.	In fact, mln rub.	Above-target value, mln rub.	Above-target value, %		Above-target value, %	Planned	In fact	Above-target value, mln rub.
OCT	28968,630	29911,268	942,638	8,16%	31302,484	31444,241	141,757	2,78%	-6,93%	-5,38%	1,08	1,05	0,15
KRS	18448,607	18908,997	460,390	3,99%	18679,695	19245,602	565,907	11,11%	0,91%	7,12%	1,01	1,02	1,23
VSБ	16671,237	16927,973	256,736	2,22%	16436,707	17003,636	566,929	11,13%	2,69%	8,90%	0,99	1,00	2,21
ZAB	3292,149	3511,851	219,702	1,90%	3108,858	3284,797	175,939	3,45%	-0,38%	1,55%	0,94	0,94	0,80
DVS	27747,165	28540,188	793,023	6,87%	28947,873	29166,476	218,603	4,29%	-4,97%	-2,58%	1,04	1,02	0,28
Total	326464,7	338015,73	11551,025	100,00%	339850,161	344945,7795	5095,619	100,00%	-55,89%	0,00%	1,04	1,02	0,44

Pic. 6. A fragment of the main information panel of the 3rd stage of MFA for analysis of the amount of above-target profit in the variable part of the contribution from freight transportation (conditional figures are presented).

three columns), allows us to correlate the influence of the actions of a railway (characterized by the metrics used) on the total share contribution relative to the actions of other railways. Comparisons of each of the rows of the fourth and fifth columns show the revealed influence of the dynamics of above-target incomes for the studied type of activity relative to above-target values for other types of activity, which eventually formed the value of the total index.

At the third stage of detailed MFA according to the calculations of the fixed and variable parts of the share contribution, further branching of the analytical chain of information panels is carried out to identify key factors of influence of a lower hierarchy in the context of the studied element of the universal model (3).

The use of information panels of the analysis of the total index (Pic. 5) allows us to visually, based on the use of share participation mechanisms, compare the effect of changes in the sums of above-target values (by activity) on the dynamics of the total index.

The type of information panels shown in Pic. 6, graphically represents the process of formation of above-target values and makes it possible to compare the influence of the contribution of individual railways, evaluate

the corresponding effect of the ratios on the rate of change of plan and actual data.

Analysis of influence of various indicators on the dynamics of the integral «distribution meter» begins with a study of the type of information panels shown in Pic. 7.

In this information panel (vertically divided into two parts representing the compared time sections, current and basic), three groups of calculation and analytical columns are selected that characterize the data in the context of railways.

In the first group (2–6 columns), based on share participation method, the influence of the planned values of each of the indicators on the integral value of the distribution meter is demonstrated. At the same time, changes in the share distribution of planned values (in the current time section compared to the base) are highlighted using the «two-color scale» infographic technique (as applied to the background of the cells).

In the second group (columns 7–11), separately for the base and current periods, based on identification of the ratio of actual values to the total figure of the plan, the contribution of each indicator to the observed changes in the distribution meter (with visualization of the changes in the form of two-color scales) is demonstrated.



Pic. 7. A fragment of the main information panel of the 3rd stage of MFA for analysis of the influence of performance indicators in the variable part of the contribution from freight transportation (conditional figures are presented).

Pic. 8. A fragment of the main information panel of the 4th stage of MFA for analysis of the amount of above-target profit from other activities as part of the calculation of the variable part (conditional figures are presented).

Pic. 9. A fragment of an example of the main information panel of the 4th stage of MFA for analysis of the influence of performance indicators in the fixed and variable parts of the contribution from freight transportation (conditional figures are presented).

Pic. 10. A fragment of the main information panel of the 2nd stage of MFA for analysis of the specific part of the share contribution (conditional figures are presented).

being studied), as well as deviations from the planned values for the distribution meter (in this case, a pairwise comparison of the cells

of the first and second group of columns reveals the influence of the corresponding indicators).

At the fourth and subsequent stages of MFA, according to the calculations of the fixed and variable parts of the share contribution (if necessary), further detailing of the information used in the models is carried out, including both decomposition of indicators and reduction of aggregation levels of used data in order to identify key factors of influence of a lower hierarchical level (examples of information panels are given in Pic. 8 and 9).

It is important to note that the method of chain substitutions is used only at the second stage of MFA (in the analysis of a universal model of four elements), since the order of factors in lower-level models can no longer be unambiguously substantiated. Where it is impossible to apply the concept of the share participation method, the method of averaging the influence over the exhaustive search of permutations of parameters in the model is used. A clear explanation of the method and details of its practical use are described in [13, pp. 56–58] based on the solution of the following universal (for any type of model with any number of parameters) system of equations:

$$\left\{ \begin{aligned} S_{\phi_i} &= 100 \% \left(\Delta F_{\phi_i} / \sum_{v=1}^z \Delta F_{\phi_v} \right); \\ \Delta F_{\phi_i} &= \left(\sum_{M=1}^z \sum_{w=1}^{(z-1)!} \Delta \Phi_M^{\text{var}_w} \right) / (z!); \\ 1 < m < z; \\ \Delta \Phi_1^{\text{var}_w} &= f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{h_w}, \Phi_z^{h_w} \} - \\ &- f \{ \Phi_1^{h_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{h_w}, \Phi_z^{h_w} \}; \\ \Delta \Phi_m^{\text{var}_w} &= f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_m^{o_w}, \Phi_{m+1}^{h_w}, \dots, \Phi_z^{h_w} \} - \\ &- f \{ \Phi_1^{h_w}, \dots, \Phi_m^{h_w}, \dots, \Phi_z^{h_w} \}; \\ \Delta \Phi_z^{\text{var}_w} &= f \{ \Phi_1^{o_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{o_w}, \Phi_z^{o_w} \} - \\ &- f \{ \Phi_1^{h_w}, \dots, \Phi_{z-1}^{h_w}, \Phi_z^{h_w} \}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

where S_{ϕ_i} is the value reflecting the share of the influence of the i -th factor on variability of the resulting variable $\sum_{v=1}^z \Delta F_{\phi_v}$ in comparison with the studied factors;

ΔF_{ϕ_i} is the value characterizing (for comparison purposes) the absolute influence of the i -th factor in the studied model of the

relationship, containing z factors, on the observed variability of the resulting variable;

$\Delta \Phi_M^w$ is assessment of influence (on the resulting variable) of the factor standing in the M -th place in the w -th version of the permutation of factors in the studied model;

$z! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot z$ is the factorial z , reflecting the total number of all possible variants of permutations of factors in the studied model of dependence;

$f \{ \Phi_1, \dots, \Phi_{z-1}, \Phi_z \}$ is the value of the resulting variable, determined by the values of the factors $\Phi_1, \dots, \Phi_{z-1}, \Phi_z$;

$\Phi_1^{o_w}, \Phi_m^{o_w}, \Phi_z^{o_w}$ is the final value of the factors, standing, respectively, in the first, m -th and last places in the w -th version of the permutation of factors in the studied model;

$\Phi_1^{h_w}, \Phi_m^{h_w}, \Phi_z^{h_w}$ is the initial value of the factors, standing, respectively, in the first, m -th and last place in the w -th version of the permutation of factors in the studied model.

The approaches used to form multi-stage visual-analytical chains and the corresponding design of MFA info panels within the specific and correcting calculation parts are similar to those described above (as part of the analysis by types of activity). So, for the second stage of MFA in information panels, the mechanisms of share participation are used together with an array of auxiliary digital and visual information (an example of the type of information panel used to analyze the specific part is presented in Pic. 10). For the subsequent stages of detailing, the influence of key factors is determined solely on the basis of the method of averaging the influence over a complete search of the permutations of parameters in the model (4).

Conclusion. As part of improving the business analytics apparatus for complex economic processes in transport management systems, a new methodological toolkit for hierarchical multi-stage factor analysis using analytical chains of information panels combined into tree structures according to the principles of building mind maps has been developed and justified.

The presented methodological approaches were successfully implemented in development of business analysis of the process of economic estimation of the comparative share contribution of the railways used to control and



manage their activities, as well as calculating the bonus funds of the branches of JSC Russian Railways.

It is important and relevant to integrate the developed methodological mechanisms into the business analytics system of the production and economic model of the long-term development program of JSC Russian Railways.

The stated methodological approaches, without significant changes, can also be used to improve business analytics of economic processes in the management systems of sea, river, air and road transport.

The consistent development of the presented methodological tools, along with expansion of the scope of its use, should contribute to a further increase in the quality of managerial decisions and the efficiency of the transport system.

REFERENCES

1. Baltzan, P., Phillips, A. *Business Driven Information Systems*. 4th ed. Denver, McGraw-Hill/Irwin, 2014, 516 p.
2. Liebowitz, J. *Big Data and Business Analytics*. Boca Raton, CRC Press, 2013, 304 p.
3. Alan, R. S. *Modern Enterprise Business Intelligence and Data Management: A Roadmap for IT Directors, Managers, and Architects*. Waltham, Morgan Kaufmann, 2014, 96 p.
4. Kantardzic, M. *Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms*. New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2019, 638 p.
5. Sacha, D. *Knowledge generation in visual analytics: integrating human and machine intelligence for exploration of Big Data*. Konstanz, University of Konstanz, 2018, 195 p.
6. Fagan, Travis; Gavin, Ryan; Reis, Steve; Valdivieso, Maria. *Advanced analytics can drive the next wave of growth for travel and logistics companies*. McKinsey, 2018. [Electronic resource]: <https://www.mckinsey.com/business-functions/marketing-and-sales/our-insights/advanced-analytics-can-drive-the-next-wave-of-growth-for-transportation-and-logistics-companies.pdf>. Last accessed 20.02.2019.
7. Miroshnichenko, O. F., Oginskaya, A. E., Pastukhov, S. S. Construction of a system for calculating the share of the contribution of each railway (as a set of units within the railway) in assessing the results of the work of JSC Russian Railways [*Postroenie sistemy raschyotov doli vkladu kazhdoy zheleznoy dorogi (kak sovokupnost' podrazdelenii v granitsakh zheleznoy dorogi) v otsenku rezultatov raboty OAO «RZD»*]. In: Actual problems of the railway transport's economy and ways to solve them: Collection of works by scientists dedicated to the 70th anniversary of the Department of Economics and Finance of VNIIZhT. Ed. by O. F. Miroshnichenko, Prof., D.Sc. (Economics). Moscow, VMG-Print, 2014, pp. 106–115.
8. Miroshnichenko, O. F., Oginskaya, A. E., Pastukhov, S. S. Development of algorithms for assessing the contribution of a set of units within each railway to the result of the work of JSC Russian Railways [*Razvitiye algoritmov otsenki vkladu sovokupnosti podrazdelenii v granitsakh kazhdoy zheleznoy dorogi v rezultat raboty OAO «RZD»*]. In: Economic studies of the railway complex and their practical value. Ed. by O. F. Miroshnichenko, Moscow, RAS publ., 2019, pp. 182–190.
9. Gano, D. L. *Apollo root cause analysis: a new way of thinking*. 2 ed. Apollonian Publications, 2003, 188 p.
10. Pastukhov, S. S. Determining the priorities of passengers in assessing the quality and identifying the most effective areas for improving the quality of transport services and associated services in branded trains (methodology and results) [*Opredelenie prioriteto passazhirov pri otsenke kachestva i vyavlenie naibolee effektivnykh napravlenii uluchsheniya kachestva transportnoi usluzhi i sopushtvuyushchego ei servisa v firmennykh poezdakh (metodologiya i rezulaty)*]. *Vestnik VNIIZhT*, 2008, Iss. 1, pp. 23–27.
11. Pastukhov, S. S. Determination of the main ways to improve the efficiency of dining cars based on marketing analysis [*Opredelenie osnovnykh putei povysheniya effektivnosti raboty vagonov-restoranol na osnove marketingovogo analiza*]. *Vestnik VNIIZhT*, 2008, Iss. 2, pp. 42–47.
12. Pastukhov, S. S. Development of methods for the study of the quality of public transport services in the field of long-distance railway passenger transportation. Ph.D. (Economics) thesis [*Razrabotka metodov issledovaniya kachestva transportnoi obsluzhivaniya naseleniya v sfere zheleznodorozhnykh passazhirskikh perevozok dalnego sledovaniya. Dis... kand. ekon. nauk*]. Moscow, MIIT, 2011, 204 p.
13. Pastukhov, S. S. Algorithm of structural factor analysis as a new element of the system of methods for comparing the strength of the influence of components in economic models of railway transport [*Algorit strukturnogo analiza kak noviy element sistemy metodov sravneniya sily vliyaniya komponentov v ekonomicheskikh modelyakh zheleznodorozhnogo transporta*]. In: Actual problems of development of railway transport: Proceedings of All-Russian scientific-practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Ph.D. school of the Railway Research Institute. Part 1. Ed. by A. B. Kosarev, G. V. Gogriciani, Moscow, RAS publ., 2019, pp. 51–59.
14. Miroshnichenko, O. F., Milevskaya, V. A., Pastukhov, S. S. Information technology in marketing research of passenger railway transportation [*Informatsionnye tekhnologii v marketingovykh issledovaniyakh passazhirskikh zheleznodorozhnykh perevozok*]. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 2007, Iss. 8, pp. 71–80.
15. Few, S. *Information dashboard design: the effective visual communication of data*. O'Reilly Media, 2006, 223 p.
16. Buzan, T. *The mind map book: how to use radiant thinking to maximize your brain's untapped potential*. London, BBC Books, 1993, 332 p.
17. Blyumin, S. L., Sukhanov, V. F., Chebotaryov, S. V. *Economic factor analysis: Monograph [Ekonomicheskiy faktorniy analiz: Monografiya]*. Lipetsk, LEGI publ., 2004, 148 p.
18. Vitchenko, M. N. Analysis of financial and economic activity of railway transport enterprises: Textbook for technical schools and colleges of railway transport [*Analiz finansovo-khozyaistvennoi deyatelnosti predpriyati zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnik dlya tekhnikumov i kolledzhei zheleznodorozhnogo transporta*]. Moscow, Marshrut publ., 2003, 240 p.
19. Pastukhov, S. S., Tolkacheva, E. V. Methodological approaches to assessing the impact of changes in the size of discounts on long-term tickets on financial results [*Metodicheskie podkhody k otsenke vliyaniya izmeneniya razmera skidok po abonementnym biletam na finansovie rezulaty*]. In: Prospective tasks for development of railway transport: Collection of scientific works of JSC VNIIZhT. Ed. by G. V. Gogriciani, Moscow, Intekst publ., 2010, pp. 254–262.



НОВАЯ ИСТОРИЯ МОСКОВСКОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО КОЛЬЦА: ТРИ ГОДА УСПЕШНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

10 сентября 2019 года исполнилось три года с момента запуска движения электропоездов «Ласточка» по Московскому центральному кольцу (МЦК). За этот период поезда перевезли 364 млн пассажиров, что практически в 2,5 раза больше населения России. Но современный, наиболее успешный, этап развития МЦК — часть более длительной истории, насчитывающей свыше 150 лет. Наш журнал несколько раз размещал публикации на эту тему и к этому вопросу мы будем возвращаться.

Построить вокруг города железную дорогу, которая отвечала бы требованиям промышленной эпохи, московские предприниматели задумали ещё в 1860–1870-х годах.

Первый проект подобной дороги, был представлен в 1869 году москов-

ским купцом Григорием Сушкиным. Три года спустя детальный план, основанный на опыте использования аналогичных путей сообщения в Берлине и Париже, в городской думе представили Александр Пороховщиков и инженер Андрей Горчаков.

В марте 1898 года Министерство путей сообщения утвердило проект действительного статского советника инженера Петра Рашевского. Строить Московскую окружную железную дорогу (МОЖД) начали 3 августа 1903 года.

19 июля 1908 года по кольцу прошёл первый поезд. Билеты стоили недёшево — тарифная система не была продумана должным образом. Пассажирские перевозки отменили уже через четыре месяца. В мае 1909 года тарифы скорректировали, и горожане вновь могли пользоваться железнодорожным коль-



пом. До 1917 г. рабочие ездили по нему на прилегающие к кольцу предприятия – те, которыми дорога обросла в годы промышленного подъёма. Затем, в 1920-х годах в расположенных рядом районах появились удобные автобусные и трамвайные рейсы, и поезда стали не востребова- нными. В 1934 году пассажирское дви- жение по МОЖД вновь закрыли.

В 1960-х об идее пустить по МОЖД пассажирские поезда снова вспомни- ли – и снова не реализовали её.

На современном этапе развития на МЦК появилась 31 станция. Транс- портно-пересадочные узлы, интегри-

рованные в систему метрополитена, расположили вблизи остановок назем- ного транспорта и перехватывающих парковок. Поезда на «стальном кольце Москвы» начали перевозить горожан после перерыва длиной 82 года.

Подготовлено на основе материалов официального сайта мэра Москвы <https://www.mos.ru>. Использовались материалы <https://stroimsk.ru/mobile/news/mtsk-pierieviezlo-364-mln-passazhirov-za-tri-ghoda-s-momienta-otkrytiia>; <https://www.mos.ru/news/item/61869073/>; фотографии Главархива Москвы●



NEW HISTORY OF THE MOSCOW CENTRAL CIRCLE: 3 YEARS OF SUCCESSFUL OPERATION

The date of September 10, 2019 marked the third anniversary of the start of operation of Lastochka electric trains on the Moscow Central Circle (MCC) railroad. The trains have transported 364 mln passengers that is 2,5 times more than the overall population of Russia. Let's remind that the modern and most successful period of development of MCC is a part of longer history accounting for more than 150 years. The WTT journal have published a lot of materials devoted to that topic and we shall have many occasions to do it again.

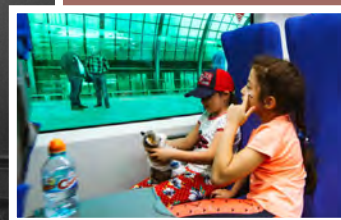
Moscow entrepreneurs and businessmen initiated the idea of a railroad circling

the city that would be in line with the industrial era back in the 1860s–1870s.

Moscow merchant Grigory Sushkin drafted the first project of this road in 1869. Three years later, a detailed plan based on experience with similar routes in Berlin and Paris was presented by Alexander Porokhovschikov and engineer Andrei Gorchakov at the City Council. In March 1898, the Ministry of Railways approved the project of the State Councillor and engineer Pyotr Rashevsky.

The construction of the Moscow circle railway was launched on August 3, 1903.

On 19 July 1908, the first train ran along the ring. Tickets were rather expensive, since



the tariff system was ill-considered. Passenger traffic was cancelled four months after. In May 1909, fares were revised, and townspeople started using the railway ring again. Until 1917, workers travelled along it to get to the enterprises adjacent to the road, those emerged along it in the years of industrial boost.

In the 1920s, convenient bus and tram routes appeared in the adjacent areas that made trains unpopular. In 1934, passenger traffic on the Moscow Circle Railway was closed again.

In the 1960s, the idea to run passenger trains on the Moscow Circle Railway was recalled, but the implementation failed once again.

During implementation of the modern project 31 stations appeared within the MCC,

with transport interchange hubs integrated into the metro system and located near above-ground transport stops and intercepting parking spaces. Passenger traffic was solemnly launched on the MCC on September 10, 2016. So, trains running along the «steel ring of Moscow» started carrying passengers once again after an 82-year interval.

Compiled on the basis of the materials provided by the official Moscow Mayor website: <https://www.mos.ru>, publications <https://stroimsk.ru/mobile/news/mtsk-pierieviezlo-364-mln-passazhirov-za-trigoda-s-momienta-otkrytiia>; <https://www.mos.ru/news/item/61869073/> and photos of Main archives directorate of the city of Moscow●



ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ 186

Грузовые перевозки: единые принципы организации.



ТРАНСПОРТНЫЕ КОРИДОРЫ 200

Перспективы МТК «Север–Юг».

ТРАНСПОРТНО- ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ЦЕНТРЫ 214

Гравитационный и многокритериальный метод для расчётов размещения ТЛЦ Казахстана.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ 228

Информационный контроль перевозок сырья металлургического предприятия.

ГОРОДСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ 244

Оценки и перспективы для Еревана.

ГОРОДСКОЙ НАЗЕМНЫЙ ТРАНСПОРТ 254, 268

Оптимизация методик проектирования маршрутов. Транспортно-пересадочные узлы городских районов Москвы.

RAILWAYS 193

Uniform principles of cargo operations.

TRANSPORT CORRIDORS 207

Prospects of development of International North–South transport corridor.

TRANSPORT AND LOGISTICS CENTRES 221

Centre of gravity and multicriteria methods for TLC location selection in Kazakhstan.

INDUSTRIAL TRANSPORT 236

Digital control of freight of raw material transportation at a metallurgical plant.

URBAN TRANSPORTATION SYSTEM 249

Yerevan city transport: evaluation and prospects.

URBAN SURFACE TRANSPORTATION 261, 277

*Optimization of routing methods.
Transport interchanges for Moscow districts.*





Единые принципы организации эксплуатационной работы железнодорожных грузовых перевозок



Евгения ПРОКОФЬЕВА



Виталий ПАНИН

*Прокофьева Евгения Сергеевна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.
Панин Виталий Владимирович – Институт экономики и развития транспорта, Москва, Россия*.*

Повышение производственной эффективности транспорта служит одним из основных катализаторов повышения качества жизни и социально-экономического развития. Превалирующие глобальные тенденции направлены на выстраивание логистических цепочек от производителей до потребителей. Трансграничное перемещение мирового производства в рамках глобализации, углубление интеграционных процессов между странами выводят на первый план вопросы разработки методологии проектирования и оценки международных транспортных коридоров с различных точек зрения – экономической, технической, социальной, экологической. Актуален вопрос гармонизации технической и нормативно-правовой базы организации «бесшовных» перевозок, синхронизации технологических циклов работы различных видов транспорта, в том числе в мультимодальных транспортных узлах. Большое количество исследований посвящено вопросам моделирования и управления транспортными потоками, новым методам прогнозирования транспортной ситуации с использованием результатов компьютерного динамического транспортного моделирования, анализу существующих ресурсов инфраструктуры и устранению «узких» мест в существующей железнодорожной системе (в том числе как за счёт расширения сети железных дорог, так и инновационных методов организации движения).

Исходя из того, что достижение целевых параметров эффективности производственной деятельности всех участников железнодорожных перевозок возможно за счёт качественных изменений в системе организации перевозочного процесса, целью исследо-

вания явилось изучение технологических аспектов повышения качества функционирования транспортного комплекса применительно к деятельности российских железных дорог.

Применялись методы системного анализа научно-технических данных и технико-экономических показателей работы сложных систем.

Рассмотрены вопросы внедрения сквозных принципов управления перевозочным процессом, расширено понятие «технологический полигон управления перевозочным процессом». Выполнен анализ и группировка методов повышения эффективности работы железнодорожного транспорта в части улучшения качественных показателей использования и совершенствования модели управления подвижным составом, повышения эффективности использования тяговых ресурсов, специализации железнодорожных направлений по преимущественным видам движения, установления гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов и их синхронизация с плечами работы локомотивов, организации перевозок грузов в вагонах с повышенной осевой нагрузкой, снятия барьерных ограничений в энергетическом комплексе и др.

Переход на полигонную модель организации технологического процесса, унификация и оптимизация использования имеющихся ресурсов, и, как следствие, снижение рисков возникновения убытков от перевозок, оказания услуг и незапланированного использования ресурсов являются эффективными инструментами повышения качества эксплуатационной работы на сети железных дорог.

Ключевые слова: транспорт, железные дороги, технологический полигон управления перевозочным процессом, сквозные принципы, полигонные технологии, оптимизация использования ресурсов, снижение рисков.

*Информация об авторах:

Прокофьева Евгения Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, первый заместитель директора Института управления и информационных технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, eskolesnikova@mail.ru.

Панин Виталий Владимирович – кандидат технических наук, и.о. заместителя генерального директора Института экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»), Москва, Россия, panin_v_v@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.04.2019, принята к публикации 04.09.2019.

For the English text of the article please see p. 193.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортная отрасль напрямую влияет на темпы экономического роста и устойчивое развитие всех сфер жизни общества. Наличие сбалансированной транспортной системы, её надёжное и бесперебойное функционирование, является залогом гармоничного развития любого государства.

Повышение производственной эффективности транспорта служит одним из основных катализаторов повышения качества жизни и социально-экономического развития в мире. Мировые тенденции направлены на глобализацию экономических взаимоотношений, выстраивание логистических цепочек от производителей до потребителей. Одним из важных звеньев является транспортная составляющая, так как она оказывает значительное влияние на себестоимость продукции и повышение эффективности оборачиваемости основных производственных средств предприятий. Данному вопросу уделено большое внимание в мировых научных и практических исследованиях.

Одним из основных базисов развития открытой экономики и диверсификации торговых взаимоотношений являются международные грузовые перевозки. Трансграничное перемещение мирового производства в рамках глобализации, углубление интеграционных процессов между странами выводят на первый план вопросы разработки методологии проектирования и оценки международных транспортных коридоров с различных точек зрения — экономической, технической, социальной, экологической [1]. Транспортно-экономические связи между странами Европы и Юго-Восточной Азии имеют высокий бизнес-потенциал, позволяют эффективно осваивать значительные грузопотоки и являются основными направлениями концентрации транзитных контейнеропотоков. Многие авторы в своих исследованиях останавливаются на вопросах анализа состояния интермодальных транспортных коридоров, а также производят оценку их эффективности по принципу «затраты—время—расстояние» [2; 3].

В связи с вышесказанным, остро стоит вопрос гармонизации технической и нор-

мативно-правовой базы организации «бесшовных» перевозок, синхронизации технологических циклов работы различных видов транспорта, в том числе в мультимодальных транспортных узлах. В этом стратегическом процессе решающую роль играет Международный союз железных дорог (МСЖД) в качестве драйвера и распространителя знаний, а также — платформы для обсуждения и обмена актуальной информацией и передовыми практиками [4]. Повышение качества транспортно-логистического обслуживания (оперативность, точность, доступность, безопасность и др.), обеспечение свободного перемещения товаров, людей, услуг и капитала невозможно без современных инновационных «умных» решений и внедрения инструментов оперативного характера.

В настоящее время большое количество исследований посвящено вопросам моделирования и управления транспортными потоками. Новые методы прогнозирования транспортной ситуации с использованием результатов компьютерного динамического транспортного моделирования повышают надёжность и качество принимаемых транспортных решений [5; 6].

Значительное внимание уделяется анализу существующих ресурсов инфраструктуры и устранению «узких» мест в существующей железнодорожной системе. Ряд авторов рассматривает решение вопроса увеличения пропускной и провозной способности для удовлетворения возрастающих потребностей в перевозках и повышения качества их планирования за счёт расширения сети железных дорог [7]. Другие — предлагают инновационные методы организации движения, основанные на максимальном использовании мощности двухпутной железнодорожной линии вне зависимости от маршрута следования поездов [8]. Исследование, проведённое авторами [9], заключается в расчёте индексов использования пропускной способности железнодорожных станций и узлов и применении данных методов к определению платы за доступ к железнодорожной инфраструктуре. В работе [10] рассматривается реализация гибридных аукционов на основе алгоритма итерационного распределения пропускной способности для обеспечения недискри-



минационного доступа к железнодорожной инфраструктуре.

В Российской Федерации, наряду с общемировыми тенденциями, существуют особенности, определённые спецификой поэтапного развития транспортной отрасли страны. За последние годы в организации перевозочного процесса на железных дорогах России произошли существенные изменения.

Изменения экономической конъюнктуры на мировом рынке, структуры погрузки и направления следования основных грузов и вагонопотоков, существенное изменение дальности перевозок, отсутствие вагонного парка под управлением перевозчика в условиях множественности операторов железнодорожного подвижного состава привели к дополнительному наличию инфраструктурных ограничений на железнодорожной сети общего пользования, снижению общесетевой эффективности управления подвижным составом и эффективности работы ОАО «РЖД» в целом.

Данная ситуация требует повышения качества работы железнодорожного транспорта не только путём вложения крупных инвестиций в развитие инфраструктуры с внедрением и использованием инновационных технических средств, но и, прежде всего, на основе новых технологических решений и подходов, в том числе изменения модели управления перевозочным процессом.

Целью исследования явилось изучение технологических аспектов повышения качества функционирования транспортного комплекса применительно к деятельности российских железных дорог.

Для решения поставленных вопросов применялись *методы* системного анализа научно-технических данных и технико-экономических показателей работы сложных систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ методов повышения эффективности работы железнодорожного транспорта

Прогнозные объёмы перевозок на перспективу до 2025 года превышают существующие пропускные и провозные способности сети. Поэтому достижение целевых параметров клиентоориентированности по срокам и скорости доставки грузов

предусматривается за счёт осуществления приоритетных мероприятий, позволяющих обеспечить внедрение технологических решений, сбалансированных с планами по развитию инфраструктуры и обновлению подвижного состава.

Ключевыми инициативами повышения производственной эффективности железнодорожного транспорта являются [11, с. 3–4]:

1) Развитие на сети железных дорог сквозных принципов управления перевозочным процессом, предусматривающее унификацию и оптимизацию использования тяговых средств, параметров графика движения поездов, требований к содержанию инфраструктуры, согласованное развитие в границах технологических полигонов управления перевозочным процессом всего производственного комплекса. Развитие и усиление взаимодействия между филиалами на полигонном уровне управления создают возможности для формирования единого центра ответственности с общими показателями работы, направленными на минимизацию производственных потерь при взаимодействии различных вертикалей.

Технологический полигон управления перевозочным процессом рассматривается как сложная система, состоящая из самостоятельно функционирующих отдельных подсистем, объединённых по технологическим признакам и обладающих правом принятия решения [12, с. 222]. При такой системе организации работы основное внимание концентрируется на согласовании взаимосвязей между отдельными элементами системы и выборе компромиссной стратегии организации работы с целью снижения затрат времени на согласование управляющих воздействий, а также потерь времени и ресурсов на стыках управляющих звеньев.

Таким образом, под *технологическим полигоном управления перевозочным процессом* понимается укрупнённая часть сети железных дорог ОАО «РЖД», объединённая по технологическим признакам (зарождение/погашение грузопотоков, обеспечение тягового обслуживания, логистическое управление подводом к морским портам и межгосударственным стыковым пунктам и др.), с целью унификации технологиче-

ских и инфраструктурных параметров перевозочного процесса, обеспечения единого сквозного планирования и управления эксплуатационной работой и выполнением строительно-монтажных и ремонтных работ.

2) Повышение эффективности перевозочного процесса за счёт улучшения качественных показателей использования подвижного состава.

Для освоения перспективных объёмов перевозок предусматривается совершенствование технологии перевозочного процесса, в том числе за счёт организации движения грузовых поездов по расписанию, модернизации подвижного состава, перераспределения грузопотоков между параллельными ходами, повышения массы грузовых поездов, сокращения межпоездных интервалов, установления гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов увеличенной протяжённости, улучшения эффективности использования парка локомотивов и локомотивных бригад.

3) Совершенствование модели управления парком грузовых вагонов за счёт технологических решений по консолидации универсального подвижного состава, что позволит сократить загрузку инфраструктуры и более эффективно использовать имеющиеся ресурсы для освоения предъявляемых к перевозке объёмов грузов.

4) Повышение эффективности использования парка локомотивов и локомотивных бригад за счёт:

- увеличения плеч работы локомотивных бригад и локомотивов при переходе на полигонные технологии организации их работы;
- приобретения нового подвижного состава с улучшенными тяговыми характеристиками;
- совершенствования системы контроля и планирования за использованием локомотивов во всех видах движения;
- снижения доли непроизводительных, вспомогательных простоев и пробегов локомотивов;
- повышения среднесуточной производительности тягового подвижного состава в грузовом и маневровом движении;
- синхронизации развития инфраструктуры и формирования модели ло-

мотивного парка с учётом единых норм массы на основных направлениях следования грузопотоков, что позволит повысить пропускную и провозную способности и гарантированный вывоз всех предъявляемых объёмов;

• унификации парка локомотивов с оптимизацией ремонтной базы и улучшением сервиса.

5) Специализация железнодорожных направлений под преимущественно пассажирское и грузовое движение создаёт ряд технологических преимуществ: обеспечение устойчивой работы каждой из систем за счёт исключения съёма поездов одной категории другими, повышение скорости и надёжности доставки грузов, возможность применения дифференцированных норм в содержании инфраструктуры.

6) Повышение эффективности на малоинтенсивных железнодорожных линиях за счёт реализации комплекса мероприятий по оптимизации их работы и совершенствованию нормативной базы в части исключения избыточных требований к содержанию инфраструктуры.

7) Обновление железнодорожного пути с применением новых технологий, равно-ресурсных элементов и конструкций, обеспечивающих снижение стоимости жизненного цикла. Адресное устранение инфраструктурных ограничений и приведение установленной скорости к оптимальным параметрам.

Инвестиционные проекты предусматривают повышение пропускных и провозных способностей железнодорожных линий, в том числе позволяют снизить протяжённость «узких» мест за счёт строительства новых железнодорожных участков технологического назначения (обходы узлов, соединение параллельных ходов), строительства дополнительных главных путей, электрификации железнодорожных линий, развития станций.

8) Установление гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов увеличенной протяжённости с увеличением среднего гарантийного плеча и их синхронизация с плечами работы локомотивов за счёт перехода функционирования вагонного комплекса на выявление предотказных состояний грузовых вагонов, реализации проектов тяжеловес-





ного движения на сети железных дорог с применением вагонов нового поколения с повышенной осевой нагрузкой. Внедрение данной технологии позволит оптимизировать число вагонных депо, пунктов технического обслуживания вагонов, а также сократить количество переработок на технических станциях.

9) Подготовка объектов инфраструктуры для обеспечения организации перевозок грузов в вагонах с повышенной осевой нагрузкой. Эффективность достигается при условии обращения поездов на кольцевых маршрутах без переформирования в пути следования по расписанию. При этом с учётом разработки совмещённого вариантного графика движения поездов будет обеспечен устойчивый вывод поездов с участковых и сортировочных станций, увеличена провозная способность при неизменной длине составов и частоты их обращения.

10) Снятие барьерных ограничений в энергетическом комплексе за счёт синхронизации мероприятий по переходу на полигонную модель управления перевозочным процессом с ликвидацией участков, имеющих ограничения пропускной способности по устройствам энергоснабжения.

В рамках трансформации модели организации и управления эксплуатационной работой на сети железных дорог ОАО «РЖД» претерпевают изменения не только основные производственные процессы.

Неотъемлемой частью проводимых изменений является совершенствование и актуализация нормативно-технологической базы ОАО «РЖД». В компании разработан ряд новых документов: Программа развития вертикали управления движением «Переход от региональных принципов управления перевозочным процессом к планированию и организации движения поездов на полигонах сети», Единый технологический процесс работы Восточного полигона, Типовой технологический процесс работы полигона и др. Положения указанных документов должны распространяться на взаимодействие всех участников перевозочного процесса [13–15].

2. Разработка решений

Для эффективного управления перевозочным процессом необходимо использовать единые принципы организации эксплуатационной работы, определяющие:

1. Внедрение сквозных технологий организации перевозочного процесса и планирования перевозок с учётом пропускных и перерабатывающих способностей инфраструктур общего и необщего пользования (грузополучателей, грузоотправителей) в основные технологические процессы компании:

- оперативное планирование и управление поездной работой (расширение технологических границ управления, увеличение полигона следования транзитных поездов без технологических стоянок, ликвидация «барьерных» мест и др.);

- управление тяговыми ресурсами (оптимизация и совершенствование существующих технологий управления тяговыми ресурсами);

- управление вагонными парками (установление гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов увеличенной протяжённости, перевозка с увеличенной скоростью, перевозка по расписанию, заключение долгосрочных контрактов, повышение уровня маршрутизации и контейнеризации);

- оперативное планирование и управление местной работой (сквозное логистическое взаимоувязанное планирование продвижения грузо- и вагонопотоков, в том числе с использованием автоматизированных систем) по уровням управления:

- сетевому – ЦУП ЦД (Центр управления перевозками Управления движения Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД»);

- полигонному – ЦУП П, ДЛЦ (центр управления перевозками полигона, логистический центр железной дороги);

- региональному – ДЦУП (дорожный центр управления перевозками);

- линейному – ДС (станция);

- конечного потребителя – грузоотправителя (грузоотправителя);

- проведение ремонтных и строительно-монтажных работ (предоставление «окон» в единых технологических створах, включая длительно закрытые перегоны, разрывные технологии, полигонные модели работы путевых машин).

2. Внедрение полигонной модели управления перевозочным процессом (минимизация производственных потерь при взаимодействии различных вертикалей, единые диспетчерские смены, повышение качества планирования поездной и местной работы).

3. Прогнозирование (планирование) предъявления грузов и расчёт производственно-экономических показателей (сквозное производственное планирование с учётом технико-технологических возможностей инфраструктуры, «шахматки» погрузки в разрезе «станция–станция», в том числе с использованием Автоматизированной системы централизованной подготовки и оформления перевозочных документов (АС ЭТРАН), Имитационной

ресурсной модели использования инфраструктуры ОАО «РЖД» (АС ПРОГРЕСС), предиктивной бизнес-модели и др.).

4. Регулирование парка грузовых вагонов на инфраструктуре общего пользования, в том числе с возможностью консолидации универсального вагонного парка под управлением общесетевого перевозчика и/или под управлением субъекта (укрупнённой группы субъектов) операторского сообщества.

5. Специализация инфраструктуры ОАО «РЖД» для преимущественных видов движения (повышение скорости и надёжности доставки грузов, применение дифференцированных норм в содержании инфраструктуры).

6. Технология перемещения и размещения на инфраструктуре порожних вагонов (определение насыщения вагонным парком для оценки технологической возможности осуществления перевозки и доступа к железнодорожной инфраструктуре общего пользования).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Развитие сквозных технологических принципов управления позволяет повысить эксплуатационные и экономические показатели работы железнодорожного транспорта за счёт синергетического эффекта в части [16, с. 14]:

- повышения качества эксплуатационной работы в условиях улучшения управляемости перевозочным процессом;

- повышения протяжённости тяговых плеч и гарантийных участков безопасного следования вагонов;

- рационального использования тягового подвижного состава и рациональную организацию рабочего времени и времени отдыха локомотивных бригад;

- рационального использования возможностей инфраструктуры;

- оптимизации районов диспетчерского управления.

Результатами внедрения новых технологических решений являются повышение эффективности производственной деятельности ОАО «РЖД» и других участников перевозочного процесса за счёт:

1. Оптимизации использования ресурсов посредством повышения энергоэффек-



тивности, рациональной технологии организации эксплуатационной работы, управления перевозочным процессом в рамках единой смены.

2. Снижения рисков незапланированного использования ресурсов в связи с уменьшением числа или недопущением несогласованных управленческих решений, в том числе по причине длительного согласования с использованием средств связи, ведущих к снижению эффективности, а также к незапланированным финансовым потерям.

3. Снижения рисков выплаты пени (убытков) при организации перевозок и оказании услуг за несвоевременную доставку грузов и порожних вагонов, за несохраненные перевозки; сокращения издержек грузовладельцев, вызванных замедлением доставки грузов и оборачиваемости оборотных средств (ростом грузовой массы в движении).

В результате последовательной и адресной реализации на сети железных дорог принципов полигонной идеологии будут соблюдены и полностью сбалансированы интересы различных бизнес-блоков, исходя из экономических критериев, определяемых интересами ОАО «РЖД» в целом и участников перевозочного процесса в частности.

Разработка и внедрение нормативно-технологической базы с учётом проведённых исследований является базисом для совершенствования организационной основы эксплуатационной работы и сквозных технологических принципов управления.

Представленные предложения по формированию полигонной модели управления являются универсальными и могут быть использованы для других видов транспорта, а также транспортной системы России в целом. Отдельные предлагаемые блоки решений с учётом адаптации под конкретные местные условия могут быть рассмотрены для внедрения в транспортном комплексе Сербии, Китая, Индии и других стран.

ЛИТЕРАТУРА

1. Žak, J., Galińska, B. Design and evaluation of global freight transportation solutions (corridors). Analysis of a real world case study. *Transportation Research Procedia*,

2018, Vol. 30, pp. 350–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.038>.

2. Regmi, M. B., Shinya, Hanaoka. Assessment of intermodal transport corridors: Cases from North-East and Central Asia. *Research in Transportation Business & Management*, December 2012, Vol. 5, pp. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.11.002>.

3. Saeedi, H., Behdani, B., Wiegmanns, B., Zuidwijk, R. Assessing the technical efficiency of intermodal freight transport chains using a modified network DEA approach. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, June 2019, Vol. 126, pp. 66–86. DOI: [10.1016/j.tre.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.04.003).

4. Global vision for railway development. International Union of Railways (UIC), Paris, 2015. [Электронный ресурс]: https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf. Доступ 04.09.2019.

5. Rong, Zhang; Lu, Li; Wenliang, Jian. Reliability analysis on railway transport chain. *International Journal of Transportation Science and Technology*, June 2019, Vol. 8, Iss. 2, pp. 192–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2018.11.004>.

6. Štefancová, V., Nedeliaková, E., López, E. C. Connection of dynamic quality modeling and total service management in railway transport operation. *Procedia Engineering*, December 2017, Vol. 192, pp. 834–839. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.06.144](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.144).

7. Burdett, R. L. Optimization models for expanding a railway's theoretical capacity. *European Journal of Operational Research*, 2016, Vol. 251, Iss. 3, pp. 783–797. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.12.033](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.033).

8. Ljubaj, I., Mlinarić, T. J. The possibility of utilising maximum capacity of the double-track railway by using innovative traffic organization. *Transportation Research Procedia*, 2019, Vol. 40, pp. 346–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.051>.

9. Armstrong, J., Preston, J. Capacity utilisation and performance at railway stations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, December 2017, Vol. 7, Iss. 3, pp. 187–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.08.003>.

10. Stojadinović, N., Bošković, B., Trifunović, D., Janković, S. Train path congestion management: Using hybrid auctions for decentralized railway capacity allocation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, November 2019, Vol. 129, pp. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.013>.

11. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 г., утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации 19.03.2019 г. № 466-п. [Электронный ресурс]: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf>. Доступ 04.09.2019.

12. Михалевич В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования сложных систем. — М.: Наука, 1982. — 287 с.

13. Распоряжение ОАО «РЖД» «Программа развития вертикали управления движением на основе научно-технических достижений и информатизации», утверждено 09.06.2015 г. № 1458р.

14. Единый технологический процесс работы восточного полигона, утверждён первым вице-президентом ОАО «РЖД» А. А. Краснощёком 27.09.2016 г. № 574.

15. Типовой технологический процесс работы полигона, утверждён распоряжением ОАО «РЖД» 26.12.2016 г. № 2700р.

16. Зобнин В. Л., Панин В. В., Прокофьева Е. С., Рубцов Д. В. Типовая технология управления перевозками на объединённых полигонах // Железнодорожный транспорт. — 2016. — № 11. — С. 7–14. ●



Uniform Principles of Organization of Rail Freight Transportation Operations



*Prokofieva Evgeniya S., Russian University of Transport, Moscow, Russia.
Panin Vitaly V., Institute of Transport Economics and Development, Moscow, Russia*.*

Evgeniya S. PROKOFIEVA **Vitaly V. PANIN**

ABSTRACT

Improving the operational efficiency of transport is one of the main catalysts for raising the quality of life and socio-economic development. The prevailing global trends are aimed at establishing logistic chains from producers to consumers. The cross-border movement of world production within the framework of globalization, the deepening of integration processes between countries highlight the issues of developing a methodology for planning and evaluating international transport corridors from various points of view, and economic, technical, social, environmental and other aspects. The urgent issue is the harmonization of the technical and regulatory framework for the organization of «seamless» transportation, the synchronization of the technological cycles of various modes of transport, including operation of multimodal transport hubs. A large number of studies are dedicated to the modelling and control of traffic flows, new methods of forecasting the transport situation using the results of computer dynamic transport modelling, analysis of existing infrastructure resources and elimination of bottlenecks in the existing railway system (including through the expansion of the railway network and innovative methods of traffic control).

Hence the achievement of target parameters of efficiency of production activity of all participants in railway transportations is possible through qualitative changes in the system of the organization of transportation process,

the objective of the research was to study technological aspects of improvement of quality of functioning of the transport system in relation to activity of the Russian railways.

The research applied methods of system analysis of scientific and technical data and technical and economic indicators of complex systems.

The issues of implementation of end-to-end principles of transportation process management are considered, the concept of «technological polygon of transportation process management» is expanded. The analysis and grouping of methods for improving the efficiency of railway transport was carried out with regard to improving the operation quality indicators and refined model of rolling stock management, increasing the efficiency of the use of traction equipment, profiling of railway itineraries in respect of the preferred types of traffic, establishing sections well-provided for safe passage of freight trains and synchronized with the operation ranges of locomotives, organizing freightage in wagons with increased axle load, removing barriers and restrictions in the power supply sector, etc.

The transition to the «polygon» model of the organization of the technological process, the unification and optimization of the use of available resources, and, as a result, the reduction of risks of losses from transportation, service provision and unplanned use of resources are effective tools to improve the quality of rail operations.

Keywords: transport, railways, technological polygon of transportation process management, end-to-end principles, railway polygon technologies, optimization of resource use, risk reduction.

*Information about the authors:

Prokofieva, Evgeniya S. – Ph.D. (Eng), Associate Professor, First Deputy Director of the Institute of Management, Control and Information Technology of the Russian University of Transport, Moscow, Russia, eskolesnikova@mail.ru.

Panin, Vitaly V. – Ph.D. (Eng), Acting Deputy Director of the Institute of Transport Economics and Development (JSC IERT), Moscow, Russia, panin_v_v@mail.ru.

Article received 24.04.2019, accepted 04.09.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 186.

Background. The transport industry directly affects the rate of economic growth and sustainable development of all spheres of the society. The presence of a balanced transport system, organizing its reliable and uninterrupted functioning, is the key to the harmonious development of any nation.

Improving the production efficiency of transport is one of the main catalysts for improving the quality of life and socio-economic development in the world. World trends are aimed at the globalization of economic relations, establishing logistics chains from producers to consumers. Since transport component has a significant impact on the cost of production and improving the efficiency of the turnover of fixed assets of enterprises it is among core links of the chain. World scientific and practical researches give great attention to that issue.

International freight transportation is one of the main pillars for the development of an open economy and the diversification of trade relations. The cross-border transfer of world production within the framework of globalization, the deepening of integration processes between countries highlight the issues of developing a methodology for designing and evaluating international transport corridors from different points of view, from economic, technical, social, environmental and other aspects [1]. Transport and economic relations between the countries of Europe and South-East Asia have a high business capacity and can effectively develop significant cargo flows, being particularly main directions of concentration of transit container flows. Many authors in their research dwell on the issues of analysis of the state of intermodal transport corridors, as well as evaluate their effectiveness on a cost-time-distance basis [2; 3].

In connection with the foregoing, there is an urgent issue of harmonizing the technical and regulatory framework for establishing «seamless» transportation, synchronizing the technological cycles of various modes of transport, including their interaction in multimodal transport hubs. In this strategic process, the International Union of Railways (UIC) plays a crucial role as a driver and distributor of knowledge, as well as a platform for discussion and exchange of relevant information and best practices [4]. Improving the quality of transport and logistics services

(speed, accuracy, availability, safety, etc.), ensuring the free movement of goods, people, services and capital is impossible without modern innovative «smart» solutions and the introduction of operational tools.

At present, many studies are devoted to the modelling and management of traffic flows. New methods of forecasting the transport situation using the results of computer dynamic transport modelling increase the reliability and quality of transport decisions [5; 6].

Considerable attention is paid to the analysis of existing infrastructure resources and the elimination of bottlenecks in the existing railway system. Several authors are considering the issue of increasing throughput and freight capacity to meet the increasing demand for transportation and improving the quality of their planning by expanding the railway network [7]. Other authors propose innovative methods of traffic organization based on maximum use of capacity of a double-line railway regardless of the route of trains [8]. The study carried out by the authors [9] deals with the calculation of the indices of utilization of throughput of railway stations and railway hubs and with applying these methods to determine the fees for access to railway infrastructure. In the study [10] the authors considered the implementation of hybrid auctions based on the algorithm of iterative allocation of throughput capacity to ensure non-discriminatory access to the railway infrastructure.

In the Russian Federation, along with global trends, there are features determined by the specifics of the phased development of the country's transport industry. In recent years, the organization of the transportation process on the railways in Russia has undergone significant changes.

Changes in the economic situation in the world market, changes in the structure of loading and direction of the main freight and car flows, a significant change in the transportation range, lack of rolling stock under the direct control of the carrier company under the conditions of a multiplicity of railway rolling stock operators have led to additional infrastructural restrictions on the public railway network, and a decrease in the general network efficiency of rolling stock management and overall performance of JSC Russian Railways as a whole.

This situation requires improving the quality of railway transport operations not only by making large investments in infrastructure development, with the introduction and use of innovative technical means, but also, above all, on the basis of new technological solutions and approaches, including through changing the model of transportation process management.

The objective of the research was to study the technological aspects of improving the quality of functioning of the transport complex in relation to the activities of railways in the Russian Federation.

To solve the issues raised, *methods* of system analysis of scientific and technical data and technical and of economic performance indicators of complex systems were used.

Results.

1. Analysis of methods to improve the efficiency of railway transport operation

The forecasted traffic volumes for the future until 2025 exceed the existing throughput and freight capacity of the network. Therefore, the achievement of target parameters of customer-focused approach with regard to the timing and speed of delivery of goods is provided through the implementation of priority activities that allow for the introduction of technological solutions that are balanced with plans on the development of infrastructure and renewal of rolling stock.

Key initiatives to improve the efficiency of railway transport operation are as follow [11, pp. 3–4]:

1) *Development of the end-to-end principles of the transportation process management* on the railway network provides for unification and optimization of the use of traction equipment, parameters of train schedule, requirements to infrastructure maintenance, and for the coordinated development of the entire production complex within the boundaries of the technological polygons of transportation process management. Development and strengthening of interaction between branches at the polygon level of management create opportunities for formation of a single center of responsibility with general performance indicators aimed at minimization of production losses during interaction of different verticals.

The technological polygon of transportation process management is considered as a complex system consisting of independently

functioning separate subsystems, united by technological features and having the right to make a decision [12, p. 222]. With such a system of organization of work, the main focus is on coordinating the relationships between the individual elements of the system and choosing a compromise strategy for organizing work in order to reduce the time spent on coordination of control actions, as well as to save time and resource losses at the junctions of control links.

Thus, *the technological polygon of transportation process management* is understood as an enlarged part of the railway network of JSC Russian Railways*, united by technological features (origin/terminal point of cargo flows, provision of traction equipment, logistics management of approach to seaports and cross border interstate division points, etc.), in order to unify the technological and infrastructure parameters of the transportation process, to ensure a unified end-to-end planning and management of operational work and the implementation of construction and repair works.

2) *Improving the efficiency of the transportation process by improving the quality indicators of the use of rolling stock.*

In order to master the prospective volumes of transportation, it is envisaged to improve the technology of the transportation process, particularly through the organization of freight trains traffic according to schedule, the modernization of rolling stock, the redistribution of cargo flows between parallel runs, the increasing weight of freight trains, the reduction of intervals between consecutive trains, the establishment of well-provided line sections of increased length for safe passage of freight trains, improving the efficiency of use of the fleet of locomotives and of locomotive crews.

3) *Improving the model of managing the fleet of freight wagons through technological solutions*

* Within the Russian public railway network there are 16 railways which are branches of JSC Russian Railways. The term «polygon» as a kind of interlanguage homonym has been traditionally used in Russian language to denominate either the entire network or its part (e.g. «polygon» of a given railway, branch of the JSC, or a certain regional or geographical segment of the railway, e.g. Eastern polygon describing section of railway network in Russian Far East and Siberia). While it can be translated as a specific, singled out part, segment, or section of railway network, to better specify the idea of the authors the specific term suggested by them is maintained. – *ed.note.*



for the consolidation of universal rolling stock will reduce the load of infrastructure and will allow more efficient use of available resources for transportation of the required freight volumes.

4) *Improving the efficiency of using the fleet of locomotives and locomotive crews* due to:

- increase of the length of railways hauls operated by locomotive crews and locomotives when shifting to polygon technologies of the organization of their work;
- purchase of new rolling stock with improved traction performance;
- improvement of the system of planning and monitoring of the use of locomotives in all types of traffic;
- reducing the share of unproductive, secondary downtime and runs of locomotives;
- increase of average daily productivity of traction rolling stock in freight and shunting operations;
- synchronization of infrastructure development and formation of the locomotive fleet model taking into account uniform weight standards on the main routes of cargo flows, which will increase the throughput and freight capacity and guaranteed transportation of all required volumes;
- unification of locomotive fleet and optimization of repair base and improvement of service.

5) *Specialization of railway lines for mainly passenger or freight traffic* creates a number of technological advantages, which are ensuring stable operation of each of the systems by eliminating the problems caused by intersection of schedules of trains of different categories, increasing the speed and reliability of freight delivery, the possibility of applying differentiated standards in the maintenance of infrastructure.

6) *Improving efficiency on low-intensity railway lines* by implementing a set of measures to optimize their operation and improve the regulatory framework in terms of eliminating excessive requirements for the maintenance of infrastructure.

7) *Renewal of the railway track* using new technologies, new elements and structures of equal service life that reduce the cost of the life cycle. Targeted elimination of infrastructure restrictions and bringing the allowed speed to the optimal parameters.

Investment projects provide for increasing the throughput and freight capacity of railway lines, including reducing the length of

«bottlenecks» due to the construction of new railway sections for technological purposes (bypassing railway hubs, connection of parallel tracks), construction of additional main tracks, electrification of railway lines, development of the stations.

8) *Establishment of the well-provided sections of increased length for safe transit of freight trains along with their synchronization with the operation of the locomotives by transition of the wagon facilities divisions to the identification of pre-failure condition of freight cars, and the implementation of heavy-haul traffic on the rail network using new-generation rail wagons with increased axle load.* The introduction of this technology will optimize the number of wagon sheds, wagon maintenance facilities, as well as will reduce the overtime work at technical maintenance stations.

9) *Preparing infrastructure to ensure the organization of freight transportation in wagons with higher axial load.* Efficiency is achieved if trains are circulating on the ring routes without being re-composed along the scheduled route. At the same time, taking into account the development of a combined option-focused train schedule, this will provide for a steady departure of trains from transit and sorting stations, also the freight capacity will be increased for the same length of trains and frequency of their circulation.

10) *Removal of barriers in the power supply sector due to synchronization of measures on transition to polygon model of transportation process management with elimination of sections with throughput restrictions due to power supply facilities.*

The transformation of the model of organization and management of operations on the railway network of JSC Russian Railways also results in changes beyond the main production processes. The improvement and updating of the regulatory and technological base of JSC Russian Railways is an integral part of the ongoing changes. The company has developed a number of new documents: the Development Program of Traffic Control named «Transition from Regional Principles of Transportation Process Management to Planning and Organization of Train Traffic at Network Polygons», the Single Technological Process of the Eastern Polygon operation, the Model Technological Process of Polygon Operation, etc. The provisions of these

documents should apply to the interaction of all participants in the transportation process [13–15].

2. Development of solutions

To effectively control the transportation process, it is necessary to use uniform principles of organization of operations, which determine:

1. *Implementation of end-to-end technologies of organization of transportation process and transportation planning in the main technological processes of the company* considering throughput and processing capabilities of public and non-public infrastructures (consignees, consignors):

- operational planning, management and control of train operation (expanding the technological boundaries of management, increasing the range of run of transit trains without technological stops, eliminating «barrier» areas, etc.);

- traction equipment management (optimization and improvement of existing technologies of traction equipment control);

- control of wagon fleet (establishment of well-provided sections of increased length of safe transit of freight trains, transportation with increased speed, transportation according to schedule, conclusion of long-term contracts, improvement of routing and containerization);

- operational planning and management of local operations (end-to-end logistic interconnected planning of freight and wagon flow progress, particularly using automated systems) by each management level:

- network level: the Traffic Control Center of Traffic Management of the Traffic division of the Central traffic Control Directorate, branch of JSC Russian Railways;

- polygon level: a Polygon Traffic Control Center, Railway Logistics Center;

- regional level: a Railway Traffic Control Center;

- line level: a railway station;

- final consumer–consignee (consignor) level;

- carrying out repair and construction works (provision of intervals for repairs within common process schedule, including long-term closed sections, breaking technologies, polygon models of track machines operation).

2. *Implementation of polygon model of transportation process management* (minimization of production losses during interaction of different verticals [of management

hierarchies], unified dispatching shifts, improving the quality of train and local operations' planning).

3. *Forecasting (planning) of the presentation of goods and calculation of production and economic indicators* (end-to-end production planning considering the technical and technological capacity of the infrastructure, check chart in the context of «station–station», including using the computer-aided system of centralized preparation and registration of transportation documents (AS ETRAN), the Simulation resource model of the infrastructure of JSC Russian Railways (AS PROGRESS), predictive business model, etc.).

4. *Regulation of the freight wagon fleet on the public infrastructure, including the possibility of consolidation of the universal wagon fleet under the management of the network-wide carrier and/or under the management of a member (an enlarged group of members) of the rolling stock operators' community.*

5. *Specialization of the infrastructure of JSC Russian Railways for the preferred types of traffic* (increase in speed and reliability of freight delivery, application of differentiated standards in the maintenance of infrastructure).

6. *Technology of transfer and placing of empty wagons within the infrastructure network* (determining saturation with the wagon fleet to assess the technological feasibility of transportation and access to public railway infrastructure).

Research results and conclusions

Development of end-to-end technological principles of management makes it possible to increase the operational and economic indicators of operation of railway transport thanks to the synergistic effect in terms of [16, p. 14]:

- improving the quality of operations following improved controllability of the transportation process;

- increase of distances of traction and well-provided sections for safe passage of cars;

- rational use of traction rolling stock and rational organization of working and rest time of locomotive crews;

- rational use of infrastructure capabilities;

- optimization of dispatching control areas.

The implementation of new technological solutions will result in increase in efficiency of production activity of JSC Russian Railways



and other participants to transportation process thanks to:

1. Optimization of resource use by improving energy efficiency, applying rational technology for operations, organizing transportation process management within a single shift.

2. Reducing the risks of unplanned use of resources through a decrease/prevention of uncoordinated management decisions, including those due to long-term coordination with the use of communication tools leading to reduced efficiency and unplanned financial losses.

3. Reducing the risks of payment of penalties (losses) regarding transportation and the provision of services due to untimely delivery of goods, empty wagons, and to unsafe transportation; as well as reducing freight owner costs caused by slow delivery of goods and turnover of current assets (increase of in-traffic cargo).

As a result of the consistent and targeted implementation of the principles of the polygon ideology on the railway network, the interests of various business blocks (stakeholders) will be observed and fully balanced on the basis of economic criteria determined by the interests of JSC Russian Railways and of participants in the transportation process.

The development and implementation of a regulatory and technological environment with account for the research conducted is the basis for improving the organizational basis of operations and of end-to-end technological management principles.

The presented proposals for the formation of a polygon management model are universal and can be used for other modes of transport, as well as for the entire transport system of Russia. Individual suggested blocks of solutions, considering their adaptation to specific local conditions, might be considered for implementation in the transport systems of Serbia, China, India, and other countries.

REFERENCES

1. Žak, J., Galińska, B. Design and evaluation of global freight transportation solutions (corridors). Analysis of a real world case study. *Transportation Research Procedia*, 2018, Vol. 30, pp. 350–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.038>.

2. Regmi, M. B., Shinya, Hanaoka. Assessment of intermodal transport corridors: Cases from North-East and Central Asia. *Research in Transportation Business & Management*, 2012, Vol. 5, pp. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.11.002>.

3. Saeedi, H., Behdani, B., Wiegman, B., Zuidwijk, R. Assessing the technical efficiency of intermodal freight transport chains using a modified network DEA approach. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, Vol. 126, pp. 66–86. DOI: [10.1016/j.trre.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.trre.2019.04.003).

4. Global vision for railway development. International Union of Railways (UIC), Paris, 2015. [Electronic resource]: https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf. Last accessed 04.09.2019.

5. Rong, Zhang; Lu, Li; Wenliang, Jian. Reliability analysis on railway transport chain. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2019, Vol. 8, Iss. 2, pp. 192–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.11.004>.

6. Štefancová, V., Nedeliaková, E., López, E. C. Connection of dynamic quality modeling and total service management in railway transport operation. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 192, pp. 834–839. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.06.144](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.144).

7. Burdett, R. L. Optimization models for expanding a railway's theoretical capacity. *European Journal of Operational Research*, 2016, Vol. 251, Iss. 3, pp. 783–797. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.12.033](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.033).

8. Ljubaj, I., Mlinarić, T. J. The possibility of utilising maximum capacity of the double-track railway by using innovative traffic organization. *Transportation Research Procedia*, 2019, Vol. 40, pp. 346–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.051>.

9. Armstrong, J., Preston, J. Capacity utilisation and performance at railway stations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2017, Vol. 7, Iss. 3, pp. 187–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.08.003>.

10. Stojadinović, N., Bošković, B., Trifunović, D., Janković, S. Train path congestion management: Using hybrid auctions for decentralized railway capacity allocation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, Vol. 129, pp. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.013>.

11. Long-term development program of JSC Russian Railways until 2025 [Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZD» do 2025 goda] approved by the order of the Government of the Russian Federation No. 466-r dated 19.03.2019. [Electronic resource]: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgY07PnJ42aXtXAg2RXSVoKu.pdf>. Last accessed 04.09.2019.

12. Mikhalevich, V. S., Volkovich, V. L. Computational methods for the study of complex systems [Vychislitelnye metody issledovaniya slozhnykh sistem]. Moscow, Nauka, 1982, 287 p.

13. Order of JSC Russian Railways «Program of development of traffic management vertical on the basis of scientific and technical achievements and informatization» [Rasporiazheniye OAO «RZD» «Programma razvitiya verticali upravleniya dvizheniem na osnove nauchno-tekhnicheskikh dostizhenij i informatizatsii»]. No.1458r, approved on 09.06.2015.

14. Unified technological process of operation of the Eastern polygon [Yedinyj tehnologicheskij protsess raboty vostochnogo poligona], approved by the first Vice-President of JSC Russian Railways, dated 27.09.2016, No. 574.

15. Model technological process of operation of a polygon [Tipovoj tehnologicheskij protsess raboty poligona], approved by the order of JSC Russian Railways No. 2700r, dated 26.12.2016.

16. Zobnin, V. L., Panin, V. V., Prokofieva, E. S., Rubtsov, D. V. Model technology of transportation management at combined polygons [Tipovaja tehnologiya upravleniya perevozkami na objedinennykh poligonakh]. *Zheleznodorozhnyj Transport*, 2016, Iss. 11, pp. 7–14. ●



ПРОЕКТ ИНТЕРТРАН

Семинар по проекту «ИНТЕРТРАН» в рамках Азиатско-Тихоокеанской региональной ассамблеи Международного союза железных дорог был проведён по инициативе ОАО «РЖД» во Владивостоке в целях развития интермодальных перевозок на евразийском пространстве.

В мероприятии приняли участие представители железнодорожных компаний — членов Азиатско-Тихоокеанской региональной ассамблеи (АТРА) Международного союза железных дорог (ОАО «РЖД», АО «НК «КТЖ», Государственная корпорация «Китайские железные дороги», АО «УБЖД», Кореил), руководство международных организаций и ассоциаций (ЭСКАТО ООН, МСЖД, ФИАТА, КСТП), представители государственных органов Российской Федерации, а также ряда крупнейших операторских и логистических компаний региона.

Участникам семинара была представлена информационная технология организации перевозок, разработанная ОАО «РЖД», анализ тестовых перевозок с её использованием, а также рассмотрены дальнейшие шаги по использованию этой технологии в интермодальных перевозках из портов Китая, Южной Кореи и Японии по территории Российской Федерации, республик Беларусь, Казахстана и Монголии, назначением в страны Европейского Союза.

Демонстрация нового электронного сервиса оформления перевозки внешнеторговых грузов в рам-

ках проекта «ИНТЕРТРАН» состоялась 4 сентября 2019 года во Владивостокском морском торговом порту. Контейнерный поезд с товарами из Японии был отправлен из порта Владивостока в направлении Москвы с использованием исключительно электронных документов, что позволило сократить время оформления документов в порту на 4 суток.

Проект предусматривает эффективное цифровое взаимодействие между железной дорогой, морскими портами и контролирующими органами, создаёт стимулы для повышения уровня контейнеризации внутренних и внешнеторговых грузопотоков.

Внедренная информационная технология основана на существующей нормативно-правовой базе. С помощью нового информационно-логистического сервиса можно сопровождать перевозку контейнера любого экспедитора или оператора электронными данными на всём пути следования, обеспечить необходимой электронной информацией не только заинтересованных лиц, но и государственные контролирующие органы.

ОАО «РЖД» совместно с партнёрами планируют распространить эту универсальную информационную технологию интермодальных перевозок на все международные транспортные коридоры.

По материалам ОАО «РЖД»: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=184331> ●

INTERTRAN PROJECT

A seminar on the INTERTRAN project with the aim of developing intermodal transport across the Eurasian space has been held on the initiative of Russian Railways. The seminar took place in Vladivostok within the framework of the Asia-Pacific Regional Assembly of the International Union of Railways (UIC).

The event was attended by representatives of railway companies who are members of the Asia-Pacific Regional Assembly, including Russian Railways, KTZ NC JSC [Kazakhstan Railways], State Corporation Chinese Railways, Ulaanbaatar Railbus and CORAIL, the senior managers of international organisations and associations such as ESCATO UN, UIC, the International Federation of Freight Forwarders Associations (FIATA) and the Coordinating Council on Trans-Siberian Transportation, representatives of the state regulatory bodies of the Russian Federation, and some of the largest operating and logistics companies in the region.

Presented to the participants were the information technology of the transportation organisation developed by Russian Railways, the analysis of test shipments which used the technology and the further steps to applying this technology in intermodal shipping from ports in China, South Korea and Japan to the European Union via the Russian Federation, the Republics of Belarus, Kazakhstan and Mongolia.

A demonstration of the new electronic registration service for internationally traded goods within the framework of the INTERTRAN project took place on 4 September 2014 at the Vladivostok Sea Trade Port. A container train loaded with goods from Japan was dispatched from the port of Vladivostok to Moscow accompanied solely by electronic documents, which enabled the amount of time needed for the paperwork at the port to be reduced by 4 days.

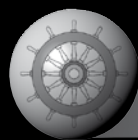
The project provides for effective digital cooperation between the railways, seaports and regulatory bodies and creates incentives to increase the level of containerisation in both domestic and international trade flows.

The introduced information technology is based on existing regulatory frameworks. With the help of a new information and logistics service, it has become possible for electronic data to accompany the shipment of a container owned by any forwarder or operator all the way along the entire route and provide the necessary electronic information not only to interested parties, but also to state regulators.

JSC Russian Railways and its partners plan to extend this universal intermodal transport information technology to all international transport corridors.

Based on the news of JSC Russian Railways: <https://eng.rzd.ru/en/9517/page/104070?id=4042> ●





Перспективы транспортного коридора «Север–Юг»

**Михаил ПРОКОФЬЕВ****Махмуджон ТОХИРОВ**

Прокофьев Михаил Николаевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Тохилов Махмуджон Муроджон угли – Российский университет транспорта, Москва, Россия/Ташкент, Узбекистан.*

Международные транспортные коридоры играют ведущую роль в формировании интегрированного глобального рынка транспортных услуг.

В этом контексте целью работы является изучение состояния международного транспортного коридора (далее – МТК) «Север–Юг», который связывает Индию, Иран, страны Персидского залива через страны Кавказа и Средней Азии с Россией и странами Европы. Дан краткий обзор научных публикаций по рассматриваемой тематике и констатируется общий вывод из мнений различных авторов: необходимо не только развитие инфраструктуры транспортного коридора, но и решение организационных, нормативно-правовых проблем и вопросов тарифного регулирования.

Основным преимуществом МТК «Север–Юг» является то, что большая часть маршрута проходит по суше и сам маршрут короче морского пути, что обеспечивает значительное ускорение доставки грузов.

В результате развития железнодорожной сети в Каспийском регионе и Центральной Азии на сегодня имеется несколько вариантов маршрута коридора. Подробно рассмотрен за-

падный маршрут в Иран через Азербайджан. Ожидается, что недостающий в маршруте железнодорожный участок Астара–Решт будет достроен в ближайшее время. По западному маршруту уже осуществлены тестовые отправки грузов из Индии в Россию (и обратно).

Приведены характеристики вариантов маршрута по дальности перевозки, сроков доставки и стоимости транспортировки груза. На сегодня стоимость перевозки даже по западной ветви МТК значительно превышает стоимость морской перевозки через Суэцкий канал. Ввиду этого и других факторов, снижающих эффективность и конкурентоспособность перевозок по МТК, предлагается в первую очередь организовать контейнерные перевозки на участке МТК между Россией, Азербайджаном и Ираном. Такие перевозки могут стать особенно востребованными для продовольственных товаров (в том числе скоропортящихся) по направлению с юга на север. Для этого предлагается организовать обращение по расписанию контейнерного поезда постоянной составности по маршруту Астара–Москва–Санкт-Петербург с применением новой транспортной технологии «Грузовой экспресс 2.0».

Ключевые слова: транспорт, железные дороги, международный транспортный коридор «Север–Юг», контейнерные перевозки, ускоренные грузовые поезда, грузовой экспресс 2.0, мультимодальные перевозки, развитие железнодорожной инфраструктуры.

*Информация об авторах:

Прокофьев Михаил Николаевич – кандидат технических наук, инженер сервисного отдела Центра мультимодальных транспортных систем Российского университета транспорта, Москва, Россия, mn.prok@yandex.ru.

Тохилов Махмуджон Муроджон угли – студент Российского университета транспорта, Москва, Россия/Ташкент, Узбекистан, mahmudjon.tohirov.99@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 19.03.2019, актуализирована 15.09.2019, принята к публикации 22.10.2019.

For the English text of the article please see p. 207.



Рис. 1. МТК «Север-Юг» и морской маршрут через Суэцкий канал (карта приведена только в целях иллюстрации).

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы достигнуты значительные успехи в развитии международного транспортного коридора (далее – МТК) «Север–Юг». Соглашение о международном транспортном коридоре «Север–Юг» было подписано между Россией, Ираном и Индией 12 сентября 2000 г. Позднее к Соглашению присоединились Белоруссия, Казахстан, Оман, Таджикистан, Азербайджан, Армения, Сирия, Болгария, Киргизия, Турция и Украина [1]. Основной маршрут МТК представлен на рис. 1 (для построения схемы использована карта Wikipedia.org¹). Тематике МТК «Север–Юг» посвящены публикации различных изданий [2–7].

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе А. Г. Кирилловой [2] рассмотрены аспекты развития международных транспортных коридоров на территории России.

¹ Международный транспортный коридор «Север–Юг» – стандартный маршрут. Википедия – свободная энциклопедия. [Электронный ресурс]: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Север-Юг#/media/File:North-South_Transport_Corridor_map_\(RU\).svg](https://ru.wikipedia.org/wiki/Север-Юг#/media/File:North-South_Transport_Corridor_map_(RU).svg). Доступ 22.10.2019.

Автор отмечает, что формирование МТК «Север–Юг» будет «способствовать развитию транзитных евроазиатских перевозок, что приведёт к усилению геостратегической и геополитической позиций стран-участниц, ...позволит снизить транспортные издержки вследствие сокращения сроков доставки грузов, дать значительный рост рынку транзитных перевозок, привлечь иранских и индийских инвесторов к инвестированию в совместные проекты». Отмечается успешный опыт организации первой тестовой отправки контейнеров по маршруту МТК «Север–Юг» из Индии в Россию через Иран и Азербайджан [2].

В работе И. Н. Дианова [3] с помощью метода имитационного моделирования проведён расчёт сроков и стоимости доставки 40-футового контейнера из порта Бендер-Аббас в Германию по вариантам маршрутов МТК «Север–Юг». Проанализировав полученные данные, автор заключает: «...при транспортировке сухопутными маршрутами целесообразнее использовать второй маршрут, при условии строительства линии Решт–Астара. Данный маршрут выигрывает как по срокам, так и по стоимости перевозки... [3]».





Рис. 2. Варианты маршрута МТК «Север–Юг» (карта приведена только в целях иллюстрации).

В работе [7] авторы подробно рассматривают инфраструктуру МТК: российские и иранские порты на Каспийском море; варианты маршрута МТК; порты бассейна Индийского океана. Рассмотрена инфраструктура перспективных стран-участниц проекта – Пакистана и Мьянмы. Они отмечают: «Для того чтобы МТК «Север–Юг» полноценно функционировал, необходимо из отдельных существующих элементов создать взаимосвязанную транспортно-логистическую систему, которая, в свою очередь, потребует транспортной и терминально-логистической инфраструктуры более высокого уровня» и описывают конкретные мероприятия по развитию инфраструктуры объектов в зоне прохождения МТК [7]. Основные выводы авторов: «транспортный коридор является амбициозным проектом, но более или менее стабильно функционирует пока только каспийский сегмент; для интеграции отдельных сегментов в единый маршрут необходимо создание новой и модернизация действующей транспортно-логистической инфраструктуры; следует... добиться по-

явления единого логистического оператора, разработать гибкую тарифную политику, решить широкий спектр нормативно-правовых вопросов» [7].

Схожие выводы сделаны в публикациях авторов из других стран [8–11]. В работах [9; 12] особенно подчёркивается необходимость участия в организации перевозок по МТК частных, небольших компаний, для которых на сегодня нет подходящих условий. В работе [13] акцент сделан на рассмотрении международной экономики и политических аспектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проект МТК «Север–Юг» развивается с 2000 года. В некоторой мере он уже функционирует, поскольку Иран достаточно активно отправляет свои товары в Россию. Тем не менее, МТК «Север–Юг» всё ещё далёк от полной реализации. Например, Индия по-прежнему осуществляет большую часть своего сообщения с Европой по длинному морскому маршруту, проходящему через Суэцкий канал.

Основным преимуществом МТК «Север—Юг» является то, что большая часть маршрута проходит по суше и сам маршрут короче морского пути, что обеспечивает значительное ускорение доставки грузов. Но до сих пор перевозка грузов железнодорожным транспортом по данному маршруту не организована таким образом, чтобы быть полностью удобной для грузоотправителей.

В последние годы проведена большая работа по созданию единой железнодорожной системы по маршруту МТК. Сегодня в Каспийском регионе и в Средней Азии имеется несколько вариантов маршрута МТК «Север—Юг» (рис. 1, 2; для построения схемы использована указанная карта Wikipedia.org).

Варианты маршрута МТК:

- № 1 Транскаспийский маршрут с перевозкой грузов морским транспортом по Каспийскому морю;

- № 2 Западная ветвь МТК «Север—Юг»: железнодорожный маршрут, обходящий Каспийское море с запада и проходящий через Азербайджан с пограничным переходом Астара (Азербайджан)—Астара (Иран) на территорию Ирана;

- № 3 Восточная ветвь МТК «Север—Юг»: железнодорожный маршрут, обходящий Каспийское море с востока, через Казахстан, Узбекистан и Туркменистан, с пограничным переходом Серахс (Туркменистан)—Серахс (Иран) и выходом на железнодорожную сеть Ирана;

- № 4 Новый восточный железнодорожный маршрут Актау (Казахстан)—Берекет (Туркменистан)—Этрек (Туркменистан)—Инче Бурун (Иран) через Казахстан и Туркменистан, открытый в 2014 году. В отличие от третьего варианта он не проходит через Узбекистан.

Иран в свою очередь интенсивно развивает железнодорожную инфраструктуру [14], строятся новые линии в рамках МТК.

В 2018 году компания ОАО «РЖД» начала реализацию крупного проекта по электрификации железнодорожной магистрали Ирана, Гармсар—Инче Бурун, что однозначно улучшит транспортную связь железнодорожной сети Ирана с портами на Каспийском море и погранпереходом с Туркменистаном [15].

В отношении развития морского транспорта Иран уделяет большое внимание развитию порта Чабахар [16]. В перспективе к этому порту будет проведена железнодорожная линия.

Железнодорожные перевозки по западной ветви МТК через Азербайджан предоставляют следующие преимущества:

- самый короткий маршрут до столицы Ирана (г. Тегеран) и до ключевого порта Бендер-Аббас. По сравнению с новым восточным маршрутом № 4 он короче на 1150 км (см. таблицу 1 далее);

- только одна страна на транзитном маршруте — Азербайджан;

- более оснащённая железнодорожная инфраструктура: имеется двухпутный электрифицированный участок через Махачкалу, Дербент и Баку. Восточный маршрут № 4 проходит исключительно по однопутным неэлектрифицированным магистралям;

- западная ветвь МТК проходит через более населённую местность с более развитой промышленностью и инфраструктурой (российские города Махачкала, Каспийск, Дербент и азербайджанские города Сумгаит и столица Баку). Тогда как новый восточный маршрут № 4 через Узень—Этрек проходит по преимущественно малонаселённой местности (на нём имеется два крупных города Атырау и Актау на территории Казахстана).

Железнодорожная инфраструктура западной ветви МТК «Север—Юг» в настоящее время находится в стадии строительства. Общая длина строящейся магистрали Астара (Азербайджан)—Решт (Иран)—Казвин (Иран) составляет около 340 км. Дорога проходит по местности со сложной топографией и требует большого количества мостов и туннелей.

В 2016 г. был построен железнодорожный переход через границу Азербайджан—Иран между станцией Астара на территории Азербайджана и станцией Астара на территории Ирана длиной 10 км. Осенью 2016 г. были осуществлены тестовые отправки контейнеров по маршруту МТК из Индии в Россию через Иран и Азербайджан [3]. Также в феврале 2018 г. из России в Иран прошёл



Таблица 1

Протяжённость, срок доставки и стоимость транспортировки груза по вариантам маршрута Мумбаи–Ворсино

Маршрут	Общая протяжённость, км	Протяжённость участков между ст. Астрахань I и ст. Бендер–Аббас, км	Срок доставки, сут.	Стоимость транспортировки, US\$/FEU ¹
№ 1. Транскаспийский маршрут МТК	6801	2983	25	4750
№ 2. Западная ветвь МТК через Азербайджан	6752	2934	23	4500
№ 3. Восточная ветвь МТК через Казахстан–Узбекистан–Туркменистан	7878	4060	30 ²	6400 ²
№ 4. Восточная ветвь МТК через Казахстан–Туркменистан	7899	4081	29 ²	5900 ²
№ 5. Морской маршрут до Санкт-Петербурга + авто	14397	–	37	3340
№ 6. Морской маршрут до Новороссийска + авто	9257	–	29	3170

Примечания: ¹ FEU – forty-foot equivalent unit, 40-футовый эквивалент. ² Данные по экспертной оценке.

тестовый грузовой поезд, состоящий из шести вагонов, гружённых древесиной и МДФ [17].

Транспортные эксперты отмечают, что в ходе тестовой отправки контейнеров по западной ветви МТК был выявлен ряд сложностей: невозможность оформления единого транспортного документа на весь маршрут перевозки; отсутствие прямого морского сообщения между портами Нава-Шева (порт на юге г. Мумбаи – прим. авт.) и Бендер-Аббас; для этого маршрута обязателен заход судов в порт Джабаль-Али, ОАЭ [3].

Хотя участок Астара (Азербайджан)–Астара (Иран) по своей протяжённости незначителен, его открытие имеет большое значение. В июле 2017 года две компании – Иранские железные дороги и Азербайджанские железные дороги – подписали соглашение о строительстве крупного железнодорожного терминала в иранской Астаре, через который Азербайджан намерен осуществлять транзит своих грузов. Азербайджанская сторона готова инвестировать в этот проект 60 млн долларов [18].

Железнодорожный участок Решт–Казвин уже запущен в эксплуатацию [19]. Оставшийся участок Астара (Иран)–Решт (Иран) планируется достроить в 2020 году [20].

Важнейший пункт зарождения грузопотоков для МТК «Север–Юг» – это

индийский порт Мумбаи, один из самых густонаселённых городов мира. Город расположен на побережье Аравийского моря и является одним из главных портов региона на перекрёстке многих международных маршрутов. Интерес, проявляемый Индией к проекту МТК «Север–Юг», будет способствовать его развитию.

В таблице 1 приведены подготовленные авторами примерные расчётные характеристики различных вариантов маршрута МТК «Север–Юг» при транспортировке гружёного 40-футового контейнера по маршруту Мумбаи–Ворсино (рис. 1). Ворсино – станция на 89-м км Киевского железнодорожного направления от Москвы, в районе которой расположен один из самых современных контейнерных терминалов России.

Протяжённость морского пути между портами Мумбаи и Бендер-Аббас 1976 км. Протяжённость участков между станциями Бендер-Аббас и Астрахань I по вариантам маршрута указана в третьем столбце таблицы 1. Участок маршрута Астрахань I–Ворсино был проложен через Волгоград–Саратов–Кочетовку в соответствии с маршрутом МТК и его протяжённость составляет 1842 км.

Для оценки стоимости транспортировки контейнера использовались данные компании АО «РЖД Логистика» [21], став-

ки автоперевозчиков² и морских перевозчиков^{3,4}. Оценка стоимости для маршрутов № 3 и № 4 имеет низкую достоверность. Маршруты № 5 и № 6 включают морскую перевозку и перевозку автотранспортом. При этом срок перевозки по маршруту № 6 взят со значительным запасом времени (минимальный срок около 25 суток).

Как видно из таблицы 1, стоимость перевозки даже по западной (ещё не достроенной) ветви МТК значительно превышает стоимость морской перевозки: 4500 \$ против 3170 \$. Но при этом обеспечивается снижение срока доставки контейнера до Ворсино примерно на 6 суток по сравнению с перевозкой через Суэцкий канал и Новороссийск и примерно на 14 суток по сравнению с маршрутом через Санкт-Петербург.

Срок доставки по МТК может быть снижен в процессе совершенствования организации перевозок и при росте объёмов перевозок грузов по маршруту. Также затраты могут быть сокращены при совершенствовании инфраструктуры железнодорожных линий, по которым проходит МТК (электрификация линий и другие мероприятия).

При перевозках по рассматриваемому маршруту необходима смена колеи с 1435 мм на 1520 мм при проследовании границы Иран–Азербайджан и с 1520 мм на 1435, если груз следует в страны Европы с колёй 1435 мм (например, на границе Белоруссия–Польша). Для сокращения финансовых и временных затрат на смену колеи предлагается использовать подвижной состав с раздвижными колёсными парами [22]. В качестве вариантов можно отметить систему Talgo-RD компании Talgo и польскую систему SUW 2000. Смены колеи при перевозке между Ираном и Россией не происходит при использовании Транскаспийского маршрута № 1, и по колее 1520 (1524) мм без перегрузки груз может

быть доставлен в страны, эксплуатирующие дороги этой колеи.

Так как перевозка контейнеров по МТК через Россию в страны Европы будет иметь ещё большую стоимость и срок доставки, чем до Ворсино (таблица 1), то необходимо уточнение приведённых расчётов для перевозок, например, в Германию, с учётом обозначенных мер по снижению сроков и стоимости доставки.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ

В свете вышесказанного, в качестве «первого шага» необходимо организовать контейнерные перевозки на участке МТК между Россией, Азербайджаном и Ираном, в том числе для грузов, предназначенных для российского рынка. Такие перевозки особенно востребованы для продовольственных грузов (в том числе скоропортящихся) по направлению с юга на север.

В настоящее время в России на направлении «Север–Юг» большинство грузов перевозится автотранспортом, и не организовано обращение ускоренных маршрутных контейнерных поездов. Поэтому предлагается рассмотреть возможность организации обращения по расписанию контейнерного поезда постоянной составности по маршруту Астара–Москва–Санкт-Петербург с применением новой транспортной технологии «Грузовой экспресс 2.0» [23; 24].

Технология «Грузовой экспресс 2.0» построена на следующих организационных принципах:

- обращение поездов по расписанию и без переформирования в пути следования;
- комплексность транспортных услуг;
- применение автоматизированной системы управления для обеспечения управления всеми составляющими перевозочного процесса;
- информация о маршрутах, расписании, схемах поездов и свободности грузовых мест должна быть доступна для всех заинтересованных лиц;
- организация продажи заранее предоставляемых грузовых мест (контейнеромест) в поездах устанавливаемой составности с помощью online-системы;
- поездные назначения, расписание и схемы (составность) поездов динамически

² Биржа автоперевозчиков «АвтоТрансИнфо». [Электронный ресурс]: <https://ati.su>. Доступ 22.10.2019.

³ Группа компаний «Марин Сервис Трейдинг». – 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.gkmst.ru/service5.html>. Доступ 22.10.2019.

⁴ Морские перевозки в Новороссийске // Компания Sea Gate Logistic. – 2019. [Электронный ресурс]: <https://sglogist.com/morskie-perevozki-v-novorossijske>. Доступ 22.10.2019.



определяются перевозчиком в соответствии с изменением спроса на грузоперевозки;

- подача состава на грузовой фронт терминально-складского комплекса может осуществляться поездным локомотивом;
- грузовые операции производятся без переформирования поездов благодаря тому, что длина грузовых фронтов соответствует длине составов.

Ускоренные контейнерные поезда будут останавливаться на опорных станциях для производства погрузо-разгрузочных работ с контейнерами без отцепки вагонов от состава. Благодаря этому удастся консолидировать грузопоток для стабильного обращения контейнерного поезда.

Перевозки с помощью такой технологии имеют хорошие шансы на коммерческий успех, а в перспективе маршрут может быть продлён по территории Ирана до порта Бендер-Аббас.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международный транспортный коридор «Север–Юг» [Электронный ресурс] // Министерство иностранных дел Российской Федерации. – 2018. [Электронный ресурс]: http://www.mid.ru/foreign_policy/economic_diplomacy/-/asset_publisher/VVbc10lflFVU/content/id/2510952. Доступ 22.10.2019.
2. Кириллова А. Г. Актуальные аспекты развития международных транспортных коридоров на территории России // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 2 (75). – С. 51–54.
3. Дианов И. Н. Анализ развития международного транспортного коридора «Север–Юг» // «Студенческий»: электрон. научн. журн. – 2018. – № 7 (27). [Электронный ресурс]: <https://sibac.info/journal/student/27/101690>. Доступ 22.10.2019.
4. Окупятся ли затраты на строительство МТК «Север–Юг»? // Российское Информационное Агентство Iran.ru. – 31.01.2018. [Электронный ресурс]: https://www.iran.ru/news/analytics/108379/Okupyatsya_li_zatraty_na_stroitelstvo_MTK_Sever_Yug. Доступ 22.10.2019.
5. Предпосылки созрели. Россия начинает новый этап развития международного транспортного коридора «Север–Юг» // АО «Издательский дом «Гудок». – 27.04.2016. – № 68 (25973). [Электронный ресурс]: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1335526&archive=2016.04.27>. Доступ 22.10.2019.
6. Щербанин Ю. А. Международный транспортный коридор «Север–Юг»: что получилось // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 6 (79). – С. 3–6.
7. Силицына А. С., Дэльз С. В., Галинт С. А. Мультимодальные перевозки в коридоре «Север–Юг» // Мир транспорта. – 2018. – Том 16. – № 3. – С. 178–189.
8. Singh, R. M. International North–South Transport Corridor: Re-energising India's Gateway to Eurasia. Institute for Defence Studies and Analyses, New Delhi, India, 2015, 8 p. [Электронный ресурс]: https://idsa.in/system/files/issuebrief/IB_msroy_180815.pdf/. Доступ 22.10.2019.
9. Sarma, H. Ch., Jafarova, V. International North–South Transportation Corridor: Azerbaijan at Crossroads. Azerbaijanian Journal of Economics and Social Studies, 2017, Vol. 4, No. 1, pp. 13–29.
10. Ziyadov, T. Azerbaijan as a regional hub in Central Eurasia: strategic assessment of Euro-Asian trade and transportation. Azerbaijan Diplomatic Academy, Baku, Azerbaijan, 2012, 288 p. [Электронный ресурс]: https://books.google.ru/books?id=48CHpkjeCcEC&printsec=frontcover&source=gbgs_ge_summary_r&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Доступ 22.10.2019.
11. Fedorenko, R. V. Modern Issues of Development of the Customs and Logistics Infrastructure of the International North–South Transport Corridor. In: Sustainable Growth and Development of Economic Systems: Contradictions in the Era of Digitalization and Globalization. Springer Nature Switzerland AG 2019, pp. 63–75.
12. Sarma, H. Ch. Turning the International North–South Corridor into a «Digital Corridor». Comparative Politics Russia, 2018, Vol. 9, Iss. 4, pp. 124–138.
13. Passi, R. Money Matters: Discussing the Economics of the INSTC. ORF occasional paper. April 2017, No. 112. Observer Research Foundation, 2017, 34 p. [Электронный ресурс]: <http://www.orfonline.org/research/money-matters-discussing-the-economics-of-the-instc/>. Доступ 22.10.2019.
14. Наджафи Г., Малекан Ю. Железная дорога Исламской Республики Иран: новые перспективы // Бюллетень ОСЖД. – 2017. – № 1–2. – С. 15–20.
15. ОАО «РЖД» в мировой транспортной системе. Сотрудничество со странами Ближнего Востока и Африки // ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]: http://inter.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5009&layer_id=3290&id=137. Доступ 22.10.2019.
16. Назари А. Порт Чабахар: юго-восточные ворота международных маршрутов Ирана // Бюллетень ОСЖД. – 2018. – № 1. – С. 6–9.
17. Тестовый поезд пушен из Азербайджана в Иран по железной дороге // Информационное агентство ТАСС. – 2018. [Электронный ресурс]: <https://tass.ru/ekonomika/4942072>. Доступ 22.10.2019.
18. Азербайджан инвестирует 60 миллионов в иранский проект // Информационное агентство РЖД-Партнёр.ру. – 2017. [Электронный ресурс]: <http://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/azerbaydzhan-investiruet-60-millionov-v-iranskiy-proekt/>. Доступ 22.10.2019.
19. Назари А. Казвин–Рашт: открыт ещё один железнодорожный участок международного транспортного коридора Север–Юг // Бюллетень ОСЖД. – 2019. – № 2. – С. 31–32.
20. Железная дорога между иранской Астарой и одноимённым городом в Азербайджане вступает в строй // Российское Информационное Агентство Iran.ru. – 15.01.2018. [Электронный ресурс]: http://www.iran.ru/news/economics/108154/Zheleznyaya_doroga_mezhdu_iranskoy_Astaroy_i_odnoimennym_gorodom_v_Azerbaydzhan_vstupayet_v_shtroy. Доступ 22.10.2019.
21. Международный транзит // АО «РЖД Логистика». – 2019. [Электронный ресурс]: https://www.rzdlog.ru/services/main/international_transit/. Доступ 22.10.2019.
22. Kaiser, I., Vinolas, J., Gómez del Pulgar, D., Galán, R. Contribution of variable gauge freight wheelsets to interoperability. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, IMechE, 2018, Vol. 233, Iss. 5, pp. 489–505.
23. Вакуленко С. П., Колин А. В., Прокофьев М. Н. Новая технология ускоренных грузовых перевозок железнодорожным транспортом // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 2 (51). – С. 47–49.
24. Прокофьев М. Н. Совершенствование технологии ускоренных грузовых перевозок железнодорожным транспортом / Дис... канд. техн. наук. – М., 2017. – 213 с.



Prospects for North–South Transport Corridor



Mikhail N. PROKOFIEV



Mahmudjon M. TOKHIROV

*Prokofiev, Mikhail N., Russian University of Transport, Moscow, Russia.
Tokhirov, Mahmudjon M., Russian University of Transport, Moscow, Russia / Tashkent, Uzbekistan*.*

ABSTRACT

International transport corridors play a leading role in shaping an integrated global transport services market.

In this context, the objective of the paper was to study the current state of North–South international transport corridor (hereinafter referred to as ITC), which connects India, Iran, the Gulf countries through the countries of the Caucasus and Central Asia with Russia and the countries of Europe. A brief review of scientific publications on the subject under consideration allows to draw a general conclusion from opinions of various authors: it is necessary not only to develop the transport corridor infrastructure, but also to solve organizational, regulatory and tariff issues.

The main advantage of North–South ITC is that most of the route passes by land and the route itself is shorter than the sea route, providing thus significant acceleration of cargo delivery.

As a result of development of the railway network in the Caspian region and Central Asia, today there are

several options for the ITC route. The western route to Iran through Azerbaijan was examined in more detail. It is expected that the missing railway section Astara–Rasht will be completed in the nearest future. Test shipments of goods from India to Russia (and vice versa) have already been carried out via western route.

The characteristics of the route options by transportation distance, delivery time and cost of cargo transportation are given. Today, cost of transportation along the western branch of ITC significantly exceeds cost of sea transportation through the Suez Canal. This and other factors, reducing the efficiency and competitiveness of transportation via ITC, it is proposed to first organize container transportation on ITC section between Russia, Azerbaijan, and Iran. Such transportations might be especially in demand for food products (including perishable goods) in direction from south to north. To this end, it is proposed to organize a scheduled container train service along Astara–Moscow–St. Petersburg route using new Freight Express 2.0 transportation technology.

Keywords: transport, railways, North–South international transport corridor, container transportation, expedited freight trains, Freight Express 2.0, multimodal transportation, development of railway infrastructure.

*Information about the authors:

Prokofiev, Mikhail N. – Ph.D. (Eng), Engineer of the Service Unit of the Centre for multimodal transport systems of Russian University of Transport, Moscow, Russia, mn.prok@yandex.ru.

Tokhirov, Mahmudjon M. – student of Russian University of Transport, Moscow, Russia / Tashkent, Uzbekistan, mahmudjon.tohirov.99@mail.ru.

Article received 19.03.2019, revised 15.09.2019, accepted 30.09.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 200.

Background. In recent years, significant successes have been achieved in development of North–South international transport corridor (hereinafter, ITC). An agreement on North–South International Transport Corridor was signed between Russia, Iran, and India on September 12, 2000. Later, Belarus, Kazakhstan, Oman, Tajikistan, Azerbaijan, Armenia, Syria, Bulgaria, Kyrgyzstan, Turkey, and Ukraine joined the Agreement [1]. The main route of ITC is shown in Pic. 1 (the map Wikipedia.org was used to build the scheme). The North–South ITC is considered in various research publications and media news [2–7].

Research overview

The work of Alevtina G. Kirillova [2] considers aspects of development of international transport corridors passing through the territory of Russia. The author notes that development of the North–South ITC will *«contribute to development of Euro-Asian transit transportation, which will lead to strengthening of the geostrategic and geopolitical*

positions of the participating countries,.. will allow to reduce transport costs due to reduction of cargo delivery time, give significant growth to the transit transport market, and attract Iranian and Indian investors to invest in joint projects». The work highlights the success of first test dispatch of containers along North–South ITC route from India to Russia via Iran and Azerbaijan [2].

The work of I. N. Dianov [3] contains calculations of timing and cost of delivery of a 40-foot container from the port of Bandar Abbas to Germany using North–South ITC route options based on the simulation method. After analyzing the data obtained, the author concluded: *«...when transporting by land routes, it is more expedient to use the second route provided that Rasht–Astara line is built. This route wins in terms of time and cost of transportation...»* [3].

In [7], the authors examine in detail the infrastructure of ITC: Russian and Iranian ports on the Caspian Sea; ITC route options; ports of the Indian Ocean basin; the infrastructure of the



Pic. 1. North–South ITC and sea route through the Suez Canal (scheme for illustrative purposes only).



Pic. 2. Options of North–South ITC (scheme for illustrative purposes only).

countries, Pakistan and Myanmar, whose participation in the project will be promising. The authors note that *«in order for the North–South ITC to fully function, it is necessary to create an interconnected transport and logistics system from separate existing elements; that, in turn, will require a higher level of transport and terminal and logistics infrastructure»* and describe specific measures to develop the infrastructure of facilities in the area of the ITC [7]. The article concludes that *«...transport corridor is an ambitious project, but so far only the Caspian segment operates in more or less stable way; to integrate individual segments into a single route, it is necessary to create a new and modernize the existing transport and logistics infrastructure; it is necessary to... achieve the emergence of a single logistics operator, develop a flexible tariff policy, solve a wide range of regulatory issues»* [7].

Similar conclusions were drawn in papers of the authors from some other countries

[8–11]. The works [9; 12] particularly focus on the necessity of participation in transportation along the ITC of private, small-scale companies, while currently there are no suitable conditions for that. The paper [13] focuses on consideration of international economics and political aspects.

Results.

North–South ITC project has been developing since 2000. To some extent, it is already operational since Iran is quite actively forwarding its goods to Russia. Nevertheless, North–South ITC is still far from complete implementation. For example, India continues to carry out most of its transport links with Europe along the long sea route passing through the Suez Canal.

The main advantage of North–South ITC is that most of the route passes by land and the route itself is shorter than the sea route, which



provides significant acceleration of cargo delivery. But so far, transportation of goods by rail along this route has not been organized in such manner as to be completely convenient for shippers.

In recent years, a lot of work has been done to create a single railway system along ITC route, and today there are several options for North–South ITC route in the Caspian region and Central Asia (Pics. 1, 2; the above-mentioned map from Wikipedia.org was used to construct the scheme).

ITC route options:

- 1. Trans-Caspian route, with transportation of goods by sea along the Caspian Sea;
- 2 Western branch of North–South ITC: a railway route bypassing the Caspian Sea from the west and passing through Azerbaijan and then by the border crossing Astara (Azerbaijan)—Astara (Iran) to Iran;
- 3. Eastern branch of North–South ITC: a railway route bypassing the Caspian Sea from the east through Kazakhstan, Uzbekistan and Turkmenistan, and then by the border crossing Serakhs (Turkmenistan)—Serakhs (Iran) accessing the Iranian railway network;
- 4. New eastern railway route Aktau (Kazakhstan)—Bereket (Turkmenistan)—Etrek (Turkmenistan)—Inche Burun (Iran) via Kazakhstan and Turkmenistan opened in 2014. As compared with option 3 it does not go through Uzbekistan.

Iran intensively develops its railway infrastructure [14], new railroads are being built within ITC area.

In 2018, JSC Russian Railways launched a large-scale project to electrify the Iranian railway, Garmsar–Inche Burun, which will improve transport links between the Iranian railway network and ports on the Caspian Sea and the border crossing with Turkmenistan [15].

Regarding development of sea transport Iran pays great attention to development of the port of Chabahar [16]. Railroad will be constructed towards that port in future.

Railway transportation along the western branch of ITC through Azerbaijan provides the following advantages:

- It is the shortest route to the capital of Iran (Tehran) and to the key port of Bender Abbas. Compared with the new eastern route 4, reduction in distance is about 1150 km (see Table 1 below).

- There is only a single country along the transit route, which is Azerbaijan.

- The railway infrastructure is more equipped. There is a double-track electrified section through Makhachkala, Derbent and Baku. The eastern route 4 runs exclusively along single-track non-electrified railway track.

- Western branch of ITC passes through a more populated area with a more developed industry and infrastructure (the Russian cities of Makhachkala, Kaspiysk, Derbent and Azerbaijani cities of Sumgayit and the capital city Baku). The new eastern route 4 through Uzen–Etrek passes through a predominantly sparsely populated area (while it passes two large cities of Atyrau and Aktau in the territory of Kazakhstan).

The railway infrastructure of the western branch of North–South ITC is currently under construction. The total length of the line under construction Astara (Azerbaijan)—Rasht (Iran)—Qazvin (Iran) is about 340 km. The railway passes through terrain with complex topography and requires construction of numerous bridges and tunnels.

In 2016, a railway crossing was built across Azerbaijan–Iran border between Astara station in the territory of Azerbaijan and Astara station in the territory of Iran with a length of 10 km. In the autumn of 2016, test shipments of containers along ITC route from India to Russia via Iran and Azerbaijan were carried out [3]. Also, in February 2018, a test freight train moved from Russia to Iran, consisting of six cars loaded with wood and MDF [17].

Transport experts note that during test dispatch of containers along the western branch of ITC, the following difficulties were identified: impossibility to issue a single transport document for the entire transportation route; absence of direct sea communication between the ports of Nava-Sheva (port in the south of Mumbai — *authors' note*) and Bandar Abbas; for such transportation, vessels must enter the port of Jabal-Ali, UAE [3].

Although Astara (Azerbaijan)—Astara (Iran) section is insignificant in length, its opening is of great importance. In July 2017, two companies, the Iranian Railways and the Azerbaijani Railways, signed an agreement on construction of a large railway terminal in Iranian Astara, through which Azerbaijan

Table 1

Length, delivery time and cost of cargo transportation according to the options of the route Mumbai–Vorsino

Route	Total length, km	Length of sections between Astrakhan I station and Bandar Abbas station, km	Delivery time, days	Cost of transportation, US\$/FEU ¹
1. Trans-Caspian route of ITC	6801	2983	25	4750
2. Western branch of ITC through Azerbaijan	6752	2934	23	4500
3. Eastern branch of ITC through Kazakhstan–Uzbekistan–Turkmenistan	7878	4060	30 ²	6400 ²
4. Eastern branch of ITC through Kazakhstan–Turkmenistan	7899	4081	29 ²	5900 ²
5. Sea route to St. Petersburg + road transport	14397	—	37	3340
6. Sea route to Novorossiysk + road transport	9257	—	29	3170

Notes: ¹ FEU – forty-foot equivalent unit. ² Data according to expert estimates.

intends to transit its cargoes in large quantities. The Azerbaijani side is ready to invest \$60 million in this project [18].

Rasht–Qazvin railway section has already been put into operation [19]. The remaining section Astara (Iran)–Rasht (Iran) is planned to be completed in 2020 [20].

The Indian port of Mumbai, one of the most densely populated cities in the world, is the most important point of origin of cargo flows for North–South ITC. The city is located on the coast of the Arabian Sea and is one of the main ports of the region located at the crossroads of many international routes. India’s interest in North–South ITC project will contribute to its development.

Table 1 shows the characteristics of the various options for North–South ITC route during transportation of a laden 40-foot container along Mumbai–Vorsino route (see Pic. 1). Vorsino is the station at Kiev railway direction located at 89 km distance from Moscow. One of the most modern container terminals in Russia is located in the station area.

The length of the sea route between the ports of Mumbai and Bandar Abbas is assumed to be 1976 km. The length of the sections between Bandar Abbas and Astrakhan I stations according to the route options is indicated in the third column of Table 1. Astrakhan I–Vorsino route section was laid through Volgograd–Saratov–Kochetovka in accordance with ITC route and its length is 1842 km.

To estimate the cost of transporting a container, we used the data of company JSC Russian Railways Logistics [21], rates of road

carriers*, and sea carriers**.***. The cost estimate for routes 3 and 4 has a low reliability. Routes 5 and 6 include sea transportation and road transportation. The transportation time with route 6 was taken with a considerable margin of time (the minimum period is about 25 days).

As can be seen from Table 1, the cost of transportation even along the western (not yet completed) branch of ITC significantly exceeds the cost of sea transportation: \$4500 versus \$3170. At the same time, delivery time of the container to Vorsino is reduced by about 6 days compared to sea transportation through the Suez Canal and Novorossiysk and by about 14 days compared with the route through St. Petersburg.

Delivery time via ITC can be reduced in the process of improving traffic organization, and with an increase in the volume of transportation of goods along the route. Also, costs can be reduced by improving the infrastructure of the railway lines through which ITC passes (electrification of lines and other measures).

When transporting along the considered route, a gauge change is required from 1435 mm

* AutoTransInfo Auto Carrier Exchange [Birzha avtoperevozhnikov «Avto TransInfo»] AutoTransInfo Auto Carrier Exchange, 2019. [Electronic resource]: <https://ati.su>. Last accessed 22.10.2019.

** Delivery by sea from any port in the world [Dostavka morskim transportom iz lyubogo porta mira]. Marine Service Trading Group of Companies, 2019. [Electronic resource]: <https://gkmst.ru/services/dostavka-morskim-transportom/>. Last accessed 22.10.2019.

*** Sea transportation in Novorossiysk [Morskie perevozki v Novorossiiske]. Sea Gate Logistic company, 2019. [Electronic resource]: <https://sglogist.com/morskie-perevozki-v-novorossiiske>. Last accessed 22.10.2019.





to 1520 mm when crossing Iran–Azerbaijan border and from 1520 mm to 1435 if cargo is transported to European countries with a gauge of 1435 mm (for example, on the border between Belarus and Poland). To reduce financial and time costs for changing the gauge, it is proposed to use rolling stock with gauge-changeable wheelsets [22], e.g. Talgo-RD system of Talgo company and the Polish SUW 2000 system. A gauge change between Iran and Russia is not needed for Trans-Caspian route 1, and cargo can be delivered along a gauge of 1520 (1524) mm to countries operating the railways of this gauge without cargo transshipment.

Since transportation of containers via ITC through Russia to European countries will have an even higher cost and delivery time than to Vorsino (Table 1), it is necessary to further develop the calculations in detail, e.g. regarding transportation to Germany, considering mentioned measures to reduce time and costs of haulage.

Suggestions

In light of the foregoing, as a «first step» it is necessary to organize container transportation on ITC section between Russia, Azerbaijan and Iran, including for goods intended for Russian domestic market. Such transportations are especially in demand for food cargo (including perishable goods) in the direction from south to north.

Currently, in Russia on North–South direction, most goods are transported by road

transport and handling of accelerated container block trains is not organized. Therefore, it is proposed to organize a scheduled container train service via Astara–Moscow–St. Petersburg route using new Freight Express 2.0 transport technology [23; 24].

Freight Express 2.0 technology is built on the following basis:

- circulation of trains on schedule and without marshalling and re-composition along the route;
- comprehensiveness of transport services;
- use of an automated control system to ensure control of all components of the transportation process;
- information on routes, timetables, train schemes and availability of cargo packages should be available to all interested parties;
- organization of sale of pre-provided packages (places for transported containers) in trains of established composition using an electronic online system;
- train assignments, timetables and schemes (composition) of trains are dynamically determined by the carrier in accordance with changes in demand for freight transportation;
- train delivery to the cargo loading line of the terminal-warehouse complex can be carried out by train locomotive;
- freight operations are carried out without marshalling of the train wagons thanks to the fact that the length of the cargo loading line corresponds to the length of trains.

Accelerated container trains will stop at the basic stations for loading and unloading operations with containers without uncoupling of wagons. Due to this, it will be possible to consolidate the cargo flow for stable handling of the container train.

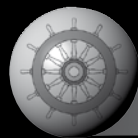
Transportation using this technology has good chances of commercial success, and in the future, the route can be extended through Iran to the port of Bandar Abbas.

REFERENCES

1. North–South International Transport Corridor [Mezhdunarodniy transportniy koridor «Sever–Yug»]. Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation, 2018. [Electronic resource]: http://www.mid.ru/foreign_policy/economic_diplomacy/-/asset_publisher/VVbcI0If1FVU/content/id/2510952. Last accessed 22.10.2019.
2. Kirillova, A. G. Actual aspects of development of international transport corridors in Russia [Aktualnie problem razvitiya mezhnunarodnykh transportnykh koridorov na territorii Rossii]. *Transport of the Russian Federation*, 2018, Iss. 2 (75), pp. 51–54.
3. Dianov, I. N. Analysis of development of the international transport corridor North–South [Analiz razvitiya mezhnunarodnoo transportnogo koridora «Sever–Yug»]. «Studencheskiy»: electronic scientific journal, 2018, Iss. 7 (27). [Electronic resource]: <https://sibac.info/journal/student/27/101690>. Last accessed 22.10.2019.
4. Will the construction costs of North–South ITC be paid off? [Okupyatsya li zatraty na stroitelstvo MTK «Sever–Yug»?]. Russian Information Agency Iran.ru, 31.01.2018. [Electronic resource]: https://www.iran.ru/news/analytics/108379/Okupyatsya_li_zatraty_na_stroitelstvo_MTK_Sever_Yug. Last accessed 22.10.2019.
5. The background is ripe. Russia begins a new stage in development of North–South International Transport Corridor [Predposylki sozreli. Rossiya nachinaet noviy etap razvitiya mezhnunarodnogo transportnogo koridora «Sever–Yug»]. JSC Publishing house «Gudok», 27.04.2016, Iss. 68 (25973). [Electronic resource]: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1335526&archive=2016.04.27>. Last accessed 22.10.2019.
6. Scherbanin, Yu. A. North–South International Transport Corridor: the results [Mezhdunarodnyi transportniy koridor «Sever–Yug»: chto poluchilos']. *Transport of the Russian Federation*, 2018, Iss. 6 (79), pp. 3–6.
7. Sinitsyna, A. S., Delz, S. V., Galyant, S. A. Multimodal Transportation in the Corridor «North–South». *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 3, pp. 178–189.
8. Singh, R. M. International North–South Transport Corridor: Re-energising India's Gateway to Eurasia. Institute for Defence Studies and Analyses, New Delhi, India, 2015, 8 p. [Electronic resource]: https://idsa.in/system/files/issuebrief/IB_msroy_180815.pdf. Last accessed 22.10.2019.
9. Sarma, H. Ch., Jafarova, V. International North–South Transportation Corridor: Azerbaijan at Crossroads. *Azerbaijani Journal of Economics and Social Studies*, 2017, Vol. 4, No. 1, pp. 13–29.
10. Ziyadov, T. Azerbaijan as a regional hub in Central Eurasia: strategic assessment of Euro-Asian trade and transportation. Azerbaijan Diplomatic Academy, Baku, Azerbaijan, 2012, 288 p. [Electronic resource]: https://books.google.ru/books?id=48CHpkjeCcEC&printsec=fr ontcover&source=gbs_ge_summary_r&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Last accessed 22.10.2019.

11. Fedorenko, R. V. Modern Issues of Development of the Customs and Logistics Infrastructure of the International North–South Transport Corridor. In: *Sustainable Growth and Development of Economic Systems: Contradictions in the Era of Digitalization and Globalization*. Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 63–75.
12. Sarma, H. Ch. Turning the International North–South Corridor into a «Digital Corridor». *Comparative Politics Russia*, 2018, Vol. 9, Iss. 4, pp. 124–138.
13. Passi, R. Money Matters: Discussing the Economics of the INSTC. ORF occasional paper. April 2017, No. 112. Observer Research Foundation, 2017, 34 p. [Electronic resource]: <http://www.orfonline.org/research/moneymatters-discussing-the-economics-of-the-instc/>. Last accessed 22.10.2019.
14. Najafi, G., Malechan, Yu. Railway of the Islamic Republic of Iran: new prospects. *OSJD Bulletin*, 2017, Iss. 1–2, pp. 15–20.
15. JSC Russian Railways in the global transport system. Cooperation with the countries of the Middle East and Africa [OAO «RZD» v mirovoy transportnoi sisteme. Sotrudnichestvo so stranami Blizhnego Vostoka i Afriki]. [Electronic resource]: http://inter.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5009&layer_id=3290&id=1370. Last accessed 22.10.2019.
16. Nazari, A. Port of Chabahar: south-eastern gates of international routes of Iran. *OSJD Bulletin*, 2018, Iss. 1, pp. 6–9.
17. A test train was launched from Azerbaijan to Iran by rail [Testoviy poezd pushchen iz Azerbajdzhana v Iran po zheleznoi doroge]. TASS Information agency, 2018. [Electronic resource]: <https://tass.ru/ekonomika/4942072>. Last accessed 22.10.2019.
18. Azerbaijan invests 60 million in the Iranian project [Azerbajdzhan investiruet 60 millionov v iranskiy projekt]. Russian Railways–Partner.ru news agency, 2017. [Electronic resource]: <http://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/azerbaydzhan-investiruet-60-millionov-v-iranskiy-proekt/>. Last accessed 22.10.2019.
19. Nazari, A. QuaHazar A. Qazvin–Rasht: one more railway section of international transport corridor North–South us inaugurated. *OSJD Bulletin*, 2019, Iss. 2, pp. 31–32.
20. The railway between Iranian Astara and the city of the same name in Azerbaijan, goes into operation [Zheleznaya doroga mezhd u iranskoi Astaroi i odnoimennym gorodom v Azerbajdzhane, vstupaet v stroi]. Russian Information Agency Iran.ru, 2018. [Electronic resource]: http://www.iran.ru/news/economics/108154/Zheleznaya_doroga_mezhd_u_iranskoy_Astaroy_i_odnoimennym_gorodom_v_Azerbaydzhan_e_vstupaet_v_stroy. Last accessed 22.10.2019.
21. International transit [Mezhdunarodniy transit]. JSC Russian Railways Logistics, 2019. [Electronic resource]: https://www.rzdlog.ru/services/main/international_transit/. Last accessed 22.10.2019.
22. Kaiser, I., Vinolas, J., Gómez del Pulgar, D., Galán, R. Contribution of variable gauge freight wheelsets to interoperability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, IMechE, 2018, Vol. 233, Iss. 5, pp. 489–505.
23. Vakulenko, S. P., Kolin, A. V., Prokofiev, M. N. New technology of accelerated cargo transportation by rail [Novaya tekhnologiya uskorennykh gruzovykh perevozok zheleznodorozhnym transportom]. *Transport of the Russian Federation*, 2014, Iss. 2 (51), pp. 47–49.
24. Prokofiev, M. N. Improving the technology of accelerated cargo transportation by rail. Ph.D. (Eng) thesis [Sovershenstvovanie tekhnologii uskorennykh gruzovykh perevozok zheleznodorozhnym transportom. Dis... kand. tekhnauk]. Moscow, 2017, 213 p.





Оптимизация месторасположения транспортно-логистических центров на примере Республики Казахстан



Рамазанова Арай — Казахский университет путей сообщения, Алматы, Республика Казахстан.*

Арай РАМАЗАНОВА

Транспортные связи во многом определяют потенциал взаимодействия страны внутри азиатского региона с субъектами рынка за его пределами. При этом транспортное обеспечение отдельных регионов, территорий, стран является сложной комплексной задачей, в основе решения которой лежат подходы к фундаментальным проблемам организации работы транспортной инфраструктуры.

Одной из ключевых задач организации работы транспортной системы Республики Казахстан является определение места расположения элементов её транспортно-логистической инфраструктуры. В настоящее время теоретико-методологические подходы к реше-

нию данной проблемы можно укрупнённо разделить на многокритериальный анализ и координатный (метод гравитации) подход.

Целью данной статьи является анализ возможности применения гравитационного и многокритериального методов для поиска оптимального места размещения транспортно-логистических центров на примере Республики Казахстан.

На их основе предпринята попытка нахождения мест оптимального расположения транспортно-логистических центров в Республике Казахстан. Наглядно показана ограниченность применения метода гравитации без его дополнения методом многокритериального анализа при решении этой задачи.

Ключевые слова: транспорт, транспортно-логистический центр, производственный потенциал, промышленность Казахстана, гравитационный метод, многокритериальный метод, координаты размещения инфраструктуры, СЭЗ «Хоргос – Восточные ворота», станция Алтынколь.

*Информация об авторе:

Рамазанова Арай – старший преподаватель кафедры организации движения, управления на транспорте и логистики Казахского университета путей сообщения, Алматы, Республика Казахстан, ayari.r@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 22.07.2019, принята к публикации 15.10.2019.

For the English text of the article please see p. 221.

ВВЕДЕНИЕ

Специфику экономики любого региона характеризуют качество и количество установленных и перспективных для развития транспортных и коммуникационных связей, определяющих потенциал взаимодействия региона с другими субъектами рынка как внутри него, так и за его пределами. Значение и роль этого фактора в современных условиях особенно важны, поскольку именно он определяет интенсивность и эффективность интеграционных процессов, обмена ресурсами, информацией и товарами. Более того, географическое положение региона выступает либо благоприятствующим, либо тормозящим условием развития этих процессов [1].

На сегодняшний день ведущие производственные сферы Республики Казахстан — металлургическая (чёрная и цветная металлургия), нефтехимическая и химическая промышленность, машиностроение и производство стройматериалов. Казахстан экспортирует свою продукцию более чем в 120 стран мира.

Особенностью промышленности Казахстана является её исключительная обеспеченность собственными запасами полезных ископаемых. На территории Республики сосредоточено более 50 % мировых запасов вольфрама, 21 % урана, 23 % хромосодержащих руд, 19 % свинца, 13 % цинка, 10 % меди и железа [2].

По данным «Межгосударственного статистического комитета СНГ» в 2018 году по сравнению с предыдущим годом промышленность Казахстана заметно улучшила свои позиции по нескольким показателям, а именно, по выработке электроэнергии, добыче нефти, природного газа, угля, производству продукции промышленности и сельского хозяйства.

В 2018 году добыча сырой нефти и природного газа в стоимостном выражении увеличилась на 4,8 % по сравнению с предыдущим годом. Кроме того, был отмечен рост стоимости произведённых нефтепродуктов на 8,8 %. В натуральном выражении добыча сырой нефти за год составила 77,5 млн тонн (рост на 6,3 %), газового конденсата — 12,8 млн тонн (сокращение на 3,1 %), а природного газа — 55,5 млрд м³ (прирост на 5 %). Нефтеперерабатывающие заводы произвели в 2018 году почти 4 млн тонн бензина (при-

рост на 29,8 %), 388,3 тыс. тонн керосина (прирост 29,4 %), 4,6 млн тонн газа (рост на 7,4 %) и 2,9 млн тонн мазута (сокращение на 12,9 %) [2].

Благоприятная обстановка в нефтегазовом секторе положительно повлияла на внешнеторговый оборот Республики Казахстан. За указанный период внешнеторговый оборот вырос на 20,5 % и составил 84,344 млрд долл. США, в том числе экспорт вырос на 26,4 %, что составило 54,673 млрд долл. США, а импорт — на 11,1 % (29,671 млрд долл. США).

Транспортное обеспечение Республики Казахстан является сложной комплексной задачей, в основе которой лежат фундаментальные проблемы организации работы транспортной инфраструктуры. Теме развития транспортных систем регионов и городов посвящено множество трудов отечественных и зарубежных учёных [3–6].

Одной из ключевых задач организации работы транспортных систем Республики Казахстан является определение мест расположения элементов транспортно-логистической инфраструктуры. В настоящее время теоретико-методологические подходы к их размещению можно укрупнённо разделить на многокритериальный анализ и координатный подход. В первом случае выбор наилучшего варианта осуществляется по совокупности рассматриваемых критериев, среди которых могут быть площадь и конфигурация участка под место размещения, степень развитости транспортной инфраструктуры на месте размещения, удалённость от потребителей, стоимость отчуждения земель и т.д. Во втором случае при решении задач размещения ключевое значение имеют аргументы геометрического характера (координаты). Данные подходы позволяют добиться высокого уровня точности исследования при их комбинировании на различных этапах решения задачи. Метод гравитации позволяет осуществить выбор наиболее предпочтительного региона на макроуровне решения задачи, а многокритериальный — осуществить выбор конкретной локации размещения элемента в рассматриваемом регионе.

Вопросу оптимального размещения логистических центров с применением различных методов посвящено множество трудов, например [5–8]. К примеру, А. Г. Ки-





Рис. 1. Промышленная карта Республики Казахстан.

риллова в своей работе [5] для поиска координат размещения контейнерных терминалов учитывала плотность контейнеропотоков, применяя метод «центр масс». Координаты центра масс находятся в таком случае с помощью интегралов. Точно также предполагается разумным в области D искать оптимальное расположение логистического центра с помощью интегральных формул (1)–(3):

$$x_0 = \frac{1}{M} \int_D x r(x, y) dx dy, \quad (1)$$

$$y_0 = \frac{1}{M} \int_D y r(x, y) dx dy, \quad (2)$$

где D «плотность контейнерных перевозок»,
а $M = \int_D r(x, y) dx dy$. (3)

Работа Г. И. Просветова [8] также посвящена решению задачи поиска места размещения логистических центров. Автор с помощью метода гравитации на координатной плоскости ОХУ определил расположение транспортной инфраструктуры относительно объёма поставки по нижеуказанным формулам (4; 5):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (4)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (5)$$

где w_i – объём поставки продукции;
 x_i, y_i – координаты объектов.

Преимущество данного метода заключается в оперативном получении результатов,

но при размещении транспортной инфраструктуры на микроуровне результаты вполне могут оказаться не практичными.

Целью данной статьи является анализ возможности применения гравитационного и многокритериального методов для поиска оптимального места размещения транспортно-логистических центров на примере Республики Казахстан.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ промышленного потенциала регионов Республики Казахстан позволяет условно разделить её на три производственных кластера, изображённых на рис. 1. Для определения центров тяготения грузопотоков изучим каждый из этих кластеров на предмет определения востребованности транспортного обеспечения в них. Под основными потребителями транспортных услуг будем понимать населённые пункты и промышленные предприятия. В качестве исходных данных будем оперировать численностью населения, количеством крупных предприятий в рассматриваемых регионах и координатной характеристикой рассматриваемых объектов. Данные характеристики напрямую отражают востребованность транспортной продукции в регионе.

Крупные промышленные центры Республики Казахстан расположены в основном в северных и северо-восточных областях. Отображённые координаты предполагаемого месторасположения транспортно-логистического центра (далее ТЛЦ) получены методом гравитации по кластерам (табл. 1). Основными исходными данными послужили статистические дан-

Результаты, полученные методом гравитации

Кластер	Полученные результаты	Название населённого пункта
1-кластер	597; 129	Капшагай
2-кластер	552; 232	Бозтал
3-кластер	297; 420	Мукур

ные предприятий Республики Казахстан с численностью работников не менее 500 чел., а также данные транспортной активности и плотности населения городов.

В первом кластере предполагаемое место расположения транспортно-логистического объекта находится на границе Алматинской и Жамбылской областей Республики, на расстоянии 77,5 км от города Алматы и 562,1 км от города Тараз в Южной части Казахстана — в городе Капшагай (с координатами 597; 129) Алматинской области (рис. 1).

Алматинская область является крупным промышленным и аграрным регионом Республики Казахстан. Кроме того, в области развиты машиностроение и металлообработка, к которым относятся расположенные здесь станкостроительный завод, завод тяжёлого машиностроения, заводы, выпускающие запасные части для нефтегазового оборудования, а также автомобильные и сельскохозяйственные машины. Наряду с вышеперечисленными сферами отраслей в регионе успешно развиваются мебельная, полиграфическая, фармацевтическая и пищевая промышленности. Население Алматинской области на 1 декабря 2018 года составляло более 2 млн чел. В проекте постановления правительства «Об утверждении долгосрочного плана формирования Алматинской агломерации до 2030 года» (далее план Алматы) планируется увеличить его численность до 5 млн чел. Одной из задач плана является развитие транспортной и логистической инфраструктуры региона.

Город Капшагай расположен в Алматинской области, население более 61 600 чел. Автомобильные и железнодорожные магистрали соединяют этот город с Китаем, Россией и странами Средней Азии. Имеющийся в области речной порт даёт возможность пассажирским судам и грузовым баржам осуществлять рейсы в КНР. Как железнодорожный узел по назначению и характеру выполняемой работы, Капшагай является станцией пятого класса.

Полученные методом гравитации результаты (597; 129) (рис. 1) не являются вполне удовлетворительными, так как данный метод является субоптимальным и не учитывает такие важные критерии, как степень развития транспортной инфраструктуры, численность населения, территориальное развитие, развитие производственных предприятий, наличие узловых станций, возможность обслуживания нескольких видов транспорта и т.д. Для их учёта с целью корректировки полученного ранее результата следует применить метод многокритериального анализа. В связи с этим, в рамках данного кластера рассмотрим варианты оптимального размещения ТЛЦ в Алматинской области. Отметим, что данные объекты расположены в радиусе не более 355 км от полученных методом гравитации координат.

1. Станция Жетыген расположена в радиусе 36 км от города Капшагай. По назначению и характеру выполняемой работы является узловой станцией (для линий Жетыген—Алматы, Жетыген—Алтынколь, Жетыген—Уштобе) четвёртого класса, имеет восемь приёмотправочных путей, из которых два пути работают по направлению Алтынколь. Станция играет особую роль в увеличении пропускной способности железнодорожной сети Казахстана и является одной из ключевых станций «моста», соединяющего Европу и Азию.

Согласно плану Алматы, для увеличения пропускной способности и пропуска транзитных поездов к 2021 году планируется построить обходную железнодорожную линию «Жетыген—Казыбек-Бек» (5 перегонов по 15 км, 4 отдельных пункта, 2 станции, 2 разъезда и 3—4 приёмотправочных пути длиной 1050 м) в обход узловой станции Алматы-1. По данному плану также предполагается в 2021–2024 гг. строительство линии BRT (Bus Rapid Transit — скоростной автобусный маршрут) с последующим переводом в линию легкорельсового транспорта (LRT) от проектируемого авто-



вокзала «Северный» в северном направлении вдоль автомобильной дороги областного значения «Алматы—Жетыген—Капшагайское водохранилище», связывающей город-центр агломерации с населёнными пунктами Илийского (поселок Отеген-батыр, станцию и село Жетыген с выходом на город Капшагай) и Талгарского (село Жаналык) районов [9]. Данная локация наиболее подходит для размещения транспортно-логистического центра, поскольку именно через станцию Жетыген проходят транзитные потоки в Европу.

2. Свободная экономическая зона «Хоргос — Восточные ворота» расположена в радиусе 355 км от города Капшагай. Один из важных крупных промышленных проектов в реализации комплексного плана формирования транспортно-логистической системы Республики Казахстан — СЭЗ «Хоргос — Восточные ворота» (далее СЭЗ «Хоргос»), которая включает в себя «Международный центр приграничного сотрудничества «Хоргос» (МЦПС «Хоргос»). Общая площадь СЭЗ «Хоргос» 5740 га, она состоит из трёх зон:

I — сухой порт (129 га);

II — логистическая зона (225 га);

III — промышленная зона (225 га) расположена в Панфиловском районе Алма-тинской области на казахско-китайской границе.

Все три зоны связывает автомобильная магистраль «Западная Европа—Западный Китай» общей протяжённостью 8445 км, из которых 2787 км проходят по территории Республики Казахстан. Данный коридор играет важную роль в повышении транзитного потенциала всего Евразийского региона, сокращая время доставки товаров из Китая в Европу и являясь одним из первых важных проектов в возрождении «Нового шёлкового пути». На территории сухого порта СЭЗ «Хоргос» расположена приграничная станция Алтынколь. По характеру работы относится к внеклассной станции. Протяжённость пути от ст. Жетыген до ст. Алтынколь — 293 км. Для выполнения всего комплекса работ по перевозкам на станции имеются три приёмootправочных парка, соединительные пути, три перегрузочных места, вытяжные пути и подъездные пути. Основной работой станции Алтынколь является перевалка контейнеров с широкой (1520 мм) колеи на узкую (1435 мм) и наобо-

рот. На сегодняшний день перерабатывающая способность станции составляет более 1889 ДФЭ — в среднем 37 поездов в сутки, в год около 14000 поездов. Предусмотрено проведение работ, которые существенно ускорят формирование и расформирование прибывающих и отправляемых поездов и послужат беспрепятственному приёму и отправлению поездов на станции Алтынколь:

- строительство немеханизированной горки малой мощности и 12 путей горочного парка «Г» колеи 1520 мм;

- строительство предгорочного парка с 5 путями по колее 1520 мм, дополнительно не менее 5 приёмootправочных путей по колее 1435 мм;

- строительство тупика для отстоя пассажирских вагонов, что создаст благоприятные условия, за счёт высвобождения станционных путей для производства маневровых работ станции;

- строительство аппарелей, которое даст возможность осуществлять перегруз автотехники;

- строительство повышенного пути для погрузки и выгрузки местных грузов агропромышленного комплекса (кукуруза, пшеница, крахмал и т.д.), а также угля.

СЭЗ «Хоргос» имеет важное значение для наращивания транспортно-транзитного потенциала Республики Казахстан. Железнодорожная и автомобильная магистрали на территории СЭЗ «Хоргос» важны и для реализации глобальной концепции «Новый шёлковый путь». Выгодное местоположение СЭЗ «Хоргос», наличие нескольких зон, приграничной станции, где ведутся работы по перевалке грузов с узкой колеи на широкую, возможность применения инновационных технологий, создание производственных предприятий (машиностроение, пищевая, химическая и лёгкая промышленность), упрощение таможенных процедур, введение принципа «одного окна», развитие интермодальных и мультимодальных перевозок, возможность выхода на морские порты «Ақтау» и «Курык» являются приоритетным фактором. Также на территории СЭЗ «Хоргос» осуществляется строительство крупного ТЛЦ класса «А» — «Verona Capital», который занимает 9,5 га. На территории ТЛЦ запланировано строительство сухих складов площадью 24 694 м² и складов с регулируе-

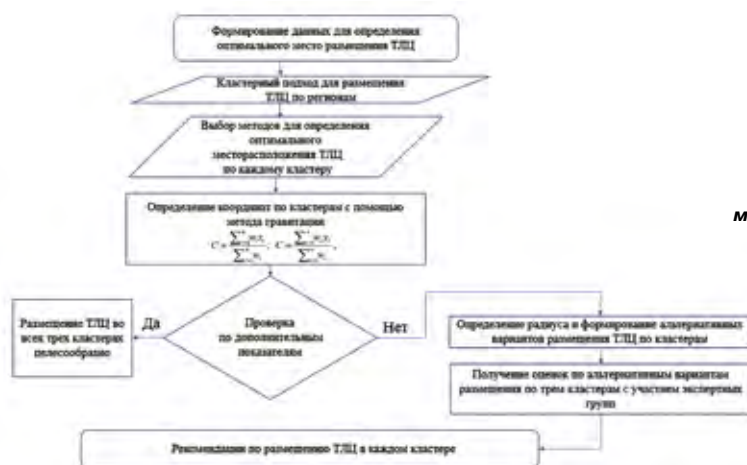


Рис. 2. Алгоритм поиска оптимального месторасположения ТЛЦ.

мым температурным режимом площадью 14 516 м².

Города в северной и центральной части страны включены во второй кластер (рис. 1). В рассматриваемой части Республики Казахстан предполагаемое место размещения ТЛЦ методом гравитации – Ерейментауский район, село Бозтал (с координатами 552; 232), расположенное в Акмолинской области на расстоянии 169 км от города Нур-Султан, с населением около 5 тыс. чел. Как показывают результаты анализа в отношении данного кластера, учитывая малую численность населения, отсутствие железнодорожной станции и изношенность автомобильных дорог, размещение ТЛЦ в селе Бозтал нецелесообразно.

Ввиду этого предлагаем рассмотреть город Нур-Султан, который расположен в радиусе 172 км от села Бозтал, так как комбинация методов дает возможность поиска оптимального варианта размещения ТЛЦ в данном кластере. В рамках государственной программы «Нурлы жол» с 2015 года в Акмолинской области в 12 км от города Нур-Султан функционирует ТЛЦ класса «А+», первый в стране, площадью около 40 000 м², с грузовым контейнерным терминалом на 7 га, с удобной транспортной автожелезнодорожной развязкой, наличием подъездного пути протяженностью 5 км. Складские комплексы, где функционируют сухой и климатические склады, оборудованы с учетом инновационных технологий. Преимуществом складских комплексов являются: способность обработать более 300 000 т грузов в год, пропускная способность погрузочно-разгрузочной зоны составляет около

1000 паллет в день, вместимость контейнерного терминала до 4000 крупнотоннажных контейнеров (возможность обработки более 1 000 000 тонн груза в год). Помимо вышеперечисленного, центр включает зоны таможенного контроля и дистрибьюторский центр. ТЛЦ расположен вдоль республиканской магистрали Нур-Султан–Караганда недалеко от железнодорожной станции Сороковая (1,6 км). Станция Сороковая по характеру работы является участковой и относится к первому классу. Количество путей на станции – 20, имеется один приемоотправочный парк. Грузооборот станции за 4 месяца 2018 года составил около 3000 вагонов.

В третьем кластере предполагаемым местом для размещения ТЛЦ методом гравитации определен сельский округ Мукур (с координатами 297; 420) (рис. 1) в Кызылкогинском районе Атырауской области (Атырауская область расположена на западе страны и извне граничит с Астраханской областью России). Ведущие отрасли области – топливная, химическая и рыбная промышленности. Область как нефтяной регион Республики Казахстан занимает третье место в стране по объему ВРП и первое место по показателю ВРП на душу населения. По данным министерства национальной экономики Республики Казахстан в 2018 году, благодаря увеличению объемов добычи сырой нефти, индекс промышленного производства составил на 23,8 % больше по сравнению с аналогичным периодом 2017 года.

Село Мукур расположено в 235 км от областного центра. Население села около 7 тыс. чел. Мукур относится к промежуточной станций четвертого класса, имеет



4 приёмотправочных пути. Автомобильная дорога, соединяющая село с областным центром, находится в неудовлетворительном состоянии. Учитывая изношенность автомобильной дороги и железнодорожной линии, малую численность населения, размещать ТЛЦ на территории села Мукур нецелесообразно. И в данном кластере применение метода гравитации не дало положительных практических результатов для размещения ТЛЦ.

Исходя из полученных результатов, в данном кластере, как и предыдущих, практически использовать комбинацию метода гравитации и многокритериального анализа для определения места размещения ТЛЦ (рис. 2). В данном случае по тем же критериям, которые учитывались для первого и второго кластеров, предполагаемым местом для размещения ТЛЦ будет город Атырау, расположенный в радиусе 234 км от села Мукур.

По данным переписи населения в 2018 году численность населения города составила 268 840 чел. Станция Атырау по характеру работы является участковой и относится к первому классу. На станции имеется 9 приёмотправочных путей, 2 парка (сортировочный и приёмотправочный), сортировочный парк состоит из 6 путей, имеется 13 подъездных путей. По территории проходит транзитный коридор Атырау—Астрахань, позволяющий осуществлять пропуск автотранспорта с нагрузкой 13 тонн на ось, протяжённостью 366 км. Перевозка грузов по автомагистрали идёт в черноморские порты, на Кавказ, а дальше в Европу, также коридор является частью пути «Западная Европа—Западный Китай». К 2020 году планируется увеличить доходы от транзитных перевозок до 5 млрд долл. США в год, в связи с этим возникает потребность в складских помещениях площадью около 3 млн м².

ВЫВОДЫ

Исходя из вышеизложенного, при строительстве ТЛЦ в регионах Республики Казахстан необходимо учитывать такие важные аспекты, как степень развитости транспортной и сервисной инфраструктуры и транспортного обеспечения, плотность населения, перемещение экспортных грузов, пропускную способность станции (приграничных станций) и т.д.

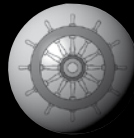
Анализируя полученные данные по трём кластерам, можно сделать вывод, что использование метода гравитации позволяет достаточно оперативно получить укрупнённый приемлемый результат на макроуровне, который в дальнейшем может подвергаться определённой корректировке. Спецификой применения метода гравитации является тот факт, что результаты не учитывают в полной мере дополнительные показатели, такие, как территориальное развитие, объём потребления транспортной продукции, степень развития транспортной инфраструктуры и т.д. В частности, ни одна из найденных локаций по трём кластерам не может быть однозначно использована для размещения ТЛЦ, так как находится на значительном удалении от всех рассматриваемых потребителей транспортных услуг.

Более точный результат может быть получен при корректировке и использовании метода многокритериального анализа для всех трёх кластеров.

Таким образом, для фактического применения определения оптимального месторасположения ТЛЦ рекомендуется использовать комбинацию методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухова Л. Ф. Региональный аспект оценки эффективности производственной инфраструктуры (в порядке вопроса). — Алматы, 2003. — С. 56–63.
2. Промышленность Казахстана. [Электронный ресурс]: <http://www.webecconomy.ru/index.php?page=cat&cat=mc&mc=164&type=news&newsid=1471>. Доступ 20.04.2019.
3. Рахмангулов А. Н. Методологические основы организации функционирования железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем / Дис... док. техн. наук. — М., 2013. — 373 с.
4. Багинова В. В. Теоретико-концептуальные основы организации региональной транспортной системы (на примере Республики Бурятия) / Дис... док. техн. наук. — М., 2004. — 295 с.
5. Кириллова А. Г. Методология организации контейнерных и контейнерных перевозок в мультимодальных автомобильно-железнодорожных сообщениях / Дис... док. техн. наук. — М., 2010. — 335 с.
6. Кузьмин Д. В. Организация региональной сети контейнерных терминалов / Дис... канд. техн. наук. — М., 2015. — 166 с.
7. Багинов А. В. Современные подходы к размещению объектов транспортно-логистической инфраструктуры // Мир транспорта. — 2018. — № 3. — С. 166–177.
8. Просветов Г. И. Математические методы в логистике. Задачи и решения. — 2-е изд., доп. — М.: Альфа-Пресс, 2009. — 304 с.
9. План мероприятий на 2018–2024 годы по реализации Долгосрочного плана формирования Алматинской агломерации до 2030 года. [Электронный ресурс]: <https://pandia.ru/text/80/688/33173.php>. Доступ 20.04.2019. ●



Optimization of Location of Transport and Logistics Centers at the Example of the Republic of Kazakhstan



Ramazanova, Aray, Kazakh University of Transport Communications, Almaty, Republic of Kazakhstan.*

Aray RAMAZANOVA

ABSTRACT

Transport links largely determine the potential of a country located within the Asian region to interact with market entities beyond region's borders. Meanwhile, transportation logistics of individual regions, territories, and countries is a complex integrated problem, whose solution is based on the approaches to fundamentals of organisation of the operation of transport infrastructure.

One of the key tasks in organizing the work of the transport system of the Republic of Kazakhstan is to determine the location of the elements of its transport and logistics infrastructure. At present, theoretical and methodological approaches to solving this problem can be divided into multicriteria

analysis and coordinate (gravitational method) approach.

The objective of this article is to analyze the possibility of using gravitational and multicriteria methods to find the optimal location for transport and logistics centers using the example of the Republic of Kazakhstan.

Based on that the research was intended as an attempt to find optimal location of transport and logistics centers in the Republic of Kazakhstan. It was clearly shown that the use of the gravitational method has constraints if not supplemented by the use of the multicriteria analysis method when solving the problem of choosing the optimal location of the transport and logistics infrastructure at the example of the Republic of Kazakhstan.

Keywords: *transport, transport and logistics center, production potential, Kazakhstan industry, gravitational method, multicriteria method, infrastructure location coordinates, Khorgos – Vostochnye Vorota FEZ, Altynkol station.*

*Information about the author:

Ramazanova Aray – Senior Lecturer of the Department of Traffic Management, Transport Management and Logistics of Kazakh University of Transport Communications, Almaty, Republic of Kazakhstan, ayari.r@mail.ru.

Article received 22.07.2019, accepted 15.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 214.

Introduction. The features of the economics of any region are characterized by the quality and quantity of transport and communication links, both established and promising for the regional development, those links determine the potential for interaction of the region with other market entities both inside and outside it. The significance and the role of this factor under modern conditions are particularly important, since this factor determines intensity and effectiveness of integration processes, of resources, information, and goods exchange processes. Moreover, the geographical position of the region is either a favorable or an inhibitory condition for development of those processes [1].

Today, leading manufacturing spheres of the Republic of Kazakhstan are metallurgical (ferrous and non-ferrous metallurgy), petrochemical and chemical industries, mechanical engineering and production of building materials. Kazakhstan exports its products to more than 120 countries.

A feature of the industry of Kazakhstan is that the country is exceptionally endowed with its own mineral reserves. More than 50 % of the world's reserves of tungsten, 21 % of the reserves of uranium, 23 % of chromium ores, 19 % of lead, 13 % of zinc, 10 % of copper and iron are concentrated in the territory of the Republic of Kazakhstan [2].

According to CIS Interstate Statistical Committee, in 2018 compared with the previous year, the industry of Kazakhstan had significantly improved its position according to several indicators, regarding, namely, the electricity production, oil, natural gas, and coal extraction, manufacturing of industrial products, and agriculture production.

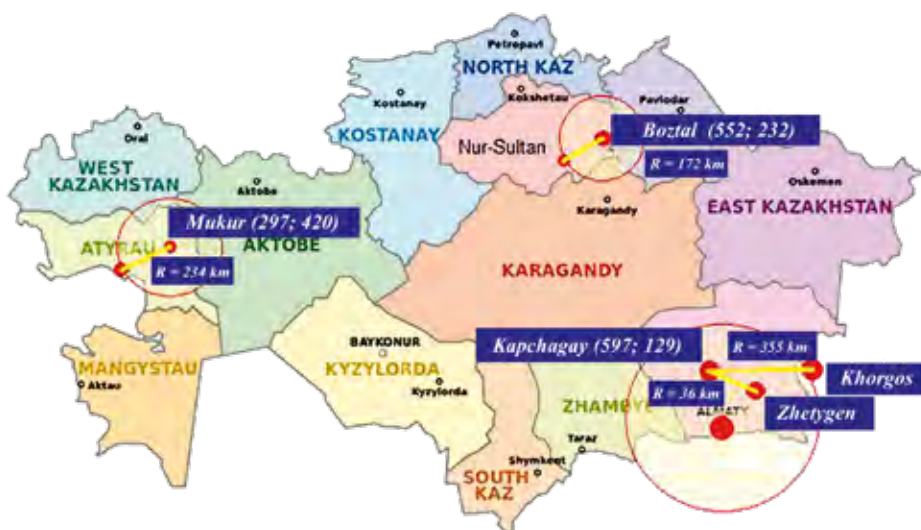
In 2018, crude oil and natural gas production in value terms increased by 4,8 % compared to the previous year. Besides, there was an increase in the cost of produced oil products by 8,8 %. In physical terms, yearly crude oil production amounted to 77,5 million tons (an increase by 6,3 %), gas condensate to 12,8 million tons (a decrease by 3,1 %), and natural gas to 55,5 billion m³ (an increase by 5 %). In 2018, oil refineries produced almost 4 million tons of gasoline (an increase by 29,8 %), 388,3 thousand tons of kerosene (an increase by 29,4 %), 4,6 million tons of gas (an increase by 7,4 %), and 2,9 million tons of fuel oil (a decrease by 12,9 %) [2].

The favorable situation in the oil and gas sector had a positive impact on the foreign trade turnover of the Republic of Kazakhstan. Over the specified period, foreign trade turnover grew by 20,5 % and amounted to 84,344 billion US dollars. The export grew by 26,4 %, which amounted to 54,673 billion US dollars, and import grew by 11,1 % (29,671 billion US dollars).

Transport logistics of the Republic of Kazakhstan is a comprehensive complex task, which is based on the solution of fundamental problems of organisation of the operation of transport infrastructure. The development of transport systems in regions and cities has been the subject of many works by domestic and foreign scientists [3–6].

One of the key tasks in organizing the work of the transport systems of the Republic of Kazakhstan is the problem of determining the location of the elements of transport and logistics infrastructure. Currently, theoretical and methodological approaches to their placement can be divided into a multi-criteria analysis and coordinate approach. In the first case, the best option is selected based on totality of the considered criteria, among which may be area and configuration of the site of a probable location, degree of development of transport infrastructure at the location, remoteness from consumers, cost of land acquisition, etc. In the second case, when solving location problems, geometric arguments (coordinates) are of key importance. These approaches allow achieving a high level of research accuracy when combining them at various stages of solving the problem. The coordinate method allows to select the most preferred region at the macro level for solving the problem, and the multicriteria method allows to select a specific location for placing the element within the region in question.

A lot of works have been devoted to the use of coordinate methods in solving the placement problem [5–8]. For example, A. G. Kirillova in her work [5] considered density of container flows using the «center of mass» method to search for the coordinates of container terminals. The coordinates of the center of mass are then found using the integrals. In the same way, it is assumed that it is reasonable in region D to search for the optimal location of the logistics center using the integral formulas (1)–(3):



Pic. 1. Industrial map of the Republic of Kazakhstan.

Table 1

Results obtained using gravitational method

Cluster	Obtained results	Settlement name
1 st cluster	597; 129	Kapchagay
2 nd cluster	552; 232	Boztal
3 rd cluster	297; 420	Mukur

$$x_0 = \frac{1}{M} \int_D x r(x, y) dx dy; \tag{1}$$

$$y_0 = \frac{1}{M} \int_D y r(x, y) dx dy, \tag{2}$$

where D is density of container transportation, and

$$M = \int_D r(x, y) dx dy. \tag{3}$$

The work of G. I. Prosvetov [8] is also devoted to solving the problem of finding the location of logistics centers. He, using the gravitational method on OXY coordinate plane, determined the location of the transport infrastructure relative to the supply volume using the formulas below (4; 5):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}; \tag{4}$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \tag{5}$$

where w_i is the volume of products delivery;
 x_i, y_i are coordinates of facilities.

The advantage of this method is rapid receipt of results, but when placing the transport infrastructure at the micro level, the results may turn to be impractical.

Objective. The *objective* of the article is to analyze applicability of gravitational and multicriteria *methods* for assessing the optimal placement of transport and logistics centers at the example of the Republic of Kazakhstan.

Results.

The analysis of the industrial potential of the regions of the Republic of Kazakhstan allows us to conditionally divide the country into three production clusters, shown in Pic. 1. To determine the centers of gravity of cargo flows, we will study each of these clusters to determine demand for transport logistics in them. The main consumers of transport services shall mean settlements and industrial enterprises. As initial data, we will operate the population size, the number of large enterprises in the regions under consideration, and the coordinate characteristics of the facilities under consideration. These characteristics directly reflect demand for transportation services and products in the region.



Large industrial centers of Kazakhstan are located mainly in the northern and northeastern areas of the country. The further displayed coordinates of the estimated location of respective transport and logistics centers (hereinafter TLC) were obtained using the gravitational method (Table 1). The basic input data were statistical data of large enterprises of the Republic of Kazakhstan with the number of employees of at least 500 people. Also data on transport activity and city population density were used.

In the first cluster, the estimated location of the transport and logistics facility is located on the border of Almaty and Zhambyl regions of the Republic, at a distance of 77,5 km from the city of Almaty and 562,1 km from the city of Taraz in the southern part of Kazakhstan, that is in the city of Kapchagay (with coordinates 597; 129) of Almaty region (Pic. 1).

Almaty region is a large industrial and agricultural region of Kazakhstan. Besides, mechanical engineering and metalworking industries are developed in the region, which include a machine-tool plant, a heavy machine-building plant, factories that produce spare parts for oil and gas equipment, as well as automobile and agricultural machines. Along with the above sectors of the industries there are furniture, printing, pharmaceutical and food industries in the region which are also successfully developing. The population of Almaty region as of December 1, 2018 amounted to more than 2 million people. According to the draft government decree «On approval of the long-term plan for development of Almaty agglomeration until 2030» (hereinafter referred to as Almaty plan) it is planned to increase its number to 5 million people. One of the objectives of the Almaty plan is to develop the transport and logistics infrastructure of the region.

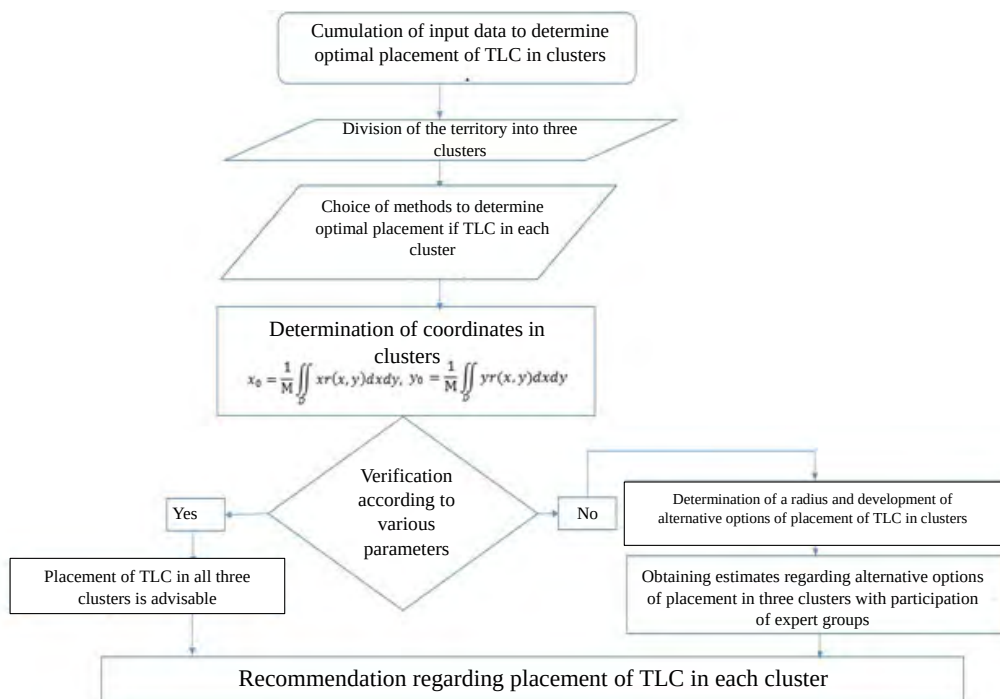
The city of Kapchagay is in Almaty region, and its population density is more than 61643 people. Highways and railways connect this city with China, Russia and the countries of Central Asia. The river port in the region allows passenger ships and cargo barges to make voyages to China. As a railway junction and according to the purpose and nature of the operations performed, Kapchagay is a fifth-class station.

The results obtained by gravitational method (597; 129) (Pic.1) are not quite satisfactory, since this method is suboptimal, and does not take into account important criteria such as the degree of development of transport infrastructure, population, territorial development, development of production enterprises, presence of hub stations, and possibility of servicing several types of transport, etc. To take them into account in order to adjust the result obtained earlier, the multicriteria analysis method should be applied.

In this regard, within the framework of this cluster, we will consider options for the optimal placement of TLC in Almaty region. Let us note that the objects that will further be considered are located within a radius of not more than 355 km from the results obtained by gravitational method.

1. Zhetygen station. According to the purpose and nature of the operations performed, it is a junction station (for Zhetygen–Almaty, Zhetygen–Altynkol, Zhetygen–Ushtobe lines) of the fourth class, has eight receiving-departure tracks, of which two tracks operate in the direction of Altynkol. The station plays a special role in increasing the capacity of the railway network of Kazakhstan and is one of the key stations of the «bridge» connecting Europe and Asia.

According to Almaty plan, by 2021, it is planned to build Zhetygen–Kazbek–Bek railway bypass line (5 hauls of 15 km each, 4 separate points, 2 stations, 2 double-track sections and 3–4 receiving-departure tracks with a length of 1050 m) bypassing Almaty-1 junction station to increase the throughput capacity and transit train capacity. According to this plan, it is also expected in 2021–2024 to construct BRT (Bus Rapid Transit) line with its subsequent transformation into the light rail line (LRT) from the projected North bus station in the north direction along the regional highway Almaty–Zhetygen–Kapchagay Reservoir, linking the agglomeration city center with Iliysky district settlements (village Otegen-Batyr, station and village Zhetygen with access to the city of Kapchagay) and Talgar district (village Zhanalyk) [9]. This location is most suitable for hosting a transport and logistics center, since transit flows to Europe pass through Zhetygen station.



Pic. 2. The algorithm for search for optimal location of TLC.

2. Free Economic Zone (FEZ) «Khorgos – Vostochnye Vorota [Eastern Gates]». One of the important large industrial projects in implementation of the comprehensive plan for formation of the transport and logistics system of the Republic of Kazakhstan is «Khorgos – Vostochnye Vorota FEZ» (hereinafter Khorgos FEZ), which includes the Khorgos International Center for Cross-Border Cooperation (ICBC Khorgos)) The total area of Khorgos FEZ is 5740 hectares, it consists of three zones:

I – dry port (129 ha);

II – logistics zone (225 ha);

III – industrial zone (225 ha), and is located in Panfilov district of Almaty region on Kazakh-Chinese border.

All three zones are connected by the «Western Europe–Western China» highway with a total length of 8445 km, of which 2787 km pass through Kazakhstan. This corridor plays an important role in increasing the transit potential of the entire Eurasian region, reducing time of delivery of goods from China to Europe and being one of the first important projects in revival of the New Silk Road. The territory of the dry port of Khorgos FEZ

comprises a border station Altynkol. By the nature of the operations it belongs to the extra-class station. The length of the track from Zhetygen station to Altynkol station is 293 km. To complete the entire range of transportation operations at the station, there are three receiving-departure parks, connecting tracks, three transshipment sites, exhaust tracks and access roads. The main task of Altynkol station is transshipment of containers from a wide (1520 mm) gauge to a narrow (1435 mm) gauge and vice versa. To date, processing capacity of the station is more than 1889 TEU, that is an average of 37 trains per day, about 14000 trains per year. Works are envisaged that will significantly accelerate formation and disbandment of arriving and departing trains and will provide unhindered reception and departure of trains at Altynkol station:

- construction of a non-mechanized low-capacity humping yard and 12 tracks of humping yard yard «G» of 1520 mm gauge;

- construction of a humping yard yard with 5 tracks along the 1520 mm gauge track, and additionally of at least 5 receiving-departure tracks along the 1435 mm gauge track;



- construction of a dead end for sludge of passenger cars, which will create favorable conditions, due to release of station tracks for shunting operations of the station;
- construction of ramps, which will make it possible to overload vehicles;
- construction of a higher track for loading and unloading of local goods of the agro-industrial complex (corn, molasses, starch, etc.), as well as of coal.

FEZ Khorgos plays an important role for the growth of transit transportation capacity of the Republic of Kazakhstan. Railway and highway passing through the territory of Khorgos FEZ are also important for the implementation of the global concept of New Silk Road. The favorable location of Khorgos FEZ, presence of several zones, a border station where cargo is being transhipped from a narrow gauge to a wide one, the possibility of using innovative technologies, creation of production enterprises (mechanical engineering, food, chemical and light industry), simplification of customs procedures, introduction of the «one-stop shop» principle, development of intermodal and multimodal services, possibility of access to the seaports of Aktau and Kuryk are priority factors. Also, construction of a large class A TLC Verona Capital, which occupies 9,5 ha, is now continuing within the territory of Khorgos FEZ. It is planned to build dry warehouses with an area of 24 694 m² and warehouses with a controlled temperature regime of 14 516 m².

Cities in the northern and central parts of the country are included in the second cluster (Pic. 1). In the considered part of the Republic of Kazakhstan, the proposed location of TLC is the village of Boztal of Ereymentau district (with coordinates 552; 232) of Akmola region located at a distance of 169 km from the city of Nur-Sultan. The population of the village is about 5 thousand people. As the results of the analysis show in relation to this cluster, given small population number, lack of a railway station and the worn-out state of roads, placement of TLC in the village of Boztal is impractical.

Hence, we suggest considering the option of placement of TLC in Nur-Sultan city located within the radius of 172 km from Boztal village since the combination of methods allows searching for the optimal

option of placement of TLC in that cluster. Since 2015, in the framework of Nurly Zhol state program, in Akmola region, at a distance of 12 km from the city of Nur-Sultan, an A+ class TLC has been operating. It was the first in the country of that class, has a total area of about 40 000 m², a cargo container terminal of 7 ha, with a convenient transport car–railway interchange, access roads with a length of 5 km. Warehouse complexes, where dry and climatic functions are equipped with the advanced technology. The warehouse complexes have the advantages to handle more than 300 000 tons of cargo per year. Capacity of the loading and unloading zone is about 1000 pallets per day, the capacity of the container terminal is up to 4000 large-tonnage containers (the ability to handle more than 1 000 000 tons of cargo per year). Besides, the center includes customs control zones and a distribution center. TLC is located along the republican highway Nur-Sultan–Karaganda, not far from Sorokovaya railway station (1,6 km). Sorokovaya station by the nature of the operations is a railway district station and belongs to the 1st class. The number of tracks at the station is 20, there is one receiving-departure yard. The cargo turnover of the station for 4 months of 2018 amounted to about 3 000 wagons.

The rural district of Mukur (with coordinates 297; 420) has been identified as the proposed location for TLC in the third cluster (Pic. 1) using the gravitational method. This rural district makes part of Kyzylkoginsky district of Atyrau region, while Atyrau region is in the west of the country and borders Astrakhan region of Russia from the outside. The leading industries of the region are fuel, chemical and fishing industries. The region as the oil region of Kazakhstan ranks third in the country in terms of GRP and first in terms of GRP per capita. According to the Ministry of National Economy of the Republic of Kazakhstan, in 2018, due to an increase in crude oil production, the industrial production index was by 23,8 % higher as compared to the same period of 2017.

The village of Mukur is located at 235 km distance from the regional center. The population of the village is about 7 thousand people. Mukur belongs to intermediate stations of the fourth class, has 4 receiving-departure tracks. The road connecting the

village to the regional center is in unsatisfactory condition. Given deterioration of the highway and of the railway line, the small population number, it is not advisable to place TLC in the territory of the village of Mukur. It can be seen that the use of gravitational method for this cluster did not give positive practical results for placement of TLC either.

Based on the results obtained, in this cluster, as in the previous ones, it is practical to use a combination of gravitational method and multicriteria analysis to determine the location of TLC. In this case, according to the same criteria that were taken into account for the first and second clusters, the proposed location for TLC will be the city of Atyrau, located within the radius of 234 km from Mukur village.

According to the census in 2018, the population of the city amounted to 268840 people. Atyrau station, by the nature of the operations, is a railway district station and belongs to the 1st class. There are 9 receiving-departure tracks, 2 yards (sorting and receiving-departure), the sorting yard consists of 6 tracks, there are 13 access roads. The 366 km long transit corridor Atyrau–Astrakhan passes through the territory, allowing passage of vehicles with a load of 13 tons per axle. Cargo is delivered towards the Black Sea ports, to the Caucasus, and then to Europe. The corridor is also part of the Western Europe–Western China route. By 2020, it is planned to increase revenues from transit traffic to 5 billion US dollars per year, hence there is a need for warehouse space of about 3 mln m².

Conclusions. Based on the above, when constructing TLC in the regions of the Republic of Kazakhstan, it is necessary to consider the set of important aspects, comprising the degree of development of transport and service infrastructure and transport logistics, population density, movement of export cargo, the capacity of the station (border stations), etc.

Analyzing the data obtained for the three clusters, we can conclude that the use of the gravitational method allows to quickly obtain an acceptable result in less detail at the macro level, it in the future is subject to some adjustment. A specific feature of application of the gravitational method is that the results do not fully take into account additional

indicators, such as territorial development, the volume of consumption of transport products, and the degree of development of transport infrastructure. None of the locations found in three clusters can be unambiguously used to place TLC, since they are located at a considerable distance from all the consumers of transport services considered.

A more accurate result can be obtained by adjusting and using the multicriteria analysis method for all three clusters.

Thus, for actual application in determining the optimal placement of TLC, it is recommended to use a combination of methods.

REFERENCES

1. Sukhova, L. F. The regional aspect of assessing the effectiveness of industrial infrastructure (in order of statement of the problem) [*Regionalniy aspekt otsenki effektivnosti proizvodstvennoi infrastruktury (v poryadke voprosa)*]. Almaty, 2003, pp. 56–63.
2. Industry of Kazakhstan [*Promyshlennost Kazakhstana*]. [Electronic resource]: <http://www.webeconomy.ru/index.php?page=cat&cat=mc&mc=164&type=news&newsid=1471>. Last accessed 20.04.2019.
3. Rakhmangulov, A. N. Methodological foundations of organization of functioning of railway industrial transport and technological systems. D.Sc. (Eng) thesis [*Metodologicheskie osnovy organizatsii funktsionirovaniya zheleznodorozhnykh promyshlennyykh transportno-tekhnologicheskikh sistem. Dis... dok. tekhn. nauk*]. Moscow, 2013, 373 p.
4. Baginova, V. V. Theoretical and conceptual foundations of organization of a regional transport system (at the example of the Republic of Buryatia). D.Sc. (Eng) thesis [*Teoretiko-kontseptualnye osnovy organizatsii regionalnoi transportnoi sistemy (na primere Respubliki Buryatiya). Dis... dok. tekhn. nauk*]. Moscow, 2004, 295 p.
5. Kirillova, A. G. Methodology for organization of container and piggyback transportation in multimodal road-rail communications. D.Sc. (Eng) thesis [*Metodologiya organizatsii koneinernyykh i kontreilernyykh perevozok v multimodalnykh avtomobilno-zheleznodorozhnykh soobshcheniyakh. Dis... dok. tekhn. nauk*]. Moscow, 2010, 335 p.
6. Kuzmin, D. V. Organization of a regional network of piggyback terminals. Ph.D. (Eng) thesis [*Organizatsiya regionalnoi seti kontreilernyykh terminalov. Dis... kand. tekhn. nauk*]. Moscow, 2015, 166 p.
7. Baginov, A. V. Modern Approaches to Siting of Transport and Logistics Infrastructure Facilities. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 3 (76), pp. 166–177.
8. Prosvetov, G. I. Mathematical methods in logistics: Problems and solutions [*Matematicheskie metody v logistike: zadachi i resheniya*]. 2nd ed., enl. Moscow, Alpha-Press publ., 2009, 304 p.
9. The action plan for 2018–2024 for implementation of the Long-term plan for formation of Almaty agglomeration until 2030 [*Plan meropriyatii na 2018–2024 po realizatsii Dolgosrochnogo plana formirovaniya Almatinskoi aglomeratsii do 2030 goda*]. [Electronic resource]: <https://pandia.ru/text/80/688/33173.php>. Last accessed 20.04.2019.





Информационная система контроля сырьевых грузов металлургического предприятия



Алексей ПОПОВ



Ольга СУСЛОВА



Артем ХМЕЛЕВ

*Попов Алексей Тимофеевич – Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия.
Суслова Ольга Анатольевна – Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия.
Хмелев Артем Сергеевич – Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия*.*

На сегодняшний день создание и применение мощных информационных систем для управления потоками сырьевых грузов металлургического предприятия, перевозимых железнодорожным транспортом, позволяют сократить оборот вагонов на подъездном пути предприятия, снизить запасы сырья на колёсах, создать условия для бесперебойного обеспечения производства, а также повысить уровень зрелости кросс-функционального взаимодействия подразделений.

Отсюда возникает необходимость в разработке системы оперативного сбора, анализа и визуализации данных о поставках сырья, которая будет играть роль единого информационного пространства для координации действий всех причастных сторон. Подобная информационная система должна обеспечивать поддержку решений как на оперативном уровне, так и на тактическом. Оперативные решения в этом случае включают в себя: изменение планов на

текущий период, закупку недостающих объёмов, перенаправление сырья на других потребителей, расставление приоритетов по отгрузке и продвижению вагонов, а тактический – пересмотр нормативов запасов и потребления, проработка специальных соглашений с перевозчиком.

Целью исследования является изучение возможности применения информационной системы контроля сырьевых грузов для сокращения оборота вагонов на подъездном пути металлургического предприятия. Используются общенаучные методы, сравнительный анализ, математические методы.

В статье рассмотрен основной функционал подобной системы, представлена методика расчёта инвестиционной привлекательности проекта и предлагаются дальнейшие направления развития в области информационного взаимодействия предприятий и операторов подвижного состава.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, информационная система, подвижной состав, металлургическое предприятие, промышленный транспорт, оборот вагона.

*Информация об авторах:

Попов Алексей Тимофеевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой организации перевозок Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия, popov@stu.lipetsk.ru.

Суслова Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия, suslova_2003@mail.ru.

Хмелев Артем Сергеевич – аспирант кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия, khmeleff_art@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 13.05.2019, принята к публикации 07.09.2019.

For the English text of the article please see p. 236.

ВВЕДЕНИЕ

Металлургические предприятия полного цикла характеризуются значительным объёмом грузоперевозок, большим ассортиментом производимой продукции и сложной производственной технологией. На комбинаты ежедневно прибывают различные виды грузов: железорудный концентрат, руда, окатыши, флюсы, кокс различного тушения, коксующиеся угли, огнеупоры, оборудование и др.

Металлургический комплекс вносит значительный вклад в развитие экономики России. Доля чёрной металлургии в ВВП России составляет чуть менее 2 %, в промышленном производстве порядка 8 %, в экспорте 7 %. Кроме этого, отрасль потребляет 5,3 % всей электроэнергии и 8 % природного газа. Доля перевозок грузов чёрной металлургии в общем объёме железнодорожного грузооборота составляет 15 % [1, с. 31].

В современных условиях крупными металлургическими компаниями взят курс на развитие бизнеса не только за счёт увеличения объёма производства и расширения ассортимента выпускаемой продукции, но и путём повышения эффективности производства за счёт оптимизации внутренних процессов. Так как железнодорожный транспорт является основным для металлургии, нельзя обойти стороной оптимизацию технологии его работы.

Доставка сырьевых грузов для нужд чёрной металлургии и вывоз готовой продукции потребителям осуществляются с привлечением железнодорожных операторских компаний [2, с. 299]. Предоставление универсального и специализированного подвижного состава (ПС) под перевозку происходит на основании договора транспортно-экспедиторского обслуживания, который заключается, как правило, на 5 лет и предусматривает определённую ставку за привлечение вагонов. При увеличении оборота вагонов выше нормативного оператор выставляет предприятию штрафы за перепростой, в то же время, если оборот ниже нормативного значения, операторская компания может выплатить премию по условиям договора [3, с. 265].

Отсюда понятно, что при таком значительном объёме перевозок снижение оборачиваемости подвижного состава даст ощутимый

экономический эффект, снизит транспортную составляющую в себестоимости готовой продукции, а значит, металлургический комбинат будет обладать конкурентным преимуществом на рынке. Кроме этого, цифровизация экономики подталкивает компании к созданию мощных IT-систем, предоставляющих работникам полную и актуальную информацию о технологических процессах для принятия оптимальных решений.

Этим обусловлена *цель* исследования — изучение возможности применения информационной системы контроля сырьевых грузов для сокращения оборота вагонов на подъездном пути металлургического предприятия.

НАЗНАЧЕНИЕ СИСТЕМЫ

Задачи

Объектом автоматизации при внедрении системы поддержки принятия решений в сфере управления цепями поставок сырьевых грузов является деятельность всех причастных подразделений: дирекций по снабжению, логистике и производству. Информационная система (ИС) также предусматривает построение интерфейса взаимодействия с другими системами, существующими на предприятии и за его пределами, и предназначена для:

- планирования поставок сырья;
- построения оптимальных графиков отгрузки;
- консолидации информации об использовании вагонного парка, в т.ч. о вагонах:
 - погруженных грузоотправителем;
 - прибывших на предприятие;
 - выгруженных на путях предприятия;
- консолидации информации об отгрузках в адрес предприятия;
- контроля за выполнением графиков отгрузки сырьевых грузов;
- контроля за обеспеченностью погрузками порожними вагонами;
- контроля за продвижением гружёных вагонов по магистральной сети (в нашем случае — ОАО «РЖД»);
- прогнозирования прибытия вагонов с сырьевыми грузами на основании данных о фактическом продвижении по сети;
- учёта гружёного подвижного состава с сырьём на подъездном пути предприятия в течение периода;





Рис. 1. Существующий вариант взаимодействия.

• информационного сопровождения процесса отгрузки сырья в части предоставления информации о возможной корректировке графика погрузки при значительном отклонении количества вагонов с сырьём на подъездном пути предприятия от нормативного значения в сторону уменьшения или увеличения с учётом подвижного состава, находящегося на сети общего пользования;

• прогнозирования остатка гружёных вагонов с сырьём на путях необщего пользования на конец отчётного периода.

Таким образом, среди основных целей разработки и внедрения указанной системы необходимо выделить следующие:

• организация автоматизированного учёта погруженных и выгруженных объёмов сырьевых грузов;

• обеспечение оперативного контроля и анализа обеспеченности отгрузки заявленных объёмов сырья порожним подвижным составом;

• исключение ручного заполнения документов, влекущего за собой ошибки и разночтения;

• обеспечение оперативного контроля входной информации;

• повышение качества планирования;

• обеспечение высокого уровня надёжности и защиты данных;

• развитие кросс-функционального взаимодействия подразделений предприятия;

• снижение стоимости привлечения подвижного состава за счёт сокращения оборота вагонов.

ДЕЙСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА

Для изучения возможности применения информационной системы контроля сырьевых грузов с целью сокращения оборота вагонов на подъездном пути металлургического

предприятия необходимо проанализировать действующую систему с указанием преимуществ и недостатков. В результате проведения сравнительного анализа текущего состояния теории и практики в сфере управления транспортными потоками металлургических предприятий авторами была составлена схема существующего взаимодействия между перевозчиком, операторской компанией и предприятием (рис. 1).

Вся коммерческая информация по накладной — наименование груза по Единой тарифно-статистической номенклатуре грузов (ЕТСНГ), грузоотправитель, грузополучатель, станция назначения, вес груза — передаётся из системы «Электронная транспортная накладная» (ЭТРАН). Вся информация по дислокации — станция дислокации, дорога дислокации, последняя операция, время последней операции, номер вагона — поступает из Главного вычислительного центра (ГВЦ) РЖД. В ИС «Оператор» происходит объединение (mapping) всех поступивших данных, которые затем выгружаются диспетчером операторской компании и передаются работникам металлургического комбината. В свою очередь, диспетчерский аппарат предприятия выгружает данные из внутренних ИС и консолидирует всю информацию, необходимую для принятия решений.

Недостатки текущего варианта — это отсутствие доступа работников комбината к ИС «Оператор», информационный разрыв между системами внутреннего и внешнего контроля за перевозками, большое влияние человеческого фактора, что неизбежно ведёт к ошибкам и разночтениям в используемой информации.

Предлагаемая ИС «Контроль сырьевых грузов» (рис. 2) является звеном, которое

где $m_{го}$ — количество вагонов на подъездном пути грузоотправителя;

$m_{ст}$ — количество вагонов на станции примыкания;

$m_{подход}$ — количество вагонов, которые придут к указанной дате;

$m_{план}$ — количество вагонов, запланированных под погрузку.

В противном случае система сигнализирует цветовой индикацией о риске срыва плана отгрузки.

В) Контроль исполнения графиков отгрузки

Информация о погрузке по каждому виду груза и поставщику поступает за предыдущие железнодорожные сутки после 18:00. Передача информации может происходить как напрямую из системы «Электронная транспортная накладная» (ЭТРАН), так и опосредованно из ИС «Оператор». Полученные значения сравниваются с плановыми показателями, и все расхождения в большую или меньшую сторону указываются определённым цветом.

Г) Предоставление информации о дислокации погруженных вагонов

Информация, передаваемая из ИС «Оператор», должна содержать следующие атрибуты:

- наименование дороги дислокации;
- наименование станции дислокации;
- наименование станции отправления;
- наименование последней операции;
- дата последней операции;
- индекс поезда;
- номер вагона;
- номер накладной;
- наименование станции назначения;
- расстояние до станции назначения по дислокации;
- наименование грузоотправителя;
- наименование грузополучателя;
- признак гружёности;
- наименование типа подвижного состава;
- наименование груза по Единой тарифно-статистической номенклатуре грузов;
- вес по накладной;
- дата отправления.

На основании этих данных в автоматическом режиме осуществляется определение прогнозируемого времени прибытия. Оно может находиться, во-первых, как

среднее значение исторических данных о прибытии каждого вида сырья за предыдущий период, а во-вторых, расчётным путём на основании нормативных документов (приказ Минтранса № 245 от 07.08.2015 г. «Об утверждении Правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом» [4]). В первом случае предварительно необходимо провести анализ сведений о продвижении гружёных вагонов по сети, во втором — в передаваемую информацию должен быть добавлен атрибут «Вид отправки», чтобы система могла различать повагонные, групповые и маршрутные отправки для корректного выбора точного пробега. В обоих вариантах должна учитываться сезонность перевозки — летний и зимний периоды.

На текущий момент существуют и другие подходы к прогнозированию времени прибытия, которые были отражены в работах [5, с. 120; 6, с. 74].

Д) Формирование графиков прибытия

График прибытия формируется в автоматическом режиме на основании утверждённого графика отгрузки. Дата прибытия по каждому грузу и поставщику в таком случае определяется как:

$$t_{прибытия}^i = t_{отгрузки}^i + t_{доставки}^i, \quad (2)$$

где $t_{прибытия}^i$ — дата прибытия i -го груза на металлургическое предприятие;

$t_{отгрузки}^i$ — дата отгрузки i -го груза поставщиком;

$t_{доставки}^i$ — нормативный срок доставки i -го груза.

Если груз пересекает границу, то к полученному значению следует добавить сутки на таможенные операции.

Исполненный план прибытия должен включать в себя как уже фактически прибывшие объёмы, так и прогнозируемые, которые рассчитываются на основе данных о дислокации погруженных вагонов на сети. Фактические и прогнозные значения должны отличаться по внешнему виду для облегчения восприятия.

Е) Прогнозирование остатков

Визуализация данных о предполагаемых остатках сырья (пример расчёта на декаду приведён в табл. 1) до конца учётного периода позволяет принимать обоснованные решения по ускорению или бросанию гружё-

Таблица 1

Форма вывода информации о прогнозируемых остатках

	Дата									
	01.01	02.01	03.01	04.01	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01
Остаток на 00:00 (начало суток), $m_{\text{факт}}$	310	289	332	311	290	205	184	227	270	249
Прогнозируемое прибытие, $m_{\text{прибытие}}$	64	128	64	64	0	64	128	128	64	64
Выгрузка, $m_{\text{выгрузка}}$	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Остаток на 00:00 (конец суток), $m_{\text{прогноз}}$	289	332	311	290	205	184	227	270	249	228

ных вагонов на сети, переносе дат отгрузки сырья поставщиками и снижении/увеличении заявленных объёмов поставки.

Фактический остаток вагонов на начало суток ($m_{\text{факт}}$) в режиме «АСУ—АСУ» переносится из существующей системы учёта вагонов на предприятии. Ожидаемая дата прибытия отгруженных вагонов ($m_{\text{прибытие}}$) автоматически рассчитывается по формуле (2).

В связи со сложностью моделирования доменного процесса [7, с. 576] и возникающими отсюда трудностями по прогнозированию точных объёмов выгрузки на протяжении длительного периода, а также принимая во внимание относительное постоянство потребляемых объёмов сырья доменным цехом, ожидаемую выгрузку каждого груза ($m_{\text{выгрузка}}$) можно определить по следующей формуле:

$$m_{\text{выгрузка}}^i = \frac{m_{\text{дек}}^i}{10},$$

(3)

где $m_{\text{дек}}^i$ — суммарная выгрузка i -го груза за предшествующую декаду.

На основании полученных значений рассчитывается прогнозируемый остаток вагонов ($m_{\text{прогноз}}$):

$$m_{\text{прогноз}}^i = m_{\text{факт}}^i + m_{\text{прибытие}}^i - m_{\text{выгрузка}}^i.$$

(4)

Также можно графически интерпретировать данные сведения с указанием не-снижаемого остатка сырья для удобства восприятия.

Передача данных из ИС «Оператор» и пересчёт прогнозов и балансов осуществляется ежечасно. При наличии технической возможности и производственной необходимости скорость обновления информации следует увеличить.

Следует отметить, что при взаимодействии информационных систем предприятия и оператора подвижного состава возможны некоторые трудности при осуществлении контроля над продвижением вагонов, которые не находятся в собственности операторской компании. В этом случае при задействовании массива данных «накладная» по определённому номеру вагона может возникнуть ситуация, когда отображается информация прошлого периода, то есть факт того, что этот вагон уже осуществлял перевозку какого-либо груза несколько месяцев или лет назад. С целью недопущения подобных ситуаций можно исключить передачу данных о перевозках в вагонах других собственников автоматически и осуществлять планирование подхода в ручном режиме. Так как основной объём грузов металлургических комбинатов (98–99 %) перевозится вагонами одной компании, то данное допущение не отразится на точности планирования и производственной деятельности предприятия.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Инвестиционная привлекательность проектов и их экономическая эффективность оцениваются по целому ряду показателей. Для корректной оценки применяются математические методы и сравнительный анализ предлагаемых вариантов. Многие специалисты выделяют в качестве основного чистый дисконтированный доход (ЧДД) [8, с. 113; 9, с. 557], который представляет собой сумму денежных платежей от внедрения проекта, приведённых к текущему дню по ставке дисконтирования.





Рис. 4. Средневзвешенный оборот вагона.

В случае проведения экономической оценки проекта по внедрению ИС «Контроль сырьевых грузов» ЧДД определяется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T \frac{\mathcal{E}_{\text{сокр}} - \mathcal{E}_{\text{доп.экс.}}}{(1+r)^t} - \frac{K_{\text{кап}}}{(1+r)^t}, \quad (5)$$

где $\mathcal{E}_{\text{сокр}}$ — денежный поток от сокращения затрат, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{доп.экс.}}$ — дополнительные эксплуатационные расходы, руб.;

$K_{\text{кап}}$ — капитальные затраты на проект, руб.;

r — ставка дисконтирования, %;

t — количество лет ожидаемого денежного потока, лет.

А) Сокращение затрат

Повышение качества оперативного взаимодействия всех участников перевозки, автоматизация контроля выполнения графиков отгрузки сырья и контроль за продвижением подвижного состава по сети на базе единого информационного поля позволит сократить оборот вагонов, и, следовательно, снизить затраты на привлечение вагонного парка. Принимая во внимание тот факт, что значительная часть подвижного состава сдаётся с комбината на сеть порожними, для учёта и контроля оборота вагонов на промышленном железнодорожном транспорте металлургического производства целесообразно применять средневзвешенный оборот вагонов (рис. 4).

В таком случае сокращение эксплуатационных затрат находится как:

$$\mathcal{E}_{\text{сокр}} = n \cdot \Delta t \cdot e_{\text{вч}} \cdot 365, \quad (6)$$

где n — среднее количество вагонов, прибывающих на предприятие в сутки;

Δt — снижение оборота вагона, ваг./час;

$e_{\text{вч}}$ — стоимость 1 вагоно-часа, руб./час.

Если по результатам внедрения ИС удаётся высвободить локомотивы, то полученный эффект нужно добавить к экономии от сокращения затрат.

Прогнозируемое снижение оборота вагонов на территории производственной площади при внедрении информационной системы составляет 3–5 %.

Б) Дополнительные эксплуатационные расходы

В данном случае они будут включать в себя следующие статьи затрат:

- амортизационные отчисления;
- расходы на электроэнергию, потребляемую оборудованием;
- плата оператору подвижного состава за предоставление данных, если такая услуга не оговорена в договоре транспортно-экспедиторского обслуживания.

Амортизационные отчисления вычисляются по формуле:

$$E_{\text{ам}} = \frac{K_{\text{кап}} \cdot N_{\text{ам}}}{100}, \quad (7)$$

где $N_{\text{ам}}$ — норма амортизационных отчислений, %.

Затраты на электроэнергию находятся как:

$$E_{\text{эл}} = W \cdot e_{\text{эл}} \cdot 24 \cdot 365, \quad (8)$$

где $e_{\text{эл}}$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;

W — суммарная мощность оборудования, кВт·ч.

Тогда:

$$\mathcal{E}_{\text{доп.экс.}} = E_{\text{ам}} + E_{\text{эл}} + E_{\text{оп}}, \quad (9)$$

где $E_{\text{оп}}$ — плата оператору электросетей, руб.

Введение дополнительных штатных единиц не требуется, следовательно, уве-

личение фонда оплаты труда не предусмотрено.

В) Капитальные затраты

Капитальные затраты при внедрении системы поддержки принятия решений будут состоять из стоимости серверного оборудования и работ по его установке и наладке, оборудования рабочих мест сотрудников, а также закупки лицензионного программного обеспечения (при необходимости).

Г) Срок окупаемости проекта

Важным показателем экономической оценки проекта является срок его окупаемости: чем он ниже, тем привлекательнее инвестиции.

$$T_{ок} = \frac{K_{кап}}{\mathcal{E}_{сокр} - \mathcal{E}_{доп.экс.}}. \quad (10)$$

ВЫВОДЫ

Внедрение ИС «Контроль сырьевых грузов» металлургических предприятий принесёт экономический эффект за счёт технического эффекта повышения качества оперативной работы, построения оптимальных графиков поставки сырьевых грузов и контроля за их исполнением, своевременного транспортного обслуживания цехов [10, с. 66], сокращения оборота вагонов на путях комбината, обеспечения более равномерного подхода поездов к станции примыкания.

Можно наметить основные направления дальнейшего развития системы:

1) охват готовой продукции: отгрузка, дислокация на сети;

2) увеличение точности прогнозирования движения материальных потоков за счёт совершенствования аппарата математического моделирования.

На сегодняшний день при благоприятной конъюнктуре внешнего и внутреннего рынков крупные компании чёрной металлургии России демонстрируют стабильное увеличение объёмов производства и намерены сохранить эту тенденцию в дальнейшем [11, с. 19]. Отсюда следует, что будут расти и объёмы перевозок, что повлечёт за собой увеличение экономического эффекта от внедрения информационной системы и сокращение срока окупаемости проекта.

Предлагаемая методология и общий дизайн информационной модели могут быть, на наш взгляд, применены при усло-

вии необходимой адаптации и к условиям транспортных систем в других странах [12, с. 38; 13, с. 635].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А. А. Рассмотрение роли чёрной металлургии в мировой и российской экономике в настоящее время и в ближайшей перспективе в курсах технологического образования в образовательных учреждениях московской области // Сб. материалов IV региональной научно-практической конференции. — М.: ООО «Диона», 2017. — С. 28–34.

2. Хмелев А. С., Попов А. Т. Обзор рынка железнодорожных грузоперевозок // Школа молодых учёных по проблемам технических наук: Сборник материалов областного профильного семинара. — Липецк: ЛГТУ, 2018. — С. 298–302.

3. Хмелев А. С., Попов А. Т. Оптимизация взаимодействия промышленного предприятия и операторских компаний // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ИТТ 2018: Материалы I международной научно-практ. конференции. — Липецк: ЛГТУ, 2018. — С. 262–269.

4. Об утверждении Правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом: Приказ Минтранса РФ от 07 августа 2015 г. № 245. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_195371. Доступ 12.05.2019.

5. Игумнов А. О., Сонькин Д. М. Разработка методики построения прогноза времени прибытия с использованием статистических и фактических данных о движении транспортных средств по принципу подбора шаблонов // Наукоедение. — 2016. — Том 8. — № 3 (34). — С. 120.

6. Лысыков М. Г., Ольшанский А. М. О некоторых подходах к прогнозированию прибытия поездов на сортировочные станции // Вестник транспорта Поволжья. — 2014. — № 4 (46). — С. 74–81.

7. Иванов Е. Б., Пареньков А. Е. Аналитические исследования в области доменного процесса с использованием методов логического моделирования // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: Материалы конференции с международным участием. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2010. — С. 575–578.

8. Графова В. Ф. Чистый доход и чистый дисконтированный доход — показатели оценки эффективности инвестиционного проекта // Инновации. — 2006. — № 4. — С. 113–115.

9. Никитина Л. Н., Ожередов В. В. Обоснование объёма инвестиций и расчёт показателей их эффективности для инвестиционного проекта // Экономика и экологический менеджмент. — 2012. — № 2. — С. 556–560.

10. Попов А. Т., Воронина О. В. Оценка последствий несвоевременного транспортного обслуживания цехов предприятия // Мир транспорта. — 2018. — № 1. — С. 66–81.

11. Маркарян Ю. А., Шевченко Е. И., Крикунова И. В. Оценка рынка чёрных металлов // Вектор экономики. — 2018. — № 3. — С. 19.

12. Parunakjan, V., Sizova, E. Designing of logistical chains inside production and transport system of metallurgical enterprise. Transport problems, 2013, Vol. 8, Iss. 1, pp. 35–45.

13. Бауэрсокс Д. Д., Клосс Д. Д. Логистика: Интегрированная цепь поставок. 2-е изд. — М.: Олимп-Бизнес, 2008. — 640 с. — С. 635–637. ●





Information System for Control of Raw Material Transportation of an Iron and Steel Plant



Alexey T. POPOV



Olga A. SUSLOVA



Artem S. KHMELEV

Popov, Alexey T., Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Suslova, Olga A., Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Khmelev, Artem S., Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.*

ABSTRACT

Today, the creation and use of powerful information systems for managing the raw material flows of a metallurgical enterprise transported by the railways allow to diminish turn-round of wagons on the house tracks of the enterprise, to reduce the stock of raw materials in wagons, to create conditions for uninterrupted production, as well as to increase the level of maturity of cross-functional interaction of divisions.

This necessitates the development of a system of rapid collection, analysis, and visualization of information on the supply of raw materials, which will act as a single information space to coordinate the actions of all parties involved. Such an information system should support decisions at both the operational and tactical levels. Operational decisions in this case

include changing plans for the current period, purchasing missing volumes, redirecting raw materials to other consumers, prioritization of relevant shipments and wagons' rearrangement. Tactical level includes revision of reserve and consumption standards, elaboration of special agreements with carriers.

The objective of the study is to investigate the possibility of using an information system for controlling raw material transportation to reduce the turn-round of wagons on the house tracks of a metallurgical enterprise. The authors use general scientific methods, comparative analysis, mathematical methods.

The article studies the main functionality of such a system, presents a methodology for calculating the investment attractiveness of a project, and suggests further directions for development in the field of information interaction between enterprises and rolling stock operators.

Keywords: railway transport, information system, rolling stock, metallurgical enterprise, iron and steel plant, industrial transport, turn-round of a wagon.

* Information about the authors:

Popov, Alexey T. – Ph.D. (Eng), Professor, Head of the Department of Traffic Management of the Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia, popov@stu.lipetsk.ru.

Suslova, Olga A. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Traffic Management of the Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia, suslova_2003@mail.ru.

Khmelev, Artem S. – Ph.D Student at the Department of Traffic Management of the Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia, khmeleff_art@mail.ru.

Article received 13.05.2019, accepted 07.09.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 228.

Introduction

Integrated (complete cycle) iron-and-steel plant is characterized by a significant volume of freight transportation, a large range of products and sophisticated production technology. Daily iron and steel works receive various types of cargoes: iron ore concentrate, ore, iron nuggets, fluxes, dry- and wet quenched coke, coking coal, refractory materials, equipment, and others.

The metallurgical industry makes a significant contribution to the development of the Russian economy. The share of ferrous metal industry is just under 2 % in Russia's GDP, it is about 8 % in industrial production, and 7 % in export. The industry consumes 5,3 % of all electricity and 8 % of natural gas produced. The share of ferrous metal industry freight transportation in the total volume of railway freight turnover is 15 % [1, p. 31].

In the modern context large metallurgical companies have embarked on a course of business development not only by increasing the volume of production and expanding the range of products, but also by increasing production efficiency by optimizing internal processes. As already mentioned, railway transport is the main mode of transport for the industry, therefore, optimization of the transportation technology cannot be ignored.

The delivery of raw materials for the need of ferrous metal industry and the shipment of finished products to consumers is carried out with the assistance of railway operator companies [2, p. 299]. Provision of all-purpose and specialized rolling stock for transportation takes place on the basis of a contract of freight forwarding services, which is usually concluded for 5 years and provides for a certain rate for wagon engaging. If the turnover of wagons increases above the normative value, the operator penalizes the enterprise for demurrage, on the opposite, if the turnover is lower than the normative value, the operator company can pay a premium under the terms of the contract [3, p. 265].

It is clear that with such a significant volume of freight transportation, a decrease in rolling stock turnover will give a tangible economic effect and reduce the transport component in the cost of finished products, which means that the metallurgical plant will have a competitive

advantage in the market. In addition, the digitalization of the economy encourages companies to create powerful IT-systems that provide employees with complete and up-to-date information about technological processes for making optimal decisions.

This determines the *objective* of the study which is to explore the possibility of using an information system for monitoring raw material transportation to reduce turn-round of wagons on the house tracks of a metallurgical enterprise.

Results.

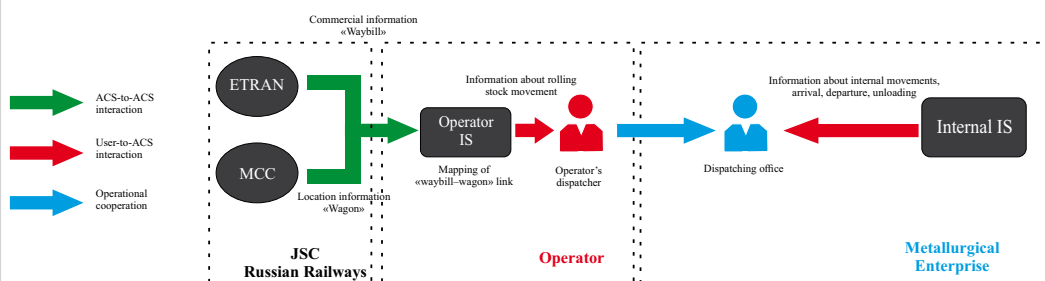
System purpose

Tasks

The object of automation when introducing a decision support system in the field of supply chain management of raw materials is the activity of all involved departments: supply department, logistics division and production department. The information system (IS) also provides for the construction of an interaction interface with other systems existing at the enterprise and beyond, and is intended for:

- raw material supply planning;
- development of optimal shipping schedules;
- consolidation of information on the use of the rolling stock, including that about wagons:
 - loaded by the consigner;
 - arrived at the enterprise;
 - unloaded on the enterprise tracks;
- consolidation of information on shipments to the enterprise;
- monitoring the compliance with schedules of shipment of raw materials;
- monitoring the provision of shipment operations with empty wagons;
- monitoring movement of loaded wagons on the rail network (in our case, on the network of the JSC Russian Railways);
- forecasting the arrival of wagons with raw materials based on data on their actual location on the network;
- accounting of loaded rolling stock with raw materials on the house tracks of the enterprise during the period;
- informational support of the process of shipment of raw materials in terms of providing information on possible adjustments to the loading schedule when the number of wagons with raw materials on the house tracks of the enterprise deviates significantly from the





Pic. 1. The existing scheme of interaction.

normative value upwards or downwards, taking into account the rolling stock located on the public network;

- forecasting the balance of loaded wagons with raw materials on house tracks at the end of the reporting period.

Thus, among the main objectives of the development and implementation of the said system, it is necessary to highlight the following objectives:

- organization of automated accounting of loaded and unloaded volumes of raw materials;
- providing operational control and analysis of the provision of shipment of declared volumes of raw materials by empty rolling stock;
- exclusion of manual filling of documents to exclude errors and discrepancies;
- providing operational control of input information;
- improving the quality of planning;
- ensuring a high level of reliability and data protection;
- development of cross-functional interaction of enterprise divisions;
- reduction in the cost of engaging rolling stock by reducing the turnover of wagons.

Current system

To study the possibility of using an information system for control of raw materials in order to reduce the turnover of wagons on the house tracks of a metallurgical enterprise, it is necessary to analyze the current system revealing its advantages and disadvantages. As a result of a comparative analysis of the current state of basic theory and practices in the field of traffic control at metallurgical enterprises, the authors compiled a diagram of the existing framework of interaction between the carrier, the operator company and the enterprise (Pic. 1).

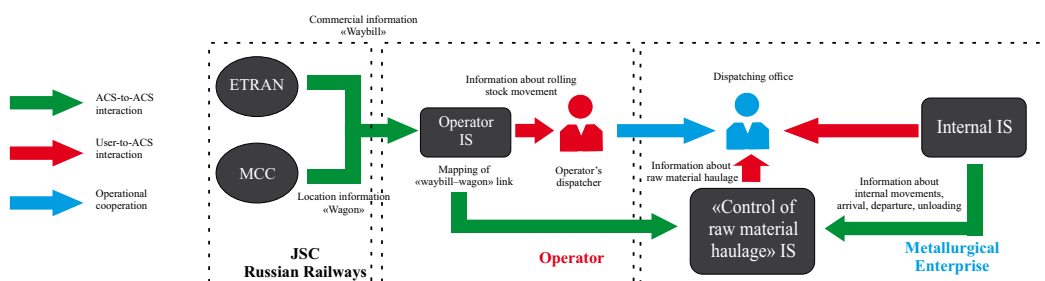
All commercial information regarding the waybill, i.e. the names of the freighted goods according to the Single Tariff and Statistical Nomenclature of Goods (ETSNG), of the consignor, of the consignee, of the destination station, the weight of the goods, is transmitted directly from the Electronic Transport Waybill (ETRAN) system. All information on the ground location, i.e. the station of location, the railway of location, the last operation, the time of the last operation, the wagon number, comes from the Main Computer Center (MCC) of Russian Railways. In the Operator IS, all received data are mapped and then the dispatcher of the operator company downloads them and transfers to the employees of the metallurgical plant. In turn, the plant's dispatching office downloads data from the internal IS and consolidates all the information necessary for decision making.

The disadvantages of the current system are the lack of access for the plant's employees to the Operator IS, the information gap between the internal and external transportation control systems, the great influence of the human factor, which inevitably leads to errors and discrepancies in the information used.

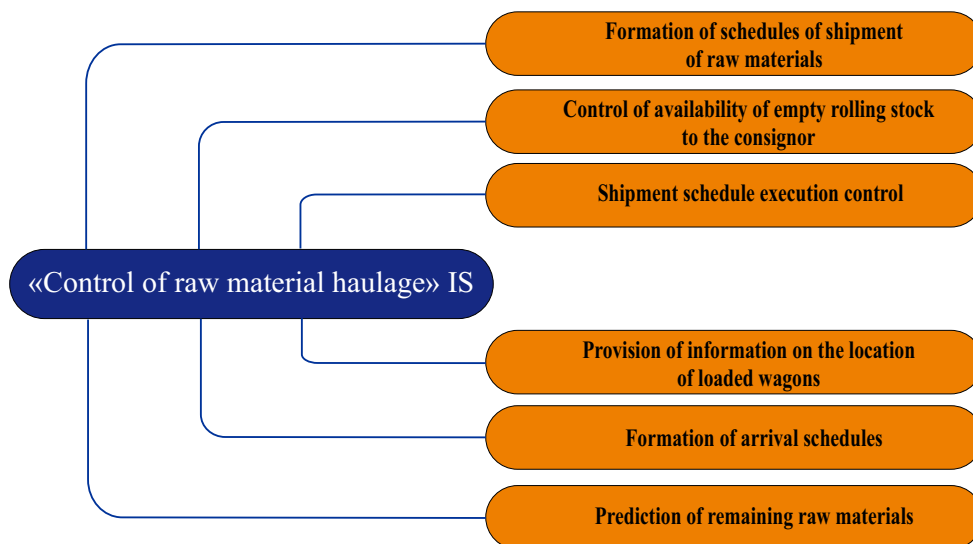
The proposed «Control of raw materials freights» IS (Pic. 2) is a link that integrates the internal and the operator systems into a single whole and allows the dispatching office (and other employees of the company) to see the entire logistics chain, while significantly reducing the amount of operational interaction with representatives of the operator company and not restricting access to the previous internal IS.

System functionality

Based on the desired goals, we can distinguish the functions that the information system should perform (Pic. 3).



Pic. 2. Proposed interaction scheme.



Pic. 3. Functions of «Control of raw materials freights» IS.

The functionality of the system allows full control over the material flow throughout the chain: «origin of freight flow»—«transportation to the consignee»—«consumption».

A) Formation of schedules of shipment of raw material

At this stage, all data necessary for optimal shipment schedules should be entered into the system. The following should be taken into account: the planned volume of transportation of each type of freight and for each consignor, shipping type, the type of rolling stock, the production capacity of the consignor and the consignee, standard delivery time, application numbers for freight transportation (i.e., form GU-12). Depending on the type of raw material, its shipment should be planned either on certain days (if the freight is to arrive at the metallurgical plant on a specific date), or so that to ensure a uniform delivery of raw materials during the accounting period taking into account the delivery time.

After that, the obtained schedule is subject to coordination with all involved divisions both in the metallurgical enterprise, and with operators of a rolling stock and suppliers of raw materials. The agreed and approved shipment schedule is «uploaded» in the IS for subsequent shipment accounting.

It should be noted that the Information System «Control of raw material haulage» should provide for the possibility of adjusting the shipment plan.

B) Control of availability of empty rolling stock to the consignor

Constant monitoring of the availability of rolling stock to suppliers is possible only on the basis of information interaction between the operator company and the metallurgical enterprise in «Automated control system to Automated control system» mode (ACS-to-ACS) and should allow to determine in advance the risks of breaking the schedule due to the lack of wagons at the consignor's side.



Data on the available rolling stock on the consignor's house tracks and at the junction station are transmitted from the Operator IS. In the presence of approaching empty wagons the «Control of raw material haulage» IS automatically predicts the date of arrival to the consignor.

Shipment is considered secured if:

$$m_{\text{sender}} + m_{\text{j.st}} + m_{\text{coming}} \geq m_{\text{planned}} \quad (1)$$

where m_{sender} is the number of wagons on the consignor's house tracks;

$m_{\text{j.st}}$ is the number of wagons at the junction station;

m_{coming} is the number of wagons that will arrive by the specified date;

m_{planned} is the number of wagons planned for loading.

Otherwise, the system signals the risk of failure of the shipment plan with a color-coded indication.

C) Shipment schedule execution control

Information on shipment of each type of freight and each consignor is received for the calculated previous railway day after 18:00. Information can be transmitted either directly from the Electronic Transport Waybill (ETRAN) system or indirectly from the Operator IS. The obtained values are compared with the planned indicators, and all discrepancies upward and downward are indicated by a certain color.

D) Provision of information on the location of loaded wagons

The information transmitted from the Operator IS must contain the following attributes:

- the name of the railway of location;
- the name of the station of location;
- the name of the departure station;
- the name of the last operation;
- the date of the last operation;
- the train index;
- the wagon number;
- the waybill number;
- the name of the destination station;
- distance to the destination station from the location;
- the name of the consignor;
- the name of the consignee;
- empty or loaded wagon indication;
- the name of the type of rolling stock;
- the name of freight according to the Unified Tariff and Statistical Nomenclature of Goods;

- the weight according to the waybill;
- the date of departure.

Based on the above data, the predicted arrival time is automatically determined. It can be determined, firstly, as the average of historical data on the arrival of each type of raw material for the previous period, and secondly, by calculation on the basis of regulatory documents (order of the Russian Ministry of Transport No. 245 dated 07.08.2015 «On approval of the Rules for calculating the time of delivery of goods, and of empty freight wagons by rail» [4]). In the first case, it is necessary to first analyze the information about the movement of loaded wagons within the railway network, in the second case, the «Shipment type» attribute should be added to the transmitted information, so that the system can distinguish between single wagon, grouped and route deliveries for the correct choice of daily mileage. In both cases, seasonality of transportation (summer and winter periods) should be considered.

At present, there are also other approaches to predicting the arrival time, which were described in the publications [5, p. 120; 6, p. 74].

E) Formation of arrival schedules

The arrival schedule is automatically generated based on the approved shipment schedule. The date of arrival for each freight and consignor is then determined as:

$$t_{\text{arrival}}^i = t_{\text{shipment}}^i + t_{\text{delivery}}^i \quad (2)$$

where t_{arrival}^i is the date of arrival of the i -th freight at the metallurgical enterprise;

t_{shipment}^i is the date of shipment of the i -th freight by the consignor;

t_{delivery}^i is standard delivery time of the i -th freight.

If the freight is to cross the border, then one more day should be added to the obtained time for customs operations.

The completed arrival plan should include both the volumes that have arrived and the predicted volumes, which are calculated based on data on the location of loaded wagons within the railway network. Real and predicted values should be differently imaged for ease of perception.

F) Prediction of remaining raw materials

Visualization of data on the estimated balances of raw materials (an example of calculation for a ten-day period is given in Table 1) until the end of the estimated period

Table 1

Predicted Balance Information Output Form

	Date									
	01.01	02.01	03.01	04.01	05.01	06.01	07.01	08.01	09.01	10.01
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Balance at 00:00 (beginning of day), m_{actual}	310	289	332	311	290	205	184	227	270	249
Predicted arrival, $m_{arrival}$	64	128	64	64	0	64	128	128	64	64
Unloading, $m_{unloading}$	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Balance at 00:00 (end of day), $m_{predicted}$	289	332	311	290	205	184	227	270	249	228

allows to make informed decisions to accelerate or leave loaded wagons that are within the network, shift the dates of shipment of raw materials by suppliers and reduce/increase the declared volumes of supply.

The actual balance of wagons at the beginning of the day (m_{actual}) in the «ACS-to-ACS» mode is transferred from the existing system of accounting of wagons at the enterprise. The expected arrival date of the dispatched wagons ($m_{arrival}$) is automatically calculated with the formula (2).

Due to the complexity of modeling the blast furnace smelting operation [7, p. 576] and the resulting difficulties in predicting the exact volumes of unloading over a long period, and also taking into account the relative constancy of the consumed volumes of raw material by the blast furnace plant, the expected unloading of each delivery ($m_{unloading}$) can be determined by the formula:

$$m_{unloading}^i = \frac{m_{ten\_days}^i}{10} \tag{3}$$

where $m_{ten\_days}^i$ is total unloading of the i -th delivery for the previous ten-day period.

Based on the values obtained the predicted balance of wagons is calculated ($m_{predicted}$):

$$m_{predict}^i = m_{actual}^i + m_{arrival}^i - m_{unloading}^i \tag{4}$$

This information can be also graphically interpreted indicating the minimum balance of raw material for ease of perception.

Data transfer from the Operator IS and recalculation of predicted values and balances are carried out every hour. If there is a technical capability and production need, the speed of updating information should be increased.

It should be noted that the interaction of information systems of the enterprise and the operator of the rolling stock may have some difficulties in controlling the movement of

wagons that are not owned by the operator company. In this case, when using the «Waybill» data array for the given registration number of the wagon, a situation may arise when the information on the past period is displayed, that is, the fact that this wagon has already carried out the transportation of any freight a few months or years ago. To avoid such situations, it is possible to exclude the automatic transfer of data on transportation in the wagons of other owners and to plan the coming wagons in manual mode. Since the bulk of the freight of metallurgical plants (98–99 %) is transported by wagons of one and the same company, this assumption will not affect the accuracy of planning and production activities of the enterprise.

Evaluation of economic effect

Investment attractiveness of projects and their economic efficiency are normally assessed by a set of indicators. For correct evaluation mathematical methods and comparative analysis of the proposed options are used. Many experts distinguish the net present value (NPV) as the main indicator [8, p. 113; 9, p. 557], which is the amount of cash payments resulting from the implementation of the project, reduced to the current day at the discount rate.

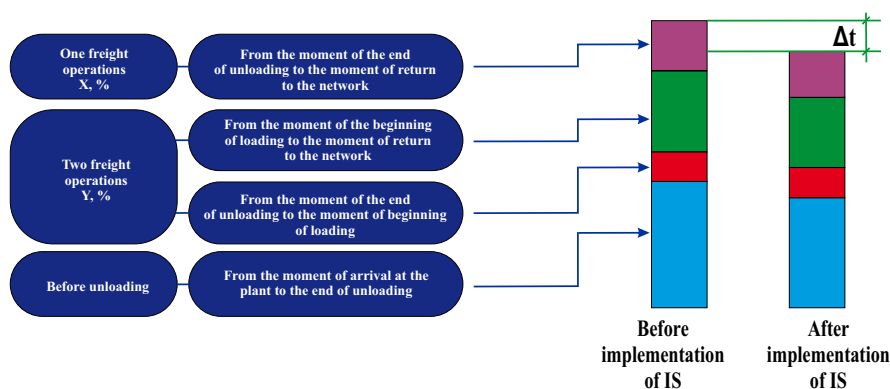
For the purpose of the economic assessment of the implementation project of the «Control of raw materials freight» IS, the net present value should be determined by the formula:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{F_{reduct} - AC_{ad.oper.costs.}}{(1+r)^t} - \frac{C_{cap.exp.}}{(1+r)^t}, \tag{5}$$

where F_{reduct} is fund flow owing to cost reduction, rub.;

$AC_{ad.oper.costs.}$ means additional operating costs, rub.;





Pic. 4. Weighted average turn-round of wagon.

$C_{cap.exp}$ are capital expenditures on the project, rub.;

r is the discount rate, %;

t is number of years of expected fund flow, years.

A) Cost reduction

Improving the quality of operational cooperation of all participants in transportation, automation of monitoring of compliance with shipment schedules of raw material and monitoring the movement of the rolling stock over the network on the basis of a single information field will reduce the turnover of wagons, and hence reduce the cost of utilization of a wagon fleet. Taking into account the fact that a significant part of the rolling stock is returned empty from the plant to the network, it is advisable to use the weighted average turnover of wagons for accounting and control of the turnover of wagons on the industrial railway transport for metallurgical production (Pic. 4).

In this case, the reduction in operating costs is as follows capital expenditures:

$$F_{reduct} = n \cdot \Delta t \cdot e_{fr.wagon-hr} \cdot 365, \quad (6)$$

where n is the average number of wagons arriving at the enterprise per day;

Δt is the decrease in turn-round of wagon, freight wagon-hour;

$e_{fr.wagon-hr}$ is the cost of 1 freight wagon-hour, rub./hour.

If fewer locomotives can be used because of implementation of the IS, then the effect obtained should be added to the savings owing to cost reduction.

The predicted decrease in the turnover of wagons on the territory of the production area after the implementation of the information system is 3–5 %.

B) Additional operating costs

In this case the additional operating costs will include the following cost items:

- depreciation cost;
- the cost of electricity consumed by the equipment;
- payment to the rolling stock operator for the provision of data, if such a service is not stipulated in the contract of freight forwarding services.

Depreciation cost is calculated by the formula:

$$DC_{depr.cost} = \frac{C_{cap.exp} \cdot N_{depr.rate}}{100}, \quad (7)$$

where $N_{depr.rate}$ is depreciation rate, %.

Electricity cost is as follows:

$$C_{el} = W \cdot C_{el} \cdot 24 \cdot 365, \quad (8)$$

where C_{el} is the cost of 1 kW · h of electricity, rub.;

W is total watt-hour consumption of the equipment, kW · h.

Then:

$$AC_{add.op.cost} = DC_{depr.cost} + C_{el} + C_{pn.opr}, \quad (9)$$

where $C_{pn.opr}$ is the payment to the power network operator, rub.

The introduction of additional staff is not required, therefore, an increase in the salary fund is not provided.

C) Capital expenditures

Capital costs for the implementation of the decision support system will consist of the cost of server equipment and of its installation and commissioning, equipment of workplaces for employees, as well as of the purchase of licensed software (if necessary).

D) Payback period of the project

An important indicator of the economic evaluation of the project is its payback period:

the lower it is the more attractive is the investment:

$$T_{\text{payback}} = \frac{C_{\text{cap.exp.}}}{F_{\text{reduct}} - AC_{\text{add.oper.costs}}}. \quad (10)$$

Conclusion

The implementation of the «Control of raw material haulage» IS at metallurgical enterprises will bring economic benefits thanks to the technical effects of improving the quality of operational work, making optimal schedules for the supply of raw material and monitoring implementation of these schedules, timely provision of transportation services to the plants [10, p. 66], reducing the turnover of wagons on the house tracks, ensuring a more lean time distribution of arrival of trains at the adjacent station.

It is possible to outline the main directions of further development of the system:

1) application of the system may be extended to cover of finished products (shipment, location within the network) as well;

2) increasing the accuracy of predicting the movement of material flows due to the improvement of the apparatus of mathematical modelling.

Today, under favorable conditions on the external and internal markets, large companies of ferrous metal industry of Russia are showing a steady increase in production volumes and intend to maintain this trend in the future [11, p. 19]. Hence it appears that transportation volumes will also increase, which will entail an increase in the economic effect of the introduction of the information system and a reduction in the payback period of the project.

In our opinion, the proposed methodology and the overall design of the information model can be also applied to the conditions of transport systems in other countries, subject to the necessary adaptation [12, p. 38; 13, p. 635].

REFERENCES

1. Guljaev, A. A. Consideration of the role of ferrous metal industry in the world and Russian economy at present and in the near future in the courses of technological education in educational institutions of the Moscow region [Rassmotrenie roli chernoj metallurgii v mirovoj i rossijskoj ekonomike v nastojashee vremja i v blizhajshej perspective v kursakh tekhnologicheskogo obrazovanija v obrazovatel'nykh uchrezhdenijakh moskovskoj oblasti]. In: Proceedings of the

4th regional scientific and practical conference. Moscow, Diona publ., 2017, pp. 28–34.

2. Khmelev, A. S., Popov, A. T. Review of the railway freight market [Obzor rynka zheleznodorozhnykh gruzoperevosok]. In: School of young scientists on problems of engineering sciences: Collection of proceedings of the regional sectorial seminar. Lipetsk, LSTU, 2018, pp. 298–302.

3. Khmelev, A. S., Popov, A. T. Optimization of the interaction of industrial enterprises and operator companies [Optimizatsija vzaimodejstviya promyshlennogo predpriyatija i operatorskikh kompanij]. In: Infocommunication and intelligent technologies in transport: IITT, 2018. Proceedings of the 1st international scientific and practical conference. Lipetsk, LSTU, 2018, pp. 262–269.

4. On approval of the Rules for calculating the time of delivery of goods, and of empty freight wagons by rail [Ob utverzhdenii Pravil ischeslenija srokov dostavki gruzov, porozhnykh gruzovykh vagonov zheleznodorozhnym transportom]. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 245 dated 07.08.2015. [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_195371. Last accessed 12.05.2019.

5. Igumnov, A. O., Sonkin, D. M. Development of a methodology for prediction of arrival time using statistical and actual data on the movement of vehicles on the principle of pattern selection [Razrabotka metodiki postroenija prognoza vremeni pribytija s ispolzovaniem statisticheskikh i fakticheskikh dannyx o dvizhenii trnsportnykh sredstv po principu podbora shablonov]. Naukovedenie, 2016, Iss. 3, p. 120.

6. Lysikov, M. G., Olshansky, A. M. On some approaches to prediction of arrival of trains at marshalling yard [O nekotorykh podhodakh k prognozirovaniyu pribytija poezdov na sortirovochnye stantsii]. Vestnik transporta Povolzhija, 2014, Iss. 4, pp. 74–81.

7. Ivanov, E. B., Parenkov, A. E. Analytical research in the blast-furnace process using methods of logical modelling [Analiticheskiye issledovanija v oblasti domennogo protsessa s ispolzovaniem metodov logicheskogo modelirovanija]. In: Hardware and software tools of control, monitoring and measurement systems: Proceedings of the conference with international participation. Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2010, pp. 575–578.

8. Grafova, V. F. Net profit and net present value: indicators of efficiency of an investment project [Chistyj dokhod i chistyj diskontirovannyj dokhod – pokazateli otsenki effektivnosti investitsionnogo proekta]. Innovatsii, 2006, Iss. 4, pp. 113–115.

9. Nikitina, L. N., Ozheredov, V. V. Justification of the amount of investments and calculation of indicators of effectiveness of the same for an investment project [Obosnovanije ob'ema investitsij i raschet pokenzatelej ikh effektivnosti dlya investitsionnogo proekta]. Economics and ecological management, 2012, Iss. 2, pp. 556–560.

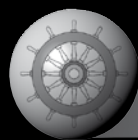
10. Popov, A. T., Voronina, O. V. Estimation of consequences of untimely transport services of shops of the enterprise. World of transport and transportation, 2018, Vol. 16, Iss. 1, pp. 66–81.

11. Markaryan, Yu. A., Shevchenko, E. I., Krikunova, I. V. Assessment of the market of ferrous metals [Otsenka rynka chernykh metallov]. Vector of Economics, 2018, Iss. 3, p. 19.

12. Parunakjan, V., Sizova, E. Designing of logistical chains inside production and transport system of metallurgical enterprise. Transport problems, 2013, Vol. 9, Iss. 1, pp. 35–45.

13. Bowersox, D. J., Closs, D. J. Supply chain logistics management. 2nd ed. Moscow, Olymp-Business publ., 2008, pp. 635–637.





Проблемы развития общественного транспорта в Ереване



Чибухчян Григор Суменович – Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения.*

Григор ЧИБУХЧЯН

Проблемы повышения качества обслуживания общественным городским транспортом, экологии, охраны здоровья населения в крупных городах и мегаполисах заняли ведущее место в повестке дня государственных органов, а также общественных и авторитетных международных организаций.

В этом контексте рассмотрены значение городского общественного транспорта, его современное состояние, проблемы и перспективы развития в г. Ереване.

В Ереване, где проживает большая часть населения Республики Армения, сосредоточена основная экономическая деятельность республики и в наибольшей степени сконцентрирован городской и частный транспорт, общее число транспортных средств в городе в рабочие дни превышает 300 тыс. ед.

Городской общественный транспорт Еревана играет важную роль для обеспечения нормальной жизни жителей и гостей города. В то же время с транспортом связан и целый ряд серьезных социально-экономических проблем, которые обостряются по мере развития экономики и роста объемов грузо- и пассажироперевозок, автомо-

билизации города. В первую очередь, это рост дорожно-транспортных аварий (ДТП) и серьезное ухудшение экологической обстановки в зонах транспортных магистралей и в других городских районах.

В последние годы стало очевидным, что решение данных проблем выходит за пределы компетенции и ответственности мэрии или какого-либо одного министерства и требует сконцентрировать все усилия как государственных органов, так и широких слоёв общества.

Целью исследования является определение основных факторов, влияющих на эффективность и безопасность перевозок городским общественным транспортом, а также факторов воздействия дорожного движения на окружающую среду в г. Ереване.

Их выявление позволит повысить качество транспортного обслуживания и безопасности перевозок, снизить воздействие на окружающую среду, разработать единую эффективную и жизнеспособную систему мероприятий для комплексного решения транспортных проблем общественного городского автотранспорта.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, город Ереван, городской транспорт, грузовые перевозки, пассажирские перевозки, техническое состояние.

*Информация об авторе:

Чибухчян Григор Суменович – аспирант Национального политехнического университета Армении, Ереван, Армения, armenpack@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 01.08.2019, принята к публикации 30.10.2019.

For the English text of the article please see p. 249.

ВВЕДЕНИЕ

По официальным данным уполномоченных органов в сфере статистики государств-членов ЕАЭС в 2018 г. автомобильный транспорт обеспечил около 81,7 % общего объёма перевозок грузов транспортом (без трубопроводного транспорта) и 94,1 % пассажирских перевозок в ЕАЭС [1].

Автомобильный транспорт всё ещё остаётся источником повышенной опасности: по оценкам Всемирного Банка в автоавариях ежегодно погибают 1,25 млн жителей Земли и ещё 50 млн получают травмы [2]. Особое беспокойство вызывает серьёзное ухудшение комфорта проживания в больших городах и мегаполисах, обусловленное растущей автомобилизацией. По данным специалистов к 2050 г. две трети мирового населения (или 5,4 млрд чел.) будет жить именно в городах, многие из которых быстро разрастаются, с вытекающими из этого серьёзными социально-экономическими и экологическими проблемами [3]. В Европе самым автомобилизированным государством является Люксембург, там на тысячу жителей приходится 654 автомобиля. В известной своей автомобильной промышленностью и качественными дорогами Германии этот показатель составляет 556 машин [4]. На тысячу жителей Армении приходится более 200 автомобилей, что очень тревожно, учитывая протяжённость и техническое состояние автодорог в Армении и сравнительно низкую культуру вождения. В 2017 г. в Армении количество зарегистрированных автотранспортных средств составило 554957 ед., с учётом динамики ввозимых транспортных средств эта цифра в 2019 г. составит более 620000 ед., несмотря на то, что общая протяжённость автодорог в республике составляет всего 7575,0 км [5].

В 2017 г. в страну было импортировано около 35 тыс. автомобилей, в 2018 г. — более 64 тыс. [6], а в 2019 г. ожидается трехкратный рост этого количества, при этом больше половины всех автотранспортных средств сконцентрированы в столице Армении, что создаёт большие проблемы для работы городского общественного транспорта. Отметим, что в 2018 г. срок эксплуатации 90 % ввезённых автомобилей был более 10 лет, что создаёт реальную экологическую угрозу.

По показателю смертности в результате дорожно-транспортных происшествий Армения несколько лет назад занимала третье место в мире. Основные причины ДТП — растущее количество автомобилей, превышение скорости, выезд на встречную полосу в условиях почти нулевой видимости, непристёгнутые ремни безопасности, техническое состояние машин и дорог [7].

Целью исследования является определение основных факторов, влияющих на эффективность и безопасность перевозок городским общественным транспортом и дорожного движения, его негативного влияния на окружающую среду в г. Ереване.

При проведении исследования использовались *методы* контент-анализа; для анализа текущей ситуации в сфере общественного транспорта проведён визуальный осмотр подвижного состава.

В статье представлены основные факторы городского общественного транспорта, влияющие на повышение эффективности технической эксплуатации, экологической безопасности и безопасности движения в Ереване.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ереван не только столица Республики Армения (РА) но и крупный социально-экономический и транспортно-логистический центр, через который проходят основные грузовые и пассажирские транспортные потоки РА. Количество жителей Еревана на 1 января 2018 г. достигло 1077,6 тыс. чел., что составляет 36,2 % всех жителей Армении, общая площадь города — 223 км², что составляет 0,7 % площади РА. В экономике г. Еревана основными сферами деятельности являются: промышленность — 40,8 %, сельское хозяйство — 1,2 %, строительство — 47,9 %, розничная торговля — 74,1 %, услуги — 80,7 % [8].

В 2018 г. 84 % грузо- и более 85 % пассажироперевозок осуществлены автомобильным транспортом, значение которого трудно переоценить в социально-экономическом и экологическом плане и с точки зрения обеспечения безопасности на дорогах. Как видно из таблиц 1–4, автомобильный транспорт играет решающую роль в грузо- и пассажироперевозках в Армении и, в частности, в г. Ереване.



Таблица 1

Перевозки пассажиров автомобильным транспортом общего пользования [8]

Регион, страна	Январь—декабрь 2018 г., тыс. чел.	Январь—декабрь 2018 г. к январю—декабрю 2017 г., %
г. Ереван	124 402,8	87,8
Всего в РА	159 037,4	90,5

Таблица 2

Пассажирооборот автомобильного транспорта общего пользования [8]

Регион, страна	Январь—декабрь 2018 г., млн пасс.-км	Январь—декабрь 2018 г. к январю—декабрю 2017 г., %
г. Ереван	1599,6	89,3
Всего в РА	2227,5	92,7

Таблица 3

Основные показатели грузоперевозок автомобильным транспортом [9]

Страна, регион	Перевозки грузов автомобильным транспортом, тыс. тонн (2014—2017 гг.)				Грузооборот автомобильного транспорта, млн т • км (2014—2017 гг.)			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
РА	62722,5	67724,7	78679,1	98579,2	842,6	892,2	942,4	1103,9
г. Ереван	5198,2	6187,7	988,9	5892,2	461,2	477,7	481,2	605,9

Таблица 4

Основные показатели пассажироперевозок автомобильным транспортом [9]

Страна, регион	Перевозки пассажиров автомобильным транспортом, тыс. пасс. (2014—2017 гг.)				Пассажирооборот автомобильного транспорта, млн пасс.-км (2014—2017 гг.)			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
РА	206060,6	188842,7	186170,1	181488,6	2594,4	2453,6	2494,3	2462,9
г. Ереван	163110,3	149786,5	150536,0	143476,3	1845,0	1763,7	1835,4	1794,1

Таблица 5

Общий пробег общественного автомобильного транспорта по отдельным видам, в 2016—2017 гг., млн км [9]

Страна, регион	Грузовые автомобили		Пассажирские автобусы (микроавтобусы)		Легковые автомобили	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017
РА	35,927	48,111	133,257	138,981	47,310	47,789
г. Ереван	23,024	31,312	99,657	103,145	39,573	38,882

Таблица 6

Использование общественных пассажирских автобусов (микроавтобусов) в 2016—2017 гг. [9]

Страна, регион	Количество, автомобиль-день							
	Всего		В работе		Находятся в простоях и в процессе ТО		Находятся в простоях, но технически исправны	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
РА	1281050	1230292	840946	827710	202968	194553	237136	208029
г. Ереван	881352	849090	583187	571544	142920	128609	155245	148937

Значительная часть пробега автомобилей в РА и в г. Ереване приходится на пассажирские автобусы и микроавтобусы, что доказывает их большую значимость в социально-экономической жизни города (табл. 5, 2016—2017 гг.).

Как видно из таблицы 6, до 15—16 % транспорта находится в простоях, что непосредственно влияет на производительность автомобильного транспорта и в конечном итоге — на себестоимость перево-

зок. Одной из основных причин простоев общественного транспорта является неудовлетворительное техническое состояние, что приводит не только к резкому снижению надёжности и работоспособности транспортного средства, но и может стать причиной значительных простоев, а также серьёзных ДТП.

Троллейбусный парк г. Еревана насчитывает 79 ед., из них 20 % находятся в технически неисправном состоянии.

34 ед. марки «Шкода» имеют срок эксплуатации около 27–30 лет, 35 ед. марки «ЛиАЗ» — возраст 9–10 лет и 9 ед. марки «Рено» — срок эксплуатации 20–30 лет [10].

Автобусный парк насчитывает 522 единицы транспортных средств, из них 142 ед. марки «Богдан», срок эксплуатации 77 % которых превышает 10 лет, 195 ед. «Хайгер», срок эксплуатации — 4–6 лет, 75 % микроавтобусов марки «Газель» имеют срок эксплуатации больше 10 лет. Ежемесячные расходы на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) составляют 7,6–9,8 % эксплуатационных расходов.

Высокий износ инфраструктуры и рост заторов приводят к снижению скорости сообщения и качества обслуживания пассажиров: в г. Ереване средняя эксплуатационная скорость автобусов составляет 19–20 км/ч, микроавтобусов — 19–21,5 км/ч, а троллейбусов — всего 14,4 км/ч. В часы пик на наиболее загруженных магистралях скорость снижается до 5–10 км/ч.

Отметим, что средняя скорость движения общественного транспорта в Москве в 2018 г. составила 15,7 км/ч. В 2017 г. средняя скорость движения автобусов и троллейбусов в Минске составила 15–18 км/ч, в г. Астане — 18–21 км/ч, а в Киеве — 14–18 км/час [11].

Для повышения эффективности и безопасности эксплуатации общественного транспорта в г. Ереване необходимо уделить особое внимание имеющимся проблемам.

Проблемы в сфере технического состояния подвижного состава общественного транспорта г. Еревана

Одним из важных факторов, определяющих эффективность работы городского автомобильного транспорта, является техническое состояние и надёжность его подвижного состава. Износ основных фондов автомобильного транспорта превышает 65 %. Это непосредственно приводит к росту расходов на ТОиР, снижению безопасности, надёжности и работоспособности отдельных механизмов, агрегатов и автомобиля в целом, снижению качества транспортного обслуживания, повышению вредных выбросов в окружающую среду и себестоимости перевозок. В процессе эксплуатации подвижного состава необходимо также скорректировать периодичность и регламент выполняемых работ ТО

с учётом особенностей реальных условий эксплуатации, которые часто и резко отличаются друг от друга, в зависимости от маршрута, что позволит повысить показатели надёжности. Отметим, что в последние годы особую значимость приобретают повышение показателей надёжности автотранспортных средств, так как они непосредственно влияют как на технико-эксплуатационные показатели автомобилей, так и на эксплуатационные расходы, качество обслуживания и экологическую безопасность.

Проблемы в сфере негативного воздействия общественного автомобильного транспорта на состояние окружающей среды, здоровье населения и климат г. Еревана

Выбросы вредных веществ в атмосферу РА по опубликованным в 2017 году данным за 2011–2015 гг. составили 291,1 тыс. т., из которых 51,50 % от автотранспорта, 48,5 % — стационарных источников, на долю г. Еревана приходится около 7 % всех выбросов — 19780,4 т. Вредные выбросы на одного жителя Армении составили 47,4 кг, на один км² (без учёта площади озера Севан) — 4,96 т [12].

Немаловажным является также шумовой фон, создаваемый автотранспортом. В последние годы за счёт резкого увеличения количества автотранспортных средств в г. Ереване допустимый уровень шума в центре города увеличился на 25–30 дБ.

Низкий уровень эффективности и безопасности перевозок городского общественного транспорта и дорожного движения, повышение негативного влияния на окружающую среду в г. Ереване обусловлены следующими факторами:

- 1) сравнительно низкой протяжённостью транспортной сети и качеством дорог, препятствующих росту пассажирских перевозок;

- 2) низким качеством горюче-смазочных материалов;

- 3) резким ростом использования личного автотранспорта жителями г. Еревана и пригородных районов;

- 4) низкой эффективностью системы подготовки и повышения квалификации и аттестации, а также мотивации водительского состава;

- 5) низким качеством технического состояния пассажирского транспорта обще-



го пользования, особенно со сроком эксплуатации более 10 лет, обусловленным ограниченным и недостаточным финансированием этого сектора и отсутствием взаимовыгодного и эффективного сотрудничества государства и частного сектора;

б) недостатком современных высокотехнологичных и высокоэффективных систем в сфере организации и регулирования дорожного движения;

7) отсутствием действующей эффективной системы контроля технического состояния автотранспорта в эксплуатации;

8) низкой эффективностью системы периодических технических осмотров [13];

9) сравнительно низкими показателями эффективности ТОиР и качества выполняемых работ;

10) отсутствием системы учёта эксплуатационных условий для организации ТОиР, что очень важно для городского общественного транспорта в г. Ереване [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности работы общественного городского автотранспорта можно обеспечить выполнением необходимых технических, экономических и организационных мероприятий, в частности, по внедрению современной эффективной системы повышения качества ТОиР, надёжности механизмов и агрегатов и работы автомобиля в целом, а также качественным автосервисом с учётом эксплуатационных условий и отдельных факторов, важнейшим назначением которых являются сохранение потребительских качеств [14] и необходимых технико-эксплуатационных свойств транспортных средств, обеспечение безопасности движения и экологической безопасности [15; 16], предупреждение дефектов в работе узлов, агрегатов, двигателя, снижение интенсивности износа узлов и деталей, предотвращение характерных причин появления отказов работы, в целом повышение надёжности работы автотранспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочная информация о деятельности автомобильного транспорта в государствах-членах Евразийского экономического союза в 2018 г. — М., 2019. — 9 с. [Электронный ресурс]: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/energetikaiinfr/transport/Pages/avtotransport.aspx>. Доступ 01.08.2019.

2. Всемирный доклад о предупреждении дорожно-транспортного травматизма: резюме // Под ред. Margie Peden (на русс. яз.). — 2004 (русс. ред. 2013). — 54 с. [Электронный ресурс]: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/85469?show=full>. Доступ 01.08.2019.

3. Блум Д. И. Демографические потрясения // Финансы и развитие. — 2016. — № 1. — С. 6–11. [Электронный ресурс]: <https://www.imf.org/external/russian/pubs/ft/fandd/2016/03/pdf/bloom.pdf>. Доступ 01.08.2019.

4. В Беларуси на 1000 жителей приходится 320 авто. А как у соседей? [Электронный ресурс]: <https://auto.tut.by/news/road/633070.html>. Доступ 01.08.2019.

5. Статистический ежегодник Армении — 2019. Ереван 2019. — 593 с. [Электронный ресурс]: <https://www.armstat.am/ru/?nid=586&year=2019>. Доступ 01.08.2019.

6. Импорт машин в 2018-м резко подскочил: армяне помогли Казахстану — и себя не обидели [Электронный ресурс]: <https://ru.armeniasputnik.am/armenia/20190116/16783932/import-mashin-v-2018-m-rezko-podskochil-armyane-pomogli-kazakhstanu-i-sebya-ne-obideli.html>. Доступ 01.08.2019.

7. Дураки и дороги, дураки на дорогах: как вправить мозги армянским водителям. [Электронный ресурс]: <https://ru.armeniasputnik.am/columnists/20190508/18469432/Statistika-smertey-na-dorogakh-v-Armenii-kak-borotsya-s-razrukhoj-v-golovakh.html>. Доступ 01.08.2019.

8. Социально-экономическое положение Республики Армения в январе—декабре 2018 г. Информационный месячный доклад. — Статистический комитет Республики Армения, 2018. — 283 с. [Электронный ресурс]: <https://www.armstat.am/ru/?nid=82&id=2115>. Доступ 01.08.2019.

9. Марзы Республики Армения и город Ереван в цифрах, 2013–2017 гг. (на английском языке и армянском языке). Статистический комитет Республики Армения: 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.armstat.am/ru/?module=publications&mid=6&id=2077>. Доступ 01.08.2019.

10. Дёшево, надёжно и практично: мэрия Еревана задействует свыше 100 троллейбусов. [Электронный ресурс]: <https://ru.armeniasputnik.am/society/20191104/20984472/Deshevo-nadezhno-i-praktichno-meriya-Erevana-zadeystvuet-svyshe-100-trolleybusov.html>. Доступ 08.11.2019.

11. В Киеве нужно увеличить скорость общественного транспорта, считает депутат столичного горсовета. [Электронный ресурс]: <http://kievvest.com.ua/news/v-kieve-nuzhno-uvlechit-skorost-obshchestvennogo-transporta-schitaet-deputat-stolichnogo-gorsoveta-video>. Доступ 01.08.2019.

12. Environmental statistics of Armenia for 2015 and time-series of indicators for 2011–2015. Statistical booklet, Yerevan, 2017, 39 p.

13. Чибухян С. С., Авагян М. К., Чибухян Г. С. Классификация основных факторов, влияющих на эксплуатационные показатели автомобиля // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. — 2017. — № 2. — С. 78–86.

14. May, A. D., Kelly, Ch., Shepherd, S. The principles of integration in urban transport strategies. Transport Policy, Elsevier, vol. 13, 2016, Iss. 4, pp. 319–327.

15. Figueiredo, L., Jesus, I., Machado, J. A. T., Ferreira, J. R., Martins de Carvalho, J. L. Towards the development of intelligent transportation systems. ITSC2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585), Oakland, CA, 2001, pp. 1206–1211. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948835. Доступ 01.08.2019.

16. Structural impediments to growth in Japan. Edited by Magnus Blomström, Jennifer Corbett, Fumio Hayashi and Anil Kashyap. The University of Chicago Press, 2003. ●



Problems of Development of Public Transport in Yerevan



Chibukhchyan, Grigor S., National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia.*

Grigor S. CHIBUKHCHYAN

ABSTRACT

The problems of improving the quality of public urban transport services, environmental protection, and public health in large cities and megacities have taken the leading place among the issues on the agenda of public administration bodies, as well as of non-governmental and international organisations.

This context determined the study on the significance, modern conditions, problems, and development outlook regarding the urban public transport in Yerevan.

Important part of the population of the Republic of Armenia lives in the city of Yerevan. Main economic activity of the Republic, as well as urban and private transport facilities are most concentrated in the capital city. The total number of vehicles circulating in the city on working days exceeds 300 thousand units.

Urban public transport of Yerevan plays an important role in ensuring the normal life of residents and guests of the city. At the same time, several serious socio-economic problems are associated with transport, which are aggravating

while the economy develops and the volume of cargo, passenger transportation and motorization of the city grows. Such problems, first, include the growth of the number of road traffic accidents, then, serious environmental degradation in the areas adjacent to the highways and in other districts of the city.

In recent years, it has become obvious that the solution to those problems goes beyond the competence and responsibility of the city hall or of any single ministry and requires focusing the efforts of the number of government bodies and of the public at large.

The objective of the study is to identify the main factors affecting the efficiency and safety of urban public transportation, as well as the impact of road traffic on the environment in Yerevan.

Their identification will improve the quality of transport services and transportation safety, as well as reliability of vehicles and of their service properties, reduce their environmental impact, and develop a unified integrated effective and viable system of measures towards a comprehensive and effective solution of transport problems of public urban transport.

Keywords: road transport, Yerevan, urban transport, cargo transportation, passenger transportation, technical condition.

*Information about the author:

Chibukhchyan, Grigor S. – Ph.D. student at the National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia, armenpack@mail.ru.

Article received 01.08.2019; accepted 30.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 244.

Background. According to the official data of the authorized bodies in the field of statistics of the EAEU member states, in 2018, road transport provided about 81,7 % of the total volume of goods transported by transport (excluding pipeline transport) and 94,1 % of passenger transportation in the EAEU [1].

Road transport is still a source of increased danger. According to World Bank estimates, 1,25 million inhabitants of the Earth die every year in car accidents and another 50 million are injured [2]. Growing motorization results in serious deterioration in the comfort of living in large cities and megacities, and that is the issue of concern. According to experts, by 2050, two-thirds of the world population (or 5,4 billion people) will live in cities, many of which are growing rapidly, with serious socio-economic and environmental problems arising from this [3]. In Europe, Luxembourg is the most motorized state, with 654 cars per thousand inhabitants. In Germany, known for its automotive industry and ideal roads, this figure is 556 cars [4]. There are more than 200 cars per thousand inhabitants of Armenia, which is very alarming, given the length and technical condition of roads in Armenia and the relatively low driving culture. In 2017, the number of registered vehicles in Armenia amounted to 554957 units, taking into account the dynamics of imported vehicles, this figure in 2019 will be more than 620000, despite the fact that the total length of roads in the Republic is only 7575,0 km [5].

In 2017, about 35 thousand cars were imported into the country, in 2018 73 thousand vehicles were imported, while in the first half of 2019 more than 70 thousand vehicles were imported [6]. With more than half of all vehicles concentrated in the capital of Armenia, it creates big problems for operation of urban public transport. Let us note that in 2018, the operation life of 90 % of imported cars was above 10 years, which poses a real environmental threat.

In terms of road traffic fatalities, Armenia ranked third in the world several years ago. The main causes of road traffic accidents are a growing number of cars, speeding, exit to the oncoming lane in conditions of almost zero visibility, seatbelts not fastened, and technical condition of cars and roads [7].

Objective. The *objective* of the study is to determine the main factors affecting the efficiency and safety of urban public transport and road traffic, their negative impact on the environment in Yerevan.

Methods. During the study, the methods of content analysis were used; to analyze the current situation in the field of public transport, a visual inspection of rolling stock was carried out.

The article presents the main factors regarding the urban public transport that affect the increase in the efficiency of technical operation, environmental and traffic safety in Yerevan.

Results. Yerevan is not only the capital of the Republic of Armenia, but also a major socio-economic, transport and logistics center; main cargo and passenger transport flows of the Republic of Armenia pass through Yerevan. The number of residents of Yerevan as of January 1, 2018 reached 1077,6 thousand people, which is equal to 36,2 % of all residents of Armenia. The total area of the city is 223 km², which is 0,7 % of the area of the Republic of Armenia. The main areas of economic activity in Yerevan are: industry that represents 40,8 % of the country's industry, agriculture (1,2 %), construction (47,9 %), retail trade (74,1 %), services (80,7 %) [8].

In 2018, 84 % of cargo and more than 85 % of passenger transportation was carried out by road transport, the value of which can hardly be overestimated in socio-economic and environmental terms and in the field of road safety. As can be seen from Tables 1–4, road transport plays a decisive role in cargo and passenger transportation in Armenia and, in particular, in Yerevan.

A significant part of cars' runs in the Republic of Armenia and in Yerevan falls on passenger buses and minibuses, which proves their great significance for the socio-economic life of the city (Table 5, 2016–2017).

As can be seen from Table 6, up to 15–16 % of the vehicles is idle, which directly affects performance of road transport and, ultimately, the cost of transportation. One of the main reasons for downtime of public transport is an unsatisfactory technical condition, which leads not only to a sharp

Table 1

Passenger transportation by road public transport [8]

Region, country	January–December 2018, thous. people	January–December 2018 as compared to January– December 2017, %
City of Yerevan	124 402,8	87,8
Total: the Republic of Armenia	159 037,4	90,5

Table 2

Passenger turnover of road public transport [8]

Region, country	January–December 2018, mln pass.-km	January–December 2018 as compared to January– December 2017, %
City of Yerevan	1599,6	89,3
Total: the Republic of Armenia	2227,5	92,7

Table 3

Key indicators of cargo transportation by road transport [9]

Country, region	Cargo transportation by road transport, thous. tons (2014–2017)				Cargo turnover of road transport, mln t • km (2014–2017)			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
Republic of Armenia	62722,5	67724,7	78679,1	98579,2	842,6	892,2	942,4	1103,9
City of Yerevan	5198,2	6187,7	988,9	5892,2	461,2	477,7	481,2	605,9

Table 4

Key indicators of passenger transportation by road transport [9]

Country, region	Passenger transportation by road transport, thous. pass. (2014–2017)				Passenger turnover of road transport, mln pass.-km (2014–2017)			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
Republic of Armenia	206060,6	188842,7	186170,1	181488,6	2594,4	2453,6	2494,3	2462,9
City of Yerevan	163110,3	149786,5	150536,0	143476,3	1845,0	1763,7	1835,4	1794,1

decrease in reliability and performance of a vehicle and can cause significant downtime but can result also in serious accidents.

Yerevan's trolleybus fleet totals 79 units, of which 20 % are in a technically malfunctioning state. 34 units of SKODA brand have an operation life of about 27–30 years, 35 units of LIAZ brand are 9–10 years old, and 9 units of RENAULT brand have operation life of 20–30 years [10].

The bus fleet totals 522 units of vehicles, including 142 units of BOGDAN brand, operation life of 77 % of which exceeds 10 years, 195 units of Haiger brand, operation life is 4–6 years, 75 % of GAZEL minibuses have an operation life of more than 10 years. Monthly expenses for technical maintenance and repair account for 7,6–9,8 % of operating costs.

High deterioration of infrastructure and increased congestion lead to a decrease in speed and in quality of passenger service. In Yerevan, average operating speed of buses is 19–20 km/h, of minibuses have average speed of 19–21,5 km/h, and trolley buses of only 14,4 km/h. At peak hours, on the busiest highways, speed decreases to 5–10 km/h.

Let us note that average speed of public transport in Moscow in 2018 was 15,7 km/h. In 2017, average speed of buses and trolleybuses in Minsk was 15–18 km/h, in Astana it attained 18–21 km/h, and in Kiev 14–18 km/h [11].

In order to increase efficiency and safety of operating public transport in Yerevan, special attention must be paid to the existing problems.



Table 5

Total mileage of road public transport for certain types of vehicles, in 2016–2017, mln km [9]

Country, region	Trucks		Passenger buses (minibuses)		Passenger cars	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017
Republic of Armenia	35,927	48,111	133,257	138,981	47,310	47,789
City of Yerevan	23,024	31,312	99,657	103,145	39,573	38,882

Table 6

Public passenger buses (minibuses) in 2016–2017 [9]

Country, region	Quantity, car-day							
	Total		In work		Are in downtime and in the process of technical maintenance		Are in downtime, but technically sound	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
Republic of Armenia	1281050	1230292	840946	827710	202968	194553	237136	208029
City of Yerevan	881352	849090	583187	571544	142920	128609	155245	148937

Problems in technical condition of public transport vehicles in Yerevan

One of the important factors determining efficiency of urban road transport is technical condition and reliability of the vehicles. Depreciation of fixed assets of road transport exceeds 65 %. This directly leads to an increase in costs of technical maintenance and repair, a decrease in safety, reliability and operability of individual mechanisms, assemblies and a car as a whole, a decrease in quality of transport services, an increase in harmful emissions, and cost of transportation. During operation of rolling stock, it is also necessary to adjust frequency and schedule of technical maintenance operations taking into account peculiarities of actual operating conditions, which often and sharply differ from each other, depending on the route, and respecting those conditions will improve reliability indicators. It should be noted that in recent years, increasing reliability of vehicles has become of particular importance, since it directly affects both technical and operational performance of vehicles, as well as operating costs, quality of service and environmental safety.

Problems in the field of negative impact of public road transport on the environment, public health, and the climate of Yerevan

According to 2011–2015 data published in 2017, emissions of harmful substances into the atmosphere of the Republic of Armenia amounted to 291,1 thousand tons, of which 51,50 % are from motor vehicles, 48,5 % are

from stationary sources. About 7 % of all harmful emissions were produced in the city of Yerevan and accounted for 19780,4 tons. Harmful emissions per inhabitant of Armenia amounted to 47,4 kg, or 4,96 tons per km² (excluding the area of Lake Sevan) [12].

Equally important is noise background created by vehicles. In recent years, due to a sharp increase in the number of vehicles in Yerevan, the permissible noise level in the city center has increased by 25–30 dB.

The low level of efficiency and safety of urban public transport and road traffic, an increase in the negative impact on the environment in Yerevan are due to the following factors:

1) relatively low length of the transport network and the existing quality of roads that impede the growth of passenger transportation;

2) low quality of fuels and lubricants;

3) sharp increase in the use of personal vehicles by residents of Yerevan and suburban areas;

4) low efficiency of the system of training, advanced training, and certification, as well as motivation of drivers;

5) low quality of technical condition of public passenger transport, especially of vehicles with an operation life of more than 10 years, due to limited and insufficient financing of this sector and the lack of mutually beneficial and effective cooperation between the public and the private sector;

6) lack of modern high-tech and highly efficient systems in the field of organization and regulation of traffic;

7) lack of an effective system for monitoring the technical condition of vehicles in operation;
8) low efficiency of the system of periodic technical inspections [13];

9) relatively low efficiency of technical maintenance, repair and quality of work performed;

10) lack of a system that would consider operating conditions for better organization of technical maintenance and repair, while it is very important for urban public transport in Yerevan [13].

Conclusion. Improving the efficiency of public urban transport can be ensured by implementation of necessary technical, economic and organizational measures, in particular, by introducing a modern effective system intended to improve quality of technical maintenance and repair, reliability of mechanisms and assemblies and operation of a car as a whole, as well as by introduction of high-quality car service, taking into account operational conditions and individual factors. The most important purpose of the car service is to preserve consumer qualities [14], necessary technical and operational properties of vehicles providing thus better conditions for respect of traffic safety and environmental safety [15, 16], to prevent defects in components, assemblies, engine, possible causes of failure characteristic of the work, to reduce wear rate of parts and components, and on the opposite to achieve the increase in reliability of vehicles.

REFERENCES

1. Background information on activities of road transport in the Member States of the Eurasian Economic Union in 2018 [*Spravochaya informatsiya o deyatel'nosti avtomobil'nogo transporta v gosudarstvakh-chlenakh Evraziyskogo ekonomicheskogo soyuza v 2018*]. Moscow, 2019, 9 p. [Electronic resource]: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/energetikaiinf/transport/Pages/avtotransport.aspx>. Last accessed 01.08.2019.
2. World report on road traffic injury prevention: Summary [*Vsemirnyy doklad o preduprezhdenii dorozhno-transportnogo travmatizma: rezюме*]. Ed. by Margie Peden, 2004. Russian edition, 2013, 54 p. [Electronic resource]: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/85469?show=full>. Last accessed 01.08.2019.
3. Bloom, D. I. Demographic shocks [*Demograficheskie potryaseniya*]. *Finansy i razvitiye*, 2016, Iss. 1, pp. 6–11.
4. In Belarus, there are 320 cars per 1000 inhabitants. What about the neighbors? [*V Belarusi na 1000 zhitelei prikhoditsya 320 avto. A kak u sosedey?*]. [Electronic resource]: <https://auto.tut.by/news/road/633070.html>. Last accessed 01.08.2019.
5. 2019 Statistics Yearbook of the Republic of Armenia [*Statisticheskiy ezhegodnik Respubliki Armeniya 2019*]. Statistical Committee of the Republic of Armenia, 2019, 593 p. [Electronic resource]: <https://www.armstat.am/ru/?nid=586&year=2019>. Last accessed 01.08.2019.
6. Imports of vehicles has sharply increased in 2018: the Armenians helped the Kazakhstan and this without damaging proper interests [*Import mashin v 2018-m rezko podskochil: armiane pomogli Kazakhstanu — i sebja ne obideli*]. [Electronic resource]: <https://ru.armeniasputnik.am/armenia/20190116/16783932/import-mashin-v-2018-m-rezko-podskochilarmyane-pomogli-kazakhstanu-i-sebja-ne-obideli.html>. Last accessed 01.08.2019.
7. Fools and the roads, fools on the roads: how to knock some sense into the heads of Armenian drivers [*Duraki i dorogi, duraki na dorogah: kak vpravit' mozgi armianskim voditeliam*]. [Electronic resource]: <https://ru.armeniasputnik.am/columnists/20190508/18469432/Statistika-smertey-na-dorogakh-v-Armenii-kakborotsya-s-razrukhoy-v-golovakh.html>. Last accessed 01.08.2019.
8. Social and economic situation in Republic of Armenia in January to December 2018. Information monthly report [*Sotsialno-ekonomicheskoe polozhenie Respubliki Armenia v yanvare-dekabre 2018 g. Informatsionnyi ezheimesiachnyy doklad*]. Statistical Committee of the Republic of Armenia, 2018, 283 p. [Electronic resource]: <https://www.armstat.am/ru/?nid=82&id=2115>. Last accessed 01.08.2019.
9. Regions [Marzy] of the Republic of Armenia and the city of Yerevan in figures, 2013–2017 rr. (in Armenian and English). Statistical Committee of the Republic of Armenia, 2018. [Electronic resource]: <https://www.armstat.am/ru/?module=publications&mid=6&id=2077>. Last accessed 01.08.2019.
10. It is cheap, reliable and practicable: the Yerevan city council puts into operation more than 100 trolley buses [*Deshevo, nadezhno i praktichno: Meriya Erevana zadeystvuet svyshe 100-trolleybusov*]. [Electronic resource]: <https://ru.armeniasputnik.am/society/20191104/20984472/Deshevo-nadezhno-i-praktichno-meriyaErevana-zadeystvuet-svyshe-100-trolleybusov.html>. Last accessed 08.11.2019.
11. In Kiev, it is necessary to increase speed of public transport, said the deputy of the capital city council [*V Kieve nuzhno uvelichit' skorost' obshchestvennogo transporta, schitaet deputat stolichnogo gorsoveta*]. [Electronic resource]: <http://kievvest.com.ua/news/v-kieve-nuzhno-uvelichit-skorost-obshchestvenno-go-transporta-schitaet-deputat-stolichnogo-gorsoveta-video>. Last accessed 01.08.2019.
12. Environmental statistics of Armenia for 2015 and time-series of indicators for 2011–2015. Statistical booklet. Yerevan, 2017, 39 p.
13. Chibukhchyan, S. S., Avagyan, M. K., Chibukhchyan, G. S. Classification of main factors affecting performance of a car [*Klassifikatsiya osnovnykh faktorov, vliyayushchikh na ekspluatatsionnye pokazateli avtomobilya*]. *Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Mechanics, Mechanical Engineering, Mechanical Engineering*, 2017, Iss. 2, pp. 78–86.
14. May, A. D., Kelly, Ch., Shepherd, S. The principles of integration in urban transport strategies. *Transport Policy*, Vol. 13, 2016, Iss. 4, pp. 319–327.
15. Figueiredo, L., Jesus, I., Machado, J. A. T., Ferreira, J. R., Martins de Carvalho, J. L. Towards the development of intelligent transportation systems. ITSC2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585), Oakland, CA, 2001, pp. 1206–1211. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948835. Last accessed 01.08.2019.
16. Structural impediments to growth in Japan. Edited by Magnus Blomström, Jennifer Corbett, Fumio Hayashi and Anil Kashyap. The University of Chicago Press, 2003. ●





Вопросы проектирования и реформирования маршрутных сетей городского наземного пассажирского транспорта общего пользования



Филипп АКОПОВ



Анастасия ХОРОШИЛОВА



Юлия ФАДДЕЙКИНА

Акопов Филипп Витальевич — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

Хорошилова Анастасия Дмитриевна — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

Фаддейкина Юлия Сергеевна — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*.

Городской пассажирский транспорт общего пользования, являясь важнейшим элементом социальной инфраструктуры мегаполисов, оказывает прямое воздействие на качество жизни населения, раскрытие градостроительного и социально-экономического потенциала. Эффективность работы городского транспорта напрямую зависит от правильного выбора и проектирования его маршрутов.

Целью данного исследования было на базе обзора существующих методов проектирования маршрутных сетей городского пассажирского транспорта общего пользования разработать усовершенствованную методику, позволяющую реформировать действующие маршрутные сети.

Проведён анализ методов проектирования маршрутных сетей, определены их достоинства и недостатки. Предложена усовершенствованная методика проектирования маршрутных сетей, направленная на возможность решения задач реформирования действующих маршрутных сетей и практическую реализацию полученных результатов с учётом имеющихся ограничений.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, городской пассажирский транспорт, маршрутная сеть, реформирование.

В основу методики проектирования маршрутных сетей городских районов и малых городов положена модель улично-дорожной сети, представленная в виде детализированного графа с последующим рассмотрением массивов связей всех вершин графа с несколькими пунктами тяготения. Для построения графа используется геоинформационная система QGIS, что позволяет анализировать, визуализировать и обеспечивать лёгкую и удобную работу с детализированным графом транспортной сети городского района.

Определение рациональных путей проезда между пунктами отправления и тяготения проводится методом направленного отбора вариантов по критерию минимума затрат времени на движение. Формирование маршрутов осуществляется по принципу включения в маршрут наибольшего количества пунктов (вершин графа).

Применение методики позволит учитывать изменение спроса населения на транспортные услуги, вносить коррективы в действующую маршрутную сеть, тем самым удовлетворяя потребность населения в перевозках и повышая эффективность работы городских транспортных сетей и автотранспортных предприятий.

*Информация об авторах:

Акопов Филипп Витальевич — старший преподаватель кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, ap912@yandex.ru.

Хорошилова Анастасия Дмитриевна — магистрант кафедры автомобильных перевозок МАДИ, Москва, Россия, anastasiamadi@yandex.ru.

Фаддейкина Юлия Сергеевна — магистрант кафедры автомобильных перевозок МАДИ, Москва, Россия, juli4@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 21.04.2019, принята к публикации 23.07.2019.

For the English text of the article please see p. 261.

ВВЕДЕНИЕ

Городской пассажирский транспорт общего пользования (ТОП) является важнейшим элементом социальной инфраструктуры, влияющим на качество жизни населения, эффективность работы отраслей экономики города, возможность максимального использования её градостроительного и социально-экономического потенциала [1–5]. Анализ исследований в области пассажирских автомобильных перевозок, включая труды кафедры «Автомобильные перевозки» МАДИ [1; 2; 4; 5], позволяет сделать вывод, что городской пассажирский транспорт общего пользования должен обеспечивать максимальную транспортную доступность для жителей всей территории города с учётом её перспективного развития. А это, в свою очередь, предопределяет необходимость проектирования новых и реформирования действующих маршрутных сетей городского пассажирского транспорта [6; 7].

Необходимость реформирования маршрутной сети обусловлена следующими факторами:

1. Неравномерность пассажиропотоков на линиях маршрутной сети.
2. Территориальное увеличение городских районов.
3. Организация новых пунктов тяготения (строительство станций внеуличного транспорта, открытие новых торгово-развлекательных центров и др.).
4. Изменения в городской инфраструктуре (строительство новых дорог, мостов и т.д.).

Анализ методов проектирования и реформирования маршрутных сетей городского наземного пассажирского транспорта

Международный опыт проектирования маршрутных сетей разнообразен и касается различных аспектов: планирования мультимодальных систем ТОП отдельных городов, автобусных и внутригородских железнодорожных маршрутов, влияния аспектов доступности, перемещения работающих жителей к месту работы и обратно на развитие городской транспортной сети, преимуществ и недостатков полицентрических схем и многих других вопросов.

Так, анализ зарубежных исследований в рассматриваемой области показывает необходимость:

1) интеграции систем городского пассажирского транспорта: обеспечение взаимодействия различных видов транспорта, элементов маршрутных сетей и инфраструктуры, градостроительства, окружающей среды и социальной политики [8–10];

2) комплексного подхода при проектировании и функционировании транспортных систем, заключающегося в обеспечении совместимости и координации систем различных видов транспорта, а также технических, технологических, организационных, экономических, экологических, правовых, информационных подсистем [11–13].

В исследованиях отмечено влияние оценки спроса на транспортные услуги и прогнозирования корреспонденций населения на параметры работы транспортных систем и маршрутных сетей. Приведена роль анкетирования различных социальных групп населения при определении спроса на транспортные услуги. Определены факторы, влияющие на пользование общественным пассажирским транспортом [14].

Рассмотрены вопросы реформирования действующих маршрутных сетей в части отмены, расширения, изменения маршрутов, проектирования инфраструктуры, корректировки расположения остановочных пунктов, ликвидации необоснованного дублирования маршрутов, проектирования совместных трамвайно-автобусных сетей, создания мультимодальных транспортных систем, внедрение новых видов транспорта и оценка их влияния на работу транспортной системы, исследование зависимости спроса на транспортные услуги от количества пересадок и времени на пересадки. Предложено моделирование транспортной системы с использованием инструмента макромониторинга Visum [10].

При проектировании сетей рекомендован учёт таких факторов, как надёжность, устойчивость, мощность, ограничения на пропускную способность и нагрузку сети, экономические ограничения. Рассмотрены различные методы и модели сетевого проектирования [15].

Отмечен комбинаторный характер задач проектирования сетей, предполагающий рассмотрение большого количества вариантов. Выделены этапы проектирования маршрутных сетей: оценка спроса, дислокация остановочных пунктов, составление матри-



цы корреспонденций, выбор эффективных маршрутов. Рассмотрен принцип маршрутизации с ограничением времени на проезд априорно заданных остановок [16].

Предложен метод моделирования дискретных событий при решении задачи реформирования маршрутных сетей, позволяющий учитывать динамический характер автобусных маршрутов и вносить изменения в действующую маршрутную сеть [17].

Таким образом, международный опыт показывает, что решение задач проектирования и оптимизации маршрутных сетей может быть выполнено с помощью комплекса аналитических, математических, теоретико-вероятностных и программных методов.

Эта тема привлекала внимание и российских исследователей. Существует ряд работ, основные положения которых могут быть использованы при решении задач в области проектирования и реформирования маршрутных систем городского пассажирского транспорта. Сюда можно отнести работы Б. Л. Геронимуса и Д. Д. Джумаева [18], Г. А. Варелопуло [19], Э. А. Сафронова [20], М. В. Хрущёва [21]. Однако предлагаемые в данных исследованиях методы не в полной мере отражают современные реалии, не учитывают все необходимые ограничения и, следовательно, позволяют получать «грубые» варианты решения, представляющие сложность практической реализации.

Впервые комплексная задача проектирования маршрутной сети городского пассажирского транспорта была решена в 60-е годы специалистами НИИАТ [18]. Метод комбинаторного анализа являлся базисным, так как предусматривал принцип направленного отбора вариантов для поиска оптимального решения. Были предложены различные критерии оптимизации, в том числе суммарные затраты времени всех пассажиров сети на передвижения, включающие затраты времени на пешие переходы [21], ожидание и поездку в транспорте, пересадки между маршрутами. Основными недостатками методики является отсутствие ограничений, высокие затраты времени и трудоёмкость расчётов ввиду необходимости ручного расчёта большого количества вариантов.

Метод, предложенный в 90-е годы прошлого века главным инженером Службы движения Управления пассажирского транспорта Мосгорисполкома Г. А. Варелопуло

[19], заключается в том, что для транспортной сети, представленной в виде графа: совокупности вершин (центров микрорайонов) и рёбер (транспортных проездов), по которым можно организовать движение пассажирского транспорта, определялись рациональные по времени пути проезда (транспортные связи). Затем, на основе полученного массива связей, осуществлялось построение маршрутов с учётом включения в каждый маршрут максимально возможного количества вершин. При этом устанавливался ряд ограничений, позволяющих сократить количество рассматриваемых вариантов. Для расчётов была разработана специальная программа на ЭВМ. Недостатками данного метода являются сложность практической реализации вследствие получения большого числа маршрутов и недостаточное количество ограничений. Например, не учитываются ограничения на пропускную способность улично-дорожной сети и транспортных узлов. Кроме того, данная методика предполагает проектирование маршрутной сети с нуля, не предусматривая реформирование действующих маршрутных сетей.

М. В. Хрущёв [21] предложил разделение методов маршрутизации на две группы в зависимости от уровня решаемых задач, а именно методы общей маршрутизации (основной из них является поиск оптимального варианта схемы автобусных маршрутов) и методы локальной маршрутизации (корректировка отдельно взятых маршрутов). Автор был убеждён, что приемлемых результатов можно добиться только при комбинировании подходов на разных этапах формирования рациональной маршрутной схемы [1].

Преимущества данного подхода: использование различных методов решения задач маршрутизации в зависимости от поставленной цели; высокая точность полученных результатов и возможность оптимизации действующих маршрутов за счёт ориентации на данные о корреспонденциях населения; возможность выбора наилучшего варианта маршрутной схемы, исходя из критерия качества перевозок пассажиров; проверка целесообразности функционирования разработанной маршрутной схемы.

К недостаткам можно отнести: отсутствие значимых ограничений, позволяю-

щих уменьшить количество сравниваемых вариантов маршрутных сетей [1]; применение данных методов возможно при наличии устойчивых связей между районами города.

Совершенствование методов проектирования и реформирования городских маршрутных сетей

Проектирование и реформирование маршрутных сетей должны осуществляться в строгом соответствии с положениями законодательной и нормативно-правовой базы, что необходимо учитывать при выборе критериев и ограничений в задаче, а также при анализе разработанного или оптимизированного варианта маршрутной сети. На территории московского региона необходимо руководствоваться следующими документами и актами:

1. СНиП. Часть II. Нормы строительного проектирования (1954 г.) — носит рекомендательный характер, потому что утратил юридическую силу.

2. «Градостроительный кодекс Российской Федерации» от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ (ред. от 02.08.2019 г. с изм. и доп., вступ. в силу с 13.08.2019 г.).

3. СНиП 11-60-75 «Планировка и застройка городов, посёлков и сельских населённых пунктов».

4. СНиП 2.07.01-89 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений».

5. СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89.

6. Нормы и правила проектирования планировки и застройки Москвы МГСН 1.01-99.

7. Постановление Правительства Москвы от 23.12.2015 г. № 945-ПП «Об утверждении региональных нормативов градостроительного проектирования города Москвы в области транспорта, автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения».

Анализ существующих методов проектирования маршрутных сетей определяет необходимость:

- разграничения методов в зависимости от размеров объекта исследования и поставленной цели;

- совершенствования методов с целью обеспечения возможности практической реализации результатов.

Необходимость совершенствования методик проектирования маршрутных сетей вызвана следующими факторами:

1) при выборе методики реформирования необходимо учитывать размеры территории городов или районов, наличие устойчивых пассажиропотоков к пунктам тяготения;

2) для решения задач реформирования маршрутных сетей необходимо изменение способа получения корреспонденций;

3) существующие методики проектирования маршрутных сетей позволяют получить теоретическую модель, которую сложно реализовать на практике;

4) для возможности практической реализации результатов реформирования необходимо введение дополнительных ограничений.

В случае проектирования маршрутных сетей средних и больших городов целесообразно использовать укрупнённый метод, основанный на составлении матрицы межрайонных корреспонденций и выборе маршрутов с учётом заданных критериев и ограничений. При этом каждый район города будет представлен единым адресом корреспонденции, являющимся условным «центром тяжести» этого района. Это позволит существенно сократить количество рассматриваемых вариантов и даст возможность последующей корректировки разработанных маршрутов.

При решении задач реформирования маршрутных сетей необходимо изменить способ получения корреспонденций. В данном случае прогноз корреспонденций будет осуществляться не по данным района-аналога или на основе расчёта транспортной подвижности населения, как это возможно при проектировании новых сетей, а по результатам обследования пассажиропотоков действующей маршрутной сети. При прогнозировании корреспонденций необходимо также учитывать пропускную способность и загрузку транспортно-пересадочных узлов, наличие новых пунктов тяготения (мест приложения труда, культурно-бытовых объектов и объектов массового посещения, станций внеуличного транспорта и т.д.).





Рис. 1. Этапы проектирования и реформирования маршрутных сетей городских районов и малых городов.



Рис. 2. Исходные данные в задачах проектирования и реформирования маршрутных сетей.

Для возможности практической реализации проектного варианта маршрутной сети требуется введение дополнительных ограничений, способствующих сокращению количества маршрутов, полученных на этапе проектирования и учитывающих допустимую провозную возможность маршрута, нагрузку на улично-дорожную сеть (УДС), требуемый уровень качества обслуживания пассажиров, степень неравномерности пассажиропотоков и эффективность использования подвижного состава [19; 22].

Однако, существующие методы проектирования и реформирования маршрутных сетей не в полной мере учитывают необходимые ограничения, что приводит к трудностям практической реализации полученных результатов.

При проектировании маршрутных сетей городских районов и малых городов за основу может быть взята модель улично-дорожной сети, представленная в виде детализированного графа с последующим рассмотрением массивов связей всех вершин графа с несколькими пунктами тяготения (рис. 3).

Для построения графа можно использовать геоинформационную систему QGIS —

удобный инструмент, который позволяет загружать карту города, выбирать масштаб, быстро и наглядно строить, редактировать вершины и отрезки (участки улично-дорожной сети) поверх загруженной карты, измерять протяжённость дорог, улиц, построенных графов в масштабе и многое другое. Благодаря этому можно анализировать, визуализировать и обеспечивать лёгкую и удобную работу с детализированным графом транспортной сети городского района.

Определение рациональных путей проезда между пунктами отправления и тяготения проводится методом направленного отбора вариантов по критерию минимума затрат времени на движение. Формирование маршрутов осуществляется по принципу включения в маршрут наибольшего количества пунктов (вершин графа) [19].

Корректировка полученных на начальных этапах маршрутов проводится, исходя из следующих условий:

1. Запрет организации маршрутов по отдельным участкам улично-дорожной сети. В соответствии с действующими на территории г. Москвы нормами [23; 24], ширину полосы движения для наземного массового пассажирского транспорта следует принимать равной 3,75 м. Ширину местных проездов при организации по ним движения массового пассажирского транспорта следует принимать: при одностороннем движении — 10,5 м; при двустороннем движении — 11,25 м.

2. Запрет организации конечных пунктов маршрутов при отсутствии технической возможности строительства отстойно-разворотной площадки (ОРП). Возможным решением является продление трассы маршрута в пункт с ОРП, либо организация оборота подвижных единиц путём кольцевого движения с сохранением направления вывоза основного пассажиропотока (рис. 4).

При продлении трассы маршрута возникает ситуация, когда одна и та же связь обслуживается более чем одним маршрутом с разным временем движения. Для распределения пассажиропотоков между этими маршрутами может быть принято условие, что количество пассажиров, отнесённое к маршруту, обратно пропорционально времени движения:

$$K_i = \frac{\sum t_m}{t_m}; P_{S_m} = P_s \cdot \frac{K_i}{\sum K_i},$$

где K_i — коэффициент распределения пассажиров по времени;

t_m — время поездки пассажиров совместной связи при использовании m -го маршрута, мин.

3. Установление предельно допустимых значений максимального пассажиропотока на участках маршрута. Определяются исходя из максимально и минимально допустимой частоты (интервалов) движения, ограниченных пропускной способностью УДС и необходимым уровнем качества обслуживания пассажиров, а также максимального и минимального значения номинальной вместимости подвижного состава, которым располагает транспортное предприятие, обслуживающее маршрутную сеть:

$$Q_{jmax}^{min} = \frac{q_{jmin} \cdot 60}{I_{max}}; Q_{jmax}^{max} = \frac{q_{jmax} \cdot 60}{I_{min}},$$

где q_{jmin} и q_{jmax} — минимальная и максимальная номинальная вместимость подвижных единиц, чел.;

I_{max} , I_{min} — максимальное и минимальное допустимое значение интервала движения подвижных единиц в «пиковые» часы, мин.

В случае, если расчётное значение максимального пассажиропотока на маршруте превышает допустимый диапазон, возможны следующие решения:

1) организация полужэкспрессного движения на маршруте (при наличии дублирующих маршрутов на данном направлении, имеющих запас провозной возможности) (рис. 5);

2) организация дополнительного укороченного маршрута на максимально загруженном участке (рис. 5).

В случае, если расчётное значение максимального пассажиропотока на маршруте ниже допустимого диапазона, возможны следующие решения:

1) исключение маршрута с распределением пассажиров между ближайшими соседними пунктами отправления (вершинами ГТС). В этом случае необходимо учитывать действующие региональные нормативы на длину пешеходных подходов.

Для города Москвы расстояния от останочных пунктов наземного транспорта



Рис. 3. Пример детализированного графа транспортной сети городского района.

не должны превышать: до мест проживания или мест приложения труда — 400 м; до торговых центров, универмагов, гостиниц, поликлиник — 150 м; до прочих объектов — 400 м [23, 24];

2) исключение маршрута и организация сообщения с пересадкой (при наличии альтернативных маршрутов, имеющих запас провозной возможности).

4. Объединение маршрутов, полученных на первоначальных этапах.

Проводится в следующих случаях:

1) трасса одного маршрута является продолжением трассы другого маршрута;

2) трассы маршрутов имеют высокую степень наложения;

3) трасса одного маршрута является составной частью другого (за исключением случаев организации дополнительного укороченного маршрута).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемая усовершенствованная методика проектирования и реформирования маршрутных сетей малых городов и городских районов предусматривает:

1. Разделение способов получения прогнозных значений корреспонденций для задач проектирования и реформирования.

2. Учёт требований к параметрам УДС при планировании маршрутов.

3. Учёт различных вариантов оборота подвижных единиц в конечных пунктах маршрутов.

4. Установление ограничений на величину максимального пассажиропотока с учётом возможностей транспортной системы и качества обслуживания пассажиров.



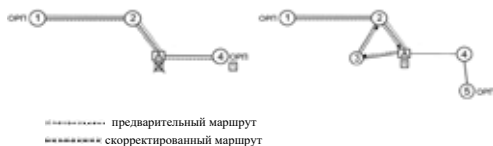


Рис. 4. Варианты корректировки маршрута при отсутствии возможности организации ОРП.

5. Учёт временного фактора при распределении пассажиров между альтернативными маршрутами.

6. Мероприятия по снижению расчётных значений пассажиропотоков.

7. Возможность сокращения количества рассматриваемых маршрутов путём их объединения и исключения с учётом соблюдения нормативов на транспортную доступность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынова Ю. А. Анализ опыта проектирования рациональных маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // Интернет-журнал «Науковедение». — 2017. — № 2 — С. 125.
2. Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок. — М.: Высшая школа, 1980. — 535 с.
3. Блудян Н. О., Рошин А. И., Антонов М. Н. К вопросу минимальных социальных стандартов транспортного обслуживания населения. Депонированная рукопись № 754-B2009 30.11.2009 г.
4. Пистун Е. И., Блудян Н. О., Мороз Д. Г., Хейфиц П. И. Агломерационные проблемы организации эффективной транспортной системы // Автоматизация и управление в технических системах. — 2014. — № 2. — С. 3–13.
5. Спирин И. В. Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками. — 7 изд. — М.: Академия, 2012. — 400 с.
6. Блудян Н. О. К концепции развития транспортного обслуживания населения в Московском регионе // Автотранспортное предприятие. — 2009. — № 2. — С. 11–13.
7. Блудян Н. О., Мороз Д. Г., Хейфиц П. И. Территориально-транспортное прогнозирование и планирование в Московской агломерации // Автотранспортное предприятие. — 2014. — № 2. — С. 18–21.
8. Noor Ashikin Abd Rahman, Yusfida Ayu Abdullah. Theorizing the concept of urban public transportation institutional framework in Malaysia. MATEC Web of Conferences, 2016, Vol. 66, pp. 2–6.
9. Mrníková, M., Poliak, M., Šimurková, P., Hernandez, S., Reuter, N. How important is the integration of public passenger transport. Scientific Journal on Transport and Logistics, 2017, Vol. 2, pp. 59–68.
10. Solecka, K., Zak, J. Integration of the urban public transportation system with the application of traffic simulation. Transportation Research Procedia, 2014, Vol. 3, pp. 259–268.
11. Rajsman, M., Horvat, R., Rajsman, M. Public urban passenger transport as important factor in the

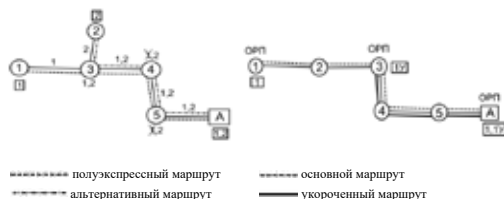


Рис. 5. Варианты корректировки маршрута с организацией полуксепрессного движения и дополнительного укороченного маршрута.

development of cities. Journal of Traffic and Logistics Engineering, 2014, Vol. 3, pp. 172–175.

12. Motta, R., Silva, P., Santos, M. Crisis of public transport by bus in developing countries: A case study from Brazil. International Journal of Sustainable Development and Planning, 2013, Vol. 3, pp. 348–361.

13. Francesc, L. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks. A survey. SORT (Statistics and Operations Research Transactions), 2014, Vol. 38, pp. 181–214.

14. Kumar, G., Kaur, A., Singh, K. K. Public Transport and urban mobility: Perception of people on services of public transport in Bathinda City, Punjab, India. International Research Journal of Social Sciences, 2014, Vol. 3, pp. 8–14.

15. Gendrona, B. Decomposition methods for network design. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2011, Vol. 20, pp. 31–37.

16. Eiróia, T., Viegasa, J. M., Martíneza, L. M. A new optimisation procedure to design minibus services an application for the Lisbon Metropolitan Area. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2011, Vol. 20, pp. 856–865.

17. Pereira, W. I., Chwif, L. Generic bus route simulation model and its application to a new bus network development for caieiras city, Brazil. Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, 2018, pp. 122–134.

18. Геронимус Б. Л., Джумаев Д. Д. Математико-статистический метод выборочного обследования пассажиропотоков // Автомобильный транспорт. — 1966. — № 4. — С. 43–44.

19. Варелопуло Г. А. Организация движения и перевозок на городском транспорте. — М.: Транспорт, 1990. — 208 с.

20. Сафронов Э. А. Транспортные системы городов и регионов: Учеб. пособие. — М.: ACB, 2005. — 272 с.

21. Хрущёв М. В. Методы общей и локальной маршрутизации автобусного транспорта в городах: Монография. — М.: Государственный университет управления, 1999. — 168 с.

22. Спирин И. В., Беляев В. М., Антонова В. В. Методология планирования автомобильных пассажирских перевозок // Мир транспорта. — 2019. — № 1. — С. 20–37.

23. Постановление Правительства Москвы от 23.12.2015 г. № 945-ПП «Об утверждении региональных нормативов градостроительного проектирования города Москвы в области транспорта, автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения».

24. Нормы и правила проектирования планировки и застройки Москвы МГСН 1.01-99. ●



Issues of Designing and Restructuring the Route Networks of Public Passenger Urban Ground Transport



Philipp V. AKOPOV



Anastasia D. KHOROSHILOVA



Yuliya S. FADDEYKINA

*Akopov, Philipp V., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia.
Khoroshilova, Anastasia D., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia.
Faddeykina, Yuliya S., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia*.*

ABSTRACT

The urban passenger public transport as an important element of social infrastructure of megalopolises directly influences the quality of life of city residents, development of town-planning, social and economic potential. Efficiency of urban transport directly depends on the right choice and well-sought designing of its routes.

The objective of the research was to develop based on the overview of existing methods for designing route networks of urban public passenger transport an updated technique allowing to restructure existing routes.

The analysis of route network design methods permitted to reveal their advantages and disadvantages. An improved methodology for designing route networks is proposed, aimed at solving the problems of restructuring existing route networks and at practical implementation of the results considering existing constraints.

The technique to design route networks of city districts and of small towns is based on the model of road and street

network, shown as a detailed graph with subsequent consideration of the arrays of connections of all the vertices of the graph with several points of gravity. QGIS geoinformatics software used to build the graph allows to analyze, visualize, and facilitate the operations with the detailed graph of the transport network of a city district.

Identifying of rational itineraries between points of departure and of gravity is executed by purposed selection of options by criterion of minimum travel time spending. Shaping out of routes is based on principles of integration of the most possible number of points (vertices of the graph) into the route.

The application of an improved technique will allow to consider the changing demand of the population for transport services, make adjustments to the existing route network, thereby satisfying the population's need for transportation and increasing the efficiency of urban transport networks and motor transport enterprises.

Keywords: passenger transportation, urban passenger transport, route network, restructuring.

*Information about the authors:

Akopov, Philipp V. – Senior Lecturer at the Department of Road Transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, ap912@yandex.ru.

Khoroshilova, Anastasia D. – Master's student at the Department of Road Transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, anastasiamedi@yandex.ru.

Faddeykina, Yuliya S. – Master's student at the Department of Road Transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, juli4@bk.ru.

Article received 21.04.2019, accepted 23.07.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 254.

Background. Passenger urban ground transport (PT) is the most important element of social infrastructure, affecting the quality of life of the population, the efficiency of the city's economy, the possibility of maximizing the use of its urban development and socio-economic potential [1–5]. An analysis of studies in the field of passenger road transportation, including the works of the department of road transportation of MADI [1; 2; 4; 5], allows to conclude that PT should provide maximum transport accessibility for residents throughout the city, taking into account its promising development. And this, in turn, determines the need for designing new and restructuring the existing PT route networks [6; 7].

The need to restructure the route network is due to the following factors:

1. Unevenness of passenger flows on the lines of the route network;
2. Growth of the territory of urban areas;
3. Organization of new points of gravity (construction of off-street transport stations, opening of new shopping and entertainment centers, etc.);
4. Changes in urban infrastructure (construction of new roads, bridges, etc.).

Objective. The objective of the authors is to consider issues of designing and restructuring the route networks of public passenger urban ground transport.

Methods. The authors use general scientific and engineering methods.

Results.

Analysis of methods for designing and restructuring route networks of urban ground passenger transport

The international experience in designing route networks is diverse and concerns various aspects: planning multi-modal PT systems of individual cities, bus and intra-city rail routes, accessibility aspects, impact of the traveling of employed residents to and from their work place on development of the urban transport network, advantages and disadvantages of polycentric schemes, and many others issues.

Thus, the analysis of foreign studies in the field under consideration shows the need for:

- 1) integration of urban passenger transport systems: ensuring interaction of various modes of transport, elements of route networks and infrastructure, urban planning, environmental, and social policy [8–10].

- 2) an integrated approach to designing and operation of transport systems, which consists in ensuring compatibility and coordination of systems of various modes of transport, as well as technical, technological, organizational, economic, environmental, legal, information subsystems [11–13].

The studies noted the impact of estimates of demand for transport services and of predictions on the distribution of departure and arrival points of the travel on operation parameters of transport systems and route networks. The role of questioning various social groups in determining the demand for transport services is revealed. The factors affecting the use of public passenger transport have been also identified [14].

Numerous issues were studied comprising problems and effects of restructuring of existing route networks in terms of canceling, expanding, changing routes, designing infrastructure, adjusting the location of stopping points, eliminating unreasonable duplication of routes, designing joint tram and bus networks, creating multimodal transport systems, introducing new modes of transport and assessing their impact on transport system operation, a study of the dependence of demand for transport services on the number of interchanges and time for interchanges. Modelling of the transport system using Visum macro monitoring tool is proposed [10].

When designing networks, it is recommended that factors such as reliability, stability, power, constraints imposed regarding network capacity and load, and economic restrictions be considered. Various methods and models of network design are considered [15].

The combinatorial nature of network design problems is noted, which involves consideration of many options. The stages of designing route networks have been distinguished: demand estimation, deployment of stopping points, compilation of a correspondence matrix, selection of effective routes. The principle of routing with time limits for travel passing by a priori given stops was considered [16].

A method is proposed for modelling discrete events when solving the problem of restructuring route networks, which allows considering the dynamic nature of bus routes and making changes to the existing route network [17].

Thus, international experience shows that the solution to the problems of designing and

optimizing route networks can be carried out using a complex of analytical, mathematical, probability and theoretical methods.

This topic has attracted the attention of Russian researchers. There are several works, the main provisions of which can be used in solving problems in the field of designing and restructuring route systems of urban passenger transport. This includes the works of B. L. Geronimus and D. D. Dzhumayev [18], G. A. Varelopulo [19], E. A. Safronov [20], M. V. Khrushchev [21]. However, the methods proposed in these studies do not fully reflect current realities, do not take into account all the necessary limitations, and, therefore, make it possible to obtain «rough» solutions only that are difficult to be implemented.

For the first time, the complex task of designing a route network of urban passenger transport was solved in the 60s by NIIAT [Research Institute of Motor Transport] specialists [18]. The method of combinatorial analysis was basic, as it provided for the principle of directional selection of options for finding the optimal solution. Various optimization criteria have been proposed, including the total time spent by all network passengers on travel, including time spent on foot crossings [21], waiting and traveling in transport, interchanges between routes. The main disadvantages of the methodology are lack of restrictions, high time losses and laboriousness of calculations due to the need to manually calculate many options.

The method proposed in the 90s of the last century by the chief engineer of the Traffic Service of the Passenger Transport Administration of Moscow City Executive Committee G. A. Varelopulo [19] is that for a transport network, presented in the form of a graph: a set of vertices (centers of micro districts) and edges (driveways, tertiary streets) by which passenger traffic can be organized, time-efficient travel paths (transport links) were determined. Then, based on the obtained array of connections, the routes were constructed taking into account inclusion of the maximum possible number of vertices in each route. At the same time, several restrictions were established to reduce the number of options considered. For calculations, a special computer program was developed. The disadvantages of this method are the difficulty of practical implementation due to the large number of routes and the insufficient number of restrictions. For example, the capacity limits of the road network and transport hubs are not

taken into account. In addition, this technique involves design of a route network from scratch, without providing for the restructuring of existing route networks.

M. V. Khrushchev [21] proposed separation of routing methods into two groups depending on the level of tasks to be solved, namely general routing methods (the main of which is search for an optimal bus route scheme) and local routing methods (correction of individual routes). The author was convinced that acceptable results can only be achieved by combining approaches at different stages of development of a rational route scheme [1].

The advantages of this approach comprise use of various methods for solving routing problems, depending on the goal; high accuracy of the results and ability to optimize existing routes due to orientation on data on the distribution of departure and arrival points of travel; ability to choose the best route scheme based on quality criteria for passenger transportation; possibility to check feasibility of functioning of the developed route scheme.

The disadvantages include lack of significant restrictions to reduce the number of compared options for route networks [1]; application of these methods is only possible in the presence of stable ties between the city districts.

Improving the methods of designing and restructuring urban route networks

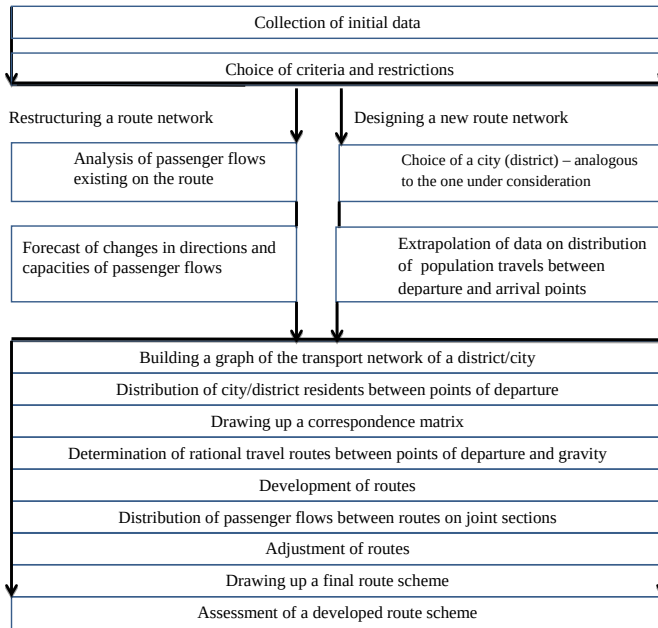
Designing and restructuring of route networks should be carried out in strict accordance with the provisions of the legislative and regulatory framework, which must be taken into account when choosing criteria and limitations within the problem, as well as when analyzing a developed or an optimized version of the route network. Within the territory of Moscow region, it is necessary to be guided by the following documents and acts:

1. SNIIP [hereinafter SNIIP means constructions norms and rules], Part II Standards for building design (1954) is advisory in nature, because it has lost legal force;

2. Urban Planning Code of the Russian Federation dated December 29, 2004 No. 190-FZ [Federal Law] (as amended and supplemented on August 2, 2019, entered into force on August 13, 2019);

3. SNIIP 11-60-75 on Planning and development of cities, towns and rural settlements;





Pic. 1. Stages of designing and restructuring the route networks of urban areas and small towns.

4. SNiP 2.07.01-89 on Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements;

5. SP [construction rules] 42.13330.2016 on Urban planning: Planning and development of urban and rural settlements (updated edition of SNiP 2.07.01-89);

6. Norms and rules for design of town-planning and development of the city of Moscow MGSN1.01-99;

7. Decree of the Government of Moscow of December 23, 2015 No. 945-PP on approval of regional standards for urban planning of the city of Moscow in the field of transport, roads of regional or intermunicipal significance.

The analysis of existing methods for designing route networks determines the need for:

- differentiation of methods depending on the size of the object of study and the goal;
- improvement of methods to ensure the possibility of practical implementation of the results.

The need to improve the design methods of route networks is caused by the following factors:

1) when choosing a restructuring methodology, it is necessary to take into account the size of the territory of cities or regions, the presence of stable passenger flows towards gravity points;

2) to solve the problems of restructuring route networks, it is necessary to change the way how the distribution of travels between departure and arrival points is made;

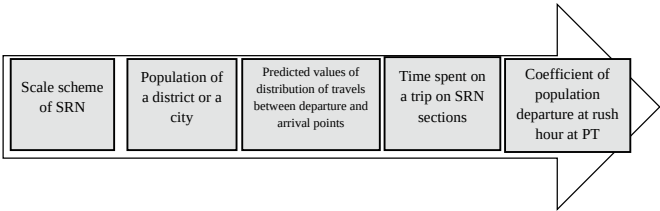
3) existing methods for designing route networks allow to get a theoretical model that is difficult to be put into practice;

4) for the possibility of practical implementation of the results of the restructuring, introduction of additional restrictions is necessary.

In the case of designing route networks of medium and large cities, it is advisable to use an enlarged method based on compilation of a matrix of inter-district travel correspondence and choice of routes considering given criteria and restrictions. Moreover, each district of the city will be represented by a single destination address, which is the conditional «center of gravity» of this area. This will significantly reduce the number of options considered and will enable further adjustments to the developed routes.

When solving the problems of restructuring route networks, it is necessary to change the way distribution of departure and arrival points is received. In this case, the correspondence forecast will be carried out not according to the data of the analogous area or based on the calculation of transport mobility of the population, as is possible when designing new networks, but according to the results of the passenger flow survey at the existing route network. When forecasting distribution of departure and arrival points, it is also necessary to take into account the throughput and loading of transportation hubs, the presence of new points of gravity (places of employment, cultural and public

Pic. 2. Initial data in design and restructuring route networks.



Pic. 3. An example of a detailed graph of the transport network of a city district.



facilities that are massively visited, stations of off-street transport, etc.).

To obtain possibility of practical implementation of the design option the route network requires introduction of additional restrictions to reduce the number of routes received at the design stage and taking into account the permissible transit capacity of the route, the load on the street-road network (SRN), the required level of quality of passenger service, the degree of unevenness of passenger flows and the efficient use of rolling stock [19; 22].

However, existing methods for designing and restructuring route networks do not fully consider the necessary limitations, which results in difficulties while implementing the results.

When designing route networks of city districts and small cities, the model of a street-road network presented in the form of a detailed graph with subsequent consideration of the arrays of connections of all the vertices of the graph with several points of gravity can be taken as a basis (Pic. 3).

To build a graph, it is possible to use QGIS geographic information system which is a convenient tool that allows to load a city map, select a scale, quickly and clearly build, edit vertices and segments (sections of the street-

road network) on top of a loaded map, measure the length of roads, streets, graphs constructed in scale and more. Due to this, it is possible to analyze, visualize and simplify work with a detailed graph of the transport network of the city district.

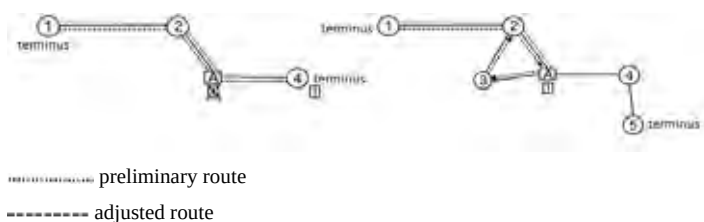
The identification of rational travel routes between points of departure and gravity is carried out by the method of directional selection of options according to the criterion of minimum time spent on movement. The identification of routes is carried out according to the principle of integration into the route of the greatest possible number of points (vertices of the graph) [19].

Adjustment of routes developed at the initial stage is based on the following conditions:

1. It is not permitted to organize routes at certain sections of street road network. In accordance with the standards in force in Moscow [23; 24], the width of the lane for ground passenger transport should be equal to 3,75 m. The width of local tertiary streets when organizing movement of mass passenger transport should be taken for one-way traffic as 10,5 m; for two-way traffic as 11,25 m.

2. It is not allowed to organize destination points of routes when technical feasibility of construction of a terminus is missing. A possible solution is to extend the track of the route to





Pic. 4. Options for adjusting the route in the absence of the possibility of organizing the terminus.

the point with the terminus, or to organize turnover of vehicles through circular traffic while maintaining the main direction of the main passenger outgoing flow (Pic. 4).

When extending a route, a situation arises when the same connection is served by multiple routes with different travel times. For distribution of passenger flows between these routes, the condition can be admitted that the number of passengers assigned to the route is inversely proportional to travel time:

$$K_i = \frac{\sum t_m}{t_m}; P_{s_m} = P_s \cdot \frac{K_i}{\sum K_i},$$

where K_i is distribution coefficient of passengers over time,

t_m is travel time of passengers of common link using the m -th route, min.

3. Establishment of maximum permissible values of maximum passenger flow on sections of the route. They are determined on the basis of the maximum and minimum permissible frequency (intervals) of movement, limited by SRN throughput and the necessary level of passenger service quality, as well as the maximum and minimum values of the nominal capacity of vehicles available for the transport company serving the route network:

$$Q_{jmax}^{min} = \frac{q_{nmin} \cdot 60}{I_{max}}; Q_{jmax}^{max} = \frac{q_{nmax} \cdot 60}{I_{min}},$$

where q_{nmin} and q_{nmax} are respectively minimum and maximum nominal capacity of vehicles, people;

I_{max} , I_{min} are maximum and minimum allowable values of the interval of movement of vehicles during «peak» hours, min.

If the estimated value of the maximum passenger flow on the route exceeds the permissible range, the following solutions are possible:

- 1) Organization of semi-express traffic on the route (if there are duplicate routes in this direction, having an extra capacity) (Pic. 5);
- 2) Organization of an additional shortened route on the most loaded section (Pic. 5).

If the estimated value of the maximum passenger flow on the route is below the permissible range, the following solutions are possible:

- 1) Exclusion of a route with distribution of passengers between the nearest neighboring points of departure (vertices of PT). In this case, it is necessary to consider the current regional standards for the length of pedestrian approaches.

For the city of Moscow, distances from ground transport stopping points should not exceed 400 m to places of residence or places of employment; 150 m to shopping centers, department stores, hotels, clinics; 400 m to other facilities [23; 24].

- 2) Exclusion of a route and organization of transport link with an interchange (in the presence of alternative routes having an extra capacity).

4. The combination of routes obtained at the initial stages.

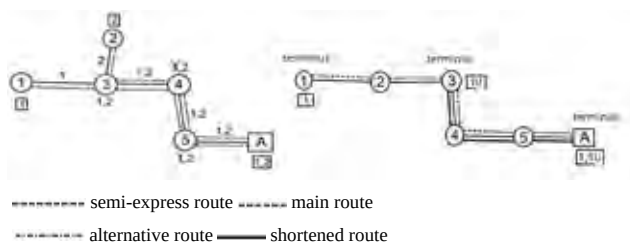
It is carried out in the following cases:

- 1) a route is a continuation of the other route;
- 2) routes overlap to great extent;
- 3) a route is an integral part of another one (except for cases of organizing an additional shortened route).

Conclusion. Thus, the proposed improved methodology for designing and restructuring the route networks of small cities and city districts provides for:

1. Differentiation of methods for obtaining forecast values of correspondence between departure and arrival points for design and restructuring tasks.
2. Consideration of requirements for SRN parameters when planning routes.
3. Consideration of various options for turnover of vehicles at final points of routes.
4. Establishing restrictions on the maximum passenger flow taking into account the capacity of the transport system and quality of passenger service.

Pic. 5. Options for adjusting the route by organising semi-express service and an additional shortened route.



5. Consideration of time factor while distributing passengers between alternative routes.

6. Measures to reduce the estimated values of passenger flows.

7. The possibility to reduce the number of routes under consideration by combining them and excluding them taking into account compliance with standards for transport accessibility.

REFERENCES

1. Martynova, Yu. A. Analysis of design experience of rational route networks of urban passenger transport [Analiz opyta proektirovaniya ratsionalnykh marshrutnykh setei gorodskogo passazhirskogo transporta]. *Internet-journal «Naukovedenie»*, 2017, Iss. 2, p. 125.
2. Efremov, I. S., Kobozev, V. M., Yudin, V. A. Theory of urban passenger transportation [Teoriya gorodskikh passazhirskikh perevozok]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1980, 535 p.
3. Bludyan, N. O., Roshchin, A. I., Antonov, M. N. On the issue of minimum social standards of public transport services. Deposited manuscript No. 754-B2009 30.11.2009 [K voprosu minimalnykh sotsialnykh standartov transportnogo obsluzhivaniya naseleniya].
4. Pistun, E. I., Bludyan, N. O., Moroz, D. G., Kheifits, P. I. Agglomeration problems of organizing an effective transport system [Agglomeratsionnye problem organizatsii effektivnoi transportnoi sistemy]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh*, 2014, Iss. 2, pp. 3–13.
5. Spirin, I. V. Organization and management of passenger road transportation [Organizatsiya i upravlenie passazhirskimi avtomobilnyi perevozkami]. 7th ed. Moscow, Academia publ., 2012, 400 p.
6. Bludyan, N. O. On the concept of development of transport services for the population in Moscow region [K kontseptsii razvitiya transportnogo obsluzhivaniya naseleniya v Moskovskom regione]. *Aviotransportnoe predpriyatie*, 2009, Iss. 2, pp. 11–13.
7. Bludyan, N. O., Moroz, D. G., Kheifits, P. I. Territorial transport forecasting and planning in Moscow metropolitan area [Territorialno-transportnoe prognozirovaniye i planirovaniye v Moskovskoi aglomeratsii]. *Aviotransportnoe predpriyatie*, 2014, Iss. 2, pp. 18–21.
8. Noor Ashikin Abd Rahman, Yusfida Ayu Abdullah. Theorizing the concept of urban public transportation institutional framework in Malaysia. *MATEC Web of Conferences*, 2016, Vol. 66, pp. 2–6.
9. Mrníková, M., Poliak, M., Šimurková, P., Hernandez, S., Reuter, N. How important is the integration of public passenger transport. *Scientific Journal on Transport and Logistics*, 2017, Vol. 2, pp. 59–68.
10. Solecka, K., Żak, J. Integration of the urban public transportation system with the application of traffic simulation. *Transportation Research Procedia*, 2014, Vol. 3, pp. 259–268.

11. Rajsman, M., Horvat, R., Rajsman, M. Public urban passenger transport as important factor in the development of cities. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 2014, Vol. 3, pp. 172–175.

12. Motta, R., Silva, P., Santos, M. Crisis of public transport by bus in developing countries: A case study from Brazil. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 2013, Vol. 3, pp. 348–361.

13. Francesc, L. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks. A survey. *SORT (Statistics and Operations Research Transactions)*, 2014, Vol. 38, pp. 181–214.

14. Kumar, G., Kaur, A., Singh, K. K. Public Transport and urban mobility: Perception of people on services of public transport in Bathinda City, Punjab, India. *International Research Journal of Social Sciences*, 2014, Vol. 3, pp. 8–14.

15. Gendrona, B. Decomposition methods for network design. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2011, Vol. 20, pp. 31–37.

16. Eiró, T., Viegasa, J. M., Martínez, L. M. A new optimisation procedure to design minibus services an application for the Lisbon Metropolitan Area. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2011, Vol. 20, pp. 856–865.

17. Pereira, W. I., Chwif, L. Generic bus route simulation model and its application to a new bus network development for caieiras city, Brazil. *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, 2018, pp. 122–134.

18. Geronimus, B. L., Dzhumayev, D. D. Mathematical and statistical method for sample inspection of passenger flows [Matematiko-statisticheskiy metod vyborochnogo obsledovaniya passazhiropotokov]. *Avtomobilnyi transport*, 1966, Iss. 4, pp. 43–44.

19. Varelupulo, G. A. Organization of movement and transportation in urban transport [Organizatsiya dvizheniya i perevozok na gorodskom transporte]. Moscow, Transport publ., 1990, 208 p.

20. Safronov, E. A. Transport systems of cities and regions: Study guide [Transportnye sistemy gorodov i regionov: Ucheb. posobie]. Moscow, ACB publ., 2005, 272 p.

21. Khrushchev, M. V. Methods of general and local routing of bus transport in cities: Monograph [Metody obshchei i lokalnoi marshrutizatsii avtobusnogo transporta v gorodakh: Monografiya]. Moscow, State University of Management, 1999, 168 p.

22. Spirin, I. V., Belyaev, V. M., Antonova, V. V. Planning Methodology for Road Passenger Transportation. *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 1, pp. 20–37.

23. Decree of the Government of Moscow of December 23, 2015 No. 945-PP «On approval of regional standards for urban planning of the city of Moscow in the field of transport, roads of regional or intermunicipal significance» [Postanovlenie Pravitelstva Moskvy ot 23.12.2015 No. 945-PP «Ob utverzhenii regionalnykh normativov gradostroitel'nogo proektirovaniya goroda Moskvy v oblasti transporta, avtomobilnykh dorog regional'nogo ili mezhmunitsipalnogo znacheniya»].

24. Norms and rules for design of town-planning and development of Moscow MGSN1.01-99 [Normy i pravila proektirovaniya planirovki i zaostroiki Moskvy MGSN1.01-99].





Применение методов анализа пассажиропотоков к реформированию пассажирской транспортной системы района Левобережный города Москвы



Дмитрий МОРОЗ



Светлана ТИТОВА



Александр ЧЕРНЫШЕВ

Мороз Дмитрий Геннадьевич — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

Титова Светлана Семёновна — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

Чернышев Александр Александрович — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*.

Одной из ключевых проблем в обеспечении качества жизни жителей крупных городов мира является повышение уровня стандартов предоставления транспортных услуг. В число основных аспектов решения этой проблемы входит поиск оптимального распределения потоков личного и наземного городского пассажирского транспорта общего пользования. В этой связи особую роль приобретают планирование, проектирование и размещение многофункциональных транспортно-пересадочных узлов (ТПУ), опыт создания которых получил широкое распространение во многих странах мира.

В последние годы в Москве тоже идёт активная работа по проектированию и строительству ТПУ, разрабатываются крупные проекты объектов транспортной инфраструктуры. Система ТПУ должна быть способной обеспечить гибкое реагирование на изменение транспортных потребностей населения и их адекватную трансформацию в целях эффективного обеспечения транспортной подвижности населения.

Ключевые слова: транспорт, наземный городской общественный транспорт, транспорт общего пользования, аэропорт, пассажирские перевозки, пригородные перевозки, маршрутная сеть, транспортно-пересадочный узел.

Целью исследования является апробация методов анализа пассажиропотоков и их применение в целях моделирования организации и планирования транспортно-пересадочного узла крупного района мегаполиса, планирования маршрутной сети городского пассажирского транспорта.

Рассмотрена маршрутная сеть пригородного и междугороднего транспорта Северного административного округа города Москвы. Проанализирован пассажирооборот ТПУ «Речной вокзал» и «Ховрино».

На основании проведённого исследования авторами предлагается ввести изменения в маршрутную сеть наземного городского пассажирского транспорта. Предложения по изменению маршрутной сети позволят сократить временные затраты на передвижения и пересадку пассажиров. По мнению авторов, разработанная маршрутная сеть эффективней существующей и соответствует нормам и требованиям по проектированию, утверждённым локальными городскими нормативными актами.

*Информация об авторах:

Мороз Дмитрий Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, dgm1984@mail.ru.

Титова Светлана Семёновна — старший преподаватель кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, titova_ss@inbox.ru.

Чернышев Александр Александрович — студент кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, chernyshev.alex@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 01.03.2019, принята к публикации 19.09.2019.

For the English text of the article please see p. 277.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на глобальные исследования и практические изменения в сфере пассажирских перевозок, существует ряд проблем, на которые необходимо обратить внимание в целях сбалансированного и поэтапного развития транспортной инфраструктуры.

Среди таких проблем – совершенствование перевозок наземным городским пассажирским транспортом, которые оказывают влияние на обеспечение мобильности городского населения и удовлетворение потребности в транспортном обслуживании. В условиях социально-экономических преобразований, нацеленных на повышение качества жизни жителей, роль городского автомобильного пассажирского транспорта постоянно возрастает.

Эта проблема характерна для многих мировых мегаполисов. Так, согласно статистическому бюллетеню Министерства транспорта России (январь–июнь 2019 г.), доля автомобильного транспорта в общем объеме перевозок транспортом общего пользования составляет около 89 %, при этом пассажирооборот составляет 21 % [1, с. 1].

Повышение качества транспортных услуг, оказываемых населению городов, во многом связано с оптимальным распределением потоков личного и наземного городского пассажирского транспорта общего пользования.

Транспортно-пересадочный узел (ТПУ) является важным инфраструктурным объектом системы городского пассажирского транспорта общего пользования, выполняющим функции оптимизации перевозочного процесса при формировании и перераспределении пассажиропотоков между различными видами транспорта. Формирование эффективной модели управления различными видами городского пассажирского транспорта позволяет повысить качество транспортного обслуживания путём сокращения времени на пересадку [2, с. 35].

Большой опыт проектирования планировочной структуры многофункциональных транспортно-пересадочных узлов накоплен в зарубежных странах. Например, в последние годы комплексную модернизацию всей транспортной инфраструктуры проводит Япония. Это позволило тесно

интегрировать общественный городской пассажирский транспорт с автомобильным и железнодорожным транспортом [3, с. 244]. Особое внимание уделяется развитию системы ТПУ при разработке крупных градостроительных проектов в Японии.

Для планирования и оценки эффективности городских транспортных систем используются многообразные методы. В качестве примера можно отметить разработку бинарных логистических моделей по совершенствованию уровня удовлетворённости пассажиров, применяемых на автобусных маршрутах в Монреале [4, с. 242]. Учёные из университета Калабрии (Италия) применили оригинальный подход к рассмотрению вопросов качества транспортного обслуживания населения через модели структурных уравнений [5, с. 107]. Многочисленные примеры такого рода имеются во многих странах мира.

На данном этапе в Москве тоже реализуется новейшая стадия формирования и развития транспорта и транспортной инфраструктуры. Её успешная реализация должна обеспечить системам отдельных видов городского транспорта возможность гибкого реагирования на изменения транспортных потребностей населения и их адекватной трансформации в целях эффективного обеспечения транспортной подвижности населения.

В последние годы в Москве тоже идёт активная работа по проектированию и строительству ТПУ, разрабатываются крупные проекты объектов транспортной инфраструктуры.

Система ТПУ решает следующие ключевые задачи:

- сокращение общих затрат времени перемещения пассажиров, в том числе за счёт минимизации времени на пересадку;
- снижение загрузки улично-дорожной сети;
- снижение загрузки федеральных магистралей на въездах в Москву.

Правильная организация и планирование функционирования транспортно-пересадочного узла позволяют обеспечить слаженное взаимодействие разных видов транспорта, а также удобство перемещения для пассажиров [6, с. 11–13].

Однако при создании ТПУ необходимо решать ряд задач, связанных с их рацио-



нальным проектированием и размещением в городской среде, опираясь в первую очередь на моделирование имеющихся и перспективных пассажиропотоков. Этой теме и в целом планированию городских пассажирских маршрутов посвящён значительный объём научных исследований, предлагающих различные решения.

В целях решения внутриузловых задач при организации и координации работы всех видов транспорта в ТПУ сотрудниками ГУП «Мосгортранс» предложен оригинальный методический подход к обследованию формирования и распределения пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах [7, с. 102].

В Квинслендском технологическом университете (Австралия) были проведены обширные исследования по изучению воздействия городской среды на передвижения пассажиров посредством мета-анализа данных [8, с. 526].

Коллектив авторов из университета Тунцзи (Шанхай, Китай) и Гонконгского политехнического университета (Коулун, Гонконг) провёл большое исследование с акцентом на учёт времени, проводимого пассажирами в пути, и соблюдение расписания движения. Использовался подход, построенный на взаимосвязи времени в пути и точности соблюдения расписания (Travel time reliability (TTR)). Множество показателей изучалось с помощью методов оценки и унимодальных моделей распределения вероятностей [9, с. 230].

Еще одним примером могут служить исследования группы европейских учёных, направленные на определение размеров наличия резервных единиц подвижного состава исходя из необходимости, в целях соблюдения графика движения, регулярного и качественного обслуживания используемого автобусного парка [10, с. 171].

Целью данного исследования является апробация методов анализа пассажиропотоков и их применение в целях моделирования организации и планирования транспортно-пересадочного узла крупного района мегаполиса, планирования маршрутной сети городского пассажирского транспорта.

Использовались статистические методы, математическое моделирование, спе-

циальные методы анализа городских транспортных систем.

В качестве кейса для изучения был использован Левобережный район города Москвы, выбор которого был обусловлен наличием дополнительных характеристик — присутствием терминальных станций и прохождением через него маршрутов городского наземного транспорта в направлении международного аэропорта «Шереметьево».

Актуальность связи «аэропорт—город» обусловила интерес к этой теме ряда исследователей, например, группы авторов из Катарского университета (Катар) и Университета Султана Кабуса (Оман). В связи с ожидаемым высоким спросом на транспортные услуги в период проведения чемпионата мира по футболу 2022 года, ими были проанализированы и смоделированы текущий и перспективный уровень доступности городского транспорта общего пользования в аэропорту г. Доха и произведён выбор рационального пути следования городских маршрутов [11, с. 35].

Для оптимизации и совершенствования транспортного обслуживания населения в Москве авторами данного исследования также предлагается разработка маршрута наземного городского транспорта до аэропорта Шереметьево.

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Анализ и обзор маршрутной сети Левобережного района Северного административного округа г. Москвы

В Москве за последние годы ТПУ получили большое развитие. Было подписано постановление Правительства г. Москвы № 413-ПП от 06.09.2011 г. «О формировании транспортно-пересадочных узлов в городе Москве». Открыты транспортно-пересадочные узлы в составе МЦК и другие.

Для апробации предлагаемых нами подходов объектом исследования стал Левобережный район Северного административного округа города Москвы [12, с. 4], где планируется реализация одного из проектов в рамках формирования городских транспортно-пересадочных узлов — ТПУ «Ховрино» (рис. 1), расположенного около одноимённой станции Замоскворец-



Рис. 1. ТПУ «Ховрино».

Таблица 1

Существующая маршрутная сеть в ТПУ «Ховрино» [16–19]

№ п/п	№ маршрута	Перевозчик	Конечные пункты	Интервал
1	65	Мосгортранс	Левобережная ул. – м. «Водный стадион»	9 минут
2	138	Трансавтолиз	м. «Речной вокзал» – м. «Речной вокзал»	22 минут
3	188	Трансавтолиз	м. «Речной вокзал» – м. «Речной вокзал»	11 минут
4	200	Мосгортранс	м. «Речной вокзал» – Лобненская ул.	12 минут
5	270	Мосгортранс	м. «Речной вокзал» – ст. «Ховрино»	7 минут
6	283	Мосгортранс	м. «Речной вокзал» – м. «Речной вокзал»	12 минут
7	344	Мострансавто	м. «Ховрино» – платформа «Левобережная»	15 минут
8	368	Мострансавто	м. «Ховрино» – платформа «Долгопрудная»	5 минут
9	400Э	Мосгортранс	м. Ховрино – Северная	7 минут
10	559	Таксомоторный парк № 20	м. «Речной вокзал» – Череповецкая ул.	18 минут
11	673	Трансавтолиз	м. «Речной вокзал» – Бусиново	10 минут
12	739	Трансавтолиз	м. «Речной вокзал» – м. «Речной вокзал»	22 минут
13	745	Трансавтолиз	м. «Речной вокзал» – м. «Речной вокзал»	11 минут
14	958	Мосгортранс	м. «Речной вокзал» – Городок ЮРМА	28 минут

кой линии метро в CAO г. Москвы. ТПУ объединит пассажирские потоки метро, железной дороги, а также маршрутов наземного городского пассажирского транспорта общего пользования (запуск запланирован ориентировочно на 2022 г.) [13]. ТПУ обладает потенциалом существенного улучшения дорожной обстановки на севере города [14, с. 40].

Анализ функционирования и потенциала развития ТПУ «Ховрино», проведенный студентами МАДИ в ходе учебной практики, показал, что мощность пассажиропотока оценивается следующими значениями:

- станция метро «Ховрино» – 17,4 тыс. чел. в час пик (ожидаемый);
- маршруты автобусов: 9,3 тыс. чел. в час пик (существующий), 10,2 тыс. чел. в час пик (ожидаемый).

Введение в эксплуатацию новых объектов транспортной инфраструктуры, в том числе ТПУ «Ховрино», предполагает серьезную работу по модернизации и реформированию действующей маршрутной сети, расположенной в зоне влияния новых объектов транспортной инфраструктуры [15, с. 235].

В данный момент через ТПУ «Ховрино» проходят 14 автобусных маршрутов (табл. 1) [16–19].

Станция «Речной вокзал» являлась конечной на протяжении 53 лет, до открытия в декабре 2017 года станции «Ховрино», однако зонный оборот поездов в часы пик и по выходным возможен и в настоящее время.

«Речной вокзал» – одна из самых загруженных станций Московского метрополитена. В связи с масштабным развитием





Рис. 2. ТПУ «Речной вокзал».

района Левобережный и прилегающих к нему городов-спутников нагрузка на станцию увеличилась в несколько раз. В марте 2002 года пассажиропоток составлял:

- по входу — 111,9 тысячи человек;
- по выходу — 148,3 тысячи человек [20].

После открытия станции «Ховрино» суточный пассажиропоток по станции «Речной вокзал» в будние дни сократился по сравнению с 2017 годом почти на треть и составил 63 тысячи человек в сутки. Открытие станции «Беломорская» тоже будет способствовать уменьшению пассажиропотока [20].

На данный момент рядом со станцией метро «Речной вокзал» расположены остановки сразу для 30 автобусных маршрутов, что в значительной степени увеличивает риски возникновения транспортных проблем для Левобережного района Москвы (рис. 2).

Роль ТПУ «Ховрино» в транспортном обслуживании аэропорта «Шереметьево» и создание новых маршрутов

ТПУ «Ховрино» находится в 12 километрах от Международного аэропорта «Шереметьево» им. А. С. Пушкина (МАШ), а улица Дыбенко, на которой располагается ТПУ, примыкает к транспортной магистрали М-11, следующей в аэропорт.

В связи с выполняемой реконструкцией аэропорта и введением в эксплуатацию новых терминалов и вследствие увеличения пассажиропотока аэропорта требуется улучшить его транспортную доступность.

В настоящее время прямым безостановочным маршрутом до «Шереметьево» являются только поезда «Аэроэкспресс», что осложняет транспортную доступность аэропорта и ухудшает качество обслуживания пассажиров.

В качестве предложений по оптимизации и реформированию действующей маршрутной сети можно рассматривать следующие варианты решений:

1. разработать новый экспресс-маршрут МАШ–ТПУ «Ховрино»;
2. перераспределить действующие автобусные маршруты из ТПУ «Речной вокзал» в ТПУ «Ховрино».

Предлагается создание нового экспресс-маршрута до аэропорта «Шереметьево» со следующими характеристиками [21]:

- пункт отправления — станция метро «Ховрино»;
- конечный пункт — аэропорт «Шереметьево», терминал Д;
- длина маршрута — 13 км;
- время в пути — 30 минут;
- интервал движения — ~ 25 минут;
- подвижной состав — ЛиАЗ 6213.71.

Предложения по оптимизации пригородной и междугородней транспортной сети в связи с вводом в эксплуатацию ТПУ «Ховрино»

В целях оптимизации работы пригородной и междугородней сети авторами был осуществлён анализ существующих пригородных и междугородних маршрутов (НГПТ), были установлены их характеристики (таблица 2).

Таблица 2

Маршруты НГПТ и их характеристики за оборотный рейс до оптимизации

№ п/п	№ маршрута	Начальный остановочный пункт	Конечный остановочный пункт	Протяжённость маршрута, км	Время в пути, мин
1.	342	ул. Павлова	м. «Речной вокзал»	21	81
2.	343	Новогорск-Стадион	м. «Речной вокзал»	31	120
3.	344	пл. «Левобережная»	м. «Речной вокзал»	22	85
4.	345	ст. «Химки»	м. «Речной вокзал»	19	73
5.	368	пл. «Долгопрудная»	м. «Речной вокзал»	31	120
6.	370	микрорайон «Велтон Парк»	м. «Речной вокзал»	42	163
7.	443	ул. Дружбы	м. «Речной вокзал»	23	89
8.	482	Стекольный завод «Элваакс»	м. «Речной вокзал»	52	201
9.	350	Менделеево (Башни)	м. «Водный стадион»	66	180
10.	437	а/с «Клин»	м. «Водный стадион»	154	300
11.	440	а/с «Солнечногорск»	м. «Водный стадион»	105	213

Таблица 3

Маршруты НГПТ и их характеристики за оборотный рейс после оптимизации

№ п/п	№ маршрута	Начальный остановочный пункт	Конечный остановочный пункт	Протяжённость маршрута, км	Время в пути, мин
1.	342	ул. Павлова	м. «Ховрино»	17	63
2.	343	Новогорск-Стадион	м. «Ховрино»	24	89
3.	344	пл. «Левобережная»	м. «Ховрино»	12	44
4.	345	ст. «Химки»	м. «Ховрино»	13	48
5.	368	пл. «Долгопрудная»	м. «Ховрино»	24	90
6.	370	микрорайон «Велтон Парк»	м. «Ховрино»	40	150
7.	443	ул. Дружбы	м. «Ховрино»	21	78
8.	482	Стекольный завод «Элваакс»	м. «Ховрино»	50	187
9.	350	Менделеево (Башни)	м. «Ховрино»	61	165
10.	437	а/с «Клин»	м. «Ховрино»	148	275
11.	440	а/с «Солнечногорск»	м. «Ховрино»	100	200

Указанные маршруты автотранспортного предприятия «Мострансавто» обслуживают пассажиров из городского округа Химки, городов Долгопрудный, Клин, Солнечногорск и рабочего посёлка Менделеево. Маршруты 1–8 (табл. 2) являются пригородными, а маршруты 9–11 – междугородными. Маршруты осуществляют перевозку в г. Москве, поэтому целесообразно использовать ближайшую станцию метро для перевозки пассажиров.

Для оптимизации затрат и сокращения времени поездки рекомендуется перенести конечный остановочный пункт для маршрутов автотранспортного предприятия «Мострансавто» к станции «Ховрино».

В целях оценки эффективности новой пригородной и междугородной сети автобусами была произведена оценка показателей протяжённостей и времени в пути по пригородным и междугородным маршрутам (табл. 3, 4).

На рис. 3–6 представлены трассы следования маршрутов после проведённой оптимизации и переноса конечной станции автобусных маршрутов к станции метро «Ховрино» (ТПУ «Ховрино»)*.

Для маршрутов № 350, 437, 440 представлена схема изменения подъездного

* Трассы следования в прямом направлении выделены пунктиром (в электронной версии – пунктиром на красном фоне), в обратном направлении – непрерывной (синей) линией.





Рис. 3. Маршруты № 342, 343, 344.

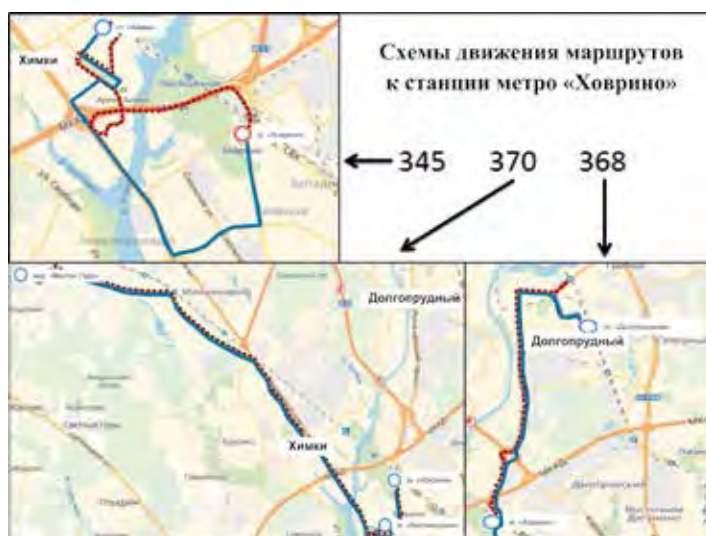


Рис. 4. Маршруты № 345, 370, 368.



Рис. 5. Маршруты № 443, 482.



Рис. 6. Схема подъездного пути к ТПУ «Ховрино» междугородних маршрутов № 350, 437, 440.

Таблица 4

Сравнение показателей. Результаты оптимизации

№ п/п	№ маршрута	Расстояние за оборотный рейс до оптимизации, км	Расстояние за оборотный рейс после оптимизации, км	Изменение расстояния маршрута, км
1.	342	21	17	4
2.	343	31	24	7
3.	344	22	12	10
4.	345	19	13	6
5.	368	31	24	7
6.	370	42	40	2
7.	443	23	21	2
8.	482	52	50	2
9.	350	66	61	5
10.	437	154	148	6
11.	440	105	100	5
ИТОГО		566	510	56

пути к станции метро «Ховрино» (рис. 6). Остальная часть маршрута остаётся без изменений, это позволит сохранить текущий пассажиропоток, а за счёт сокращения времени в пути увеличить его.

В результате оптимизации мы получили суммарное сокращение расстояния на 56 километров по 11 маршрутам за один рейс. С учётом среднего времени интервала по данным маршрутам в 25 минут, при среднем времени работы 18 часов, среднее количество рейсов в сутки будет равным 45. Тогда по сравнению с текущей схемой маршрута автобусы будут проезжать на 2520 километров меньше, согласно предложенным схемам маршрутов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа пассажиропотоков транспортной системы транспортно-пересадочных узлов «Ховрино» (рис. 7) и

«Речной вокзал», определено, что транспортная система ТПУ «Речной вокзал» требует пересмотра. Установлено, что ТПУ «Ховрино» имеет запас мощности по пассажиропотоку.

В целях улучшения качества перевозок населения была разработана новая маршрутная сеть пригородного и междугороднего транспорта, состоящая из 11 маршрутов. Сравнительная оценка показала, что новая сеть имеет ряд преимуществ по сравнению с действующей. Предложения по изменению маршрутной сети позволят сократить временные затраты на передвижения и пересадку пассажиров. Разработанная маршрутная сеть эффективней существующей и соответствует нормам и требованиям к проектированию, установленным постановлением Правительства Москвы от 23 декабря 2015 г. № 945-ПП «Об утверждении региональных нормативов градостроительного проектирования города



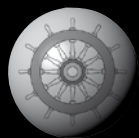


Рис. 7. Транспортно-пересадочный узел «Ховрино». Автовокзал «Северные ворота».

Москвы в области транспорта, автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения».

ЛИТЕРАТУРА

- Блудян Н. О., Рошин А. И., Антонов М. Н. К вопросу минимальных социальных стандартов транспортного обслуживания населения депонированная рукопись № 754-B2009 30.11.2009. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18092383>. Доступ 22.12.2018.
- Блудян Н. О., Кудряшов М. А., Качанова Н. А. Анализ и оценка эффективности транспортного обслуживания ТПУ МЦК // Грузовик. — 2018. — № 4. — С. 34–40.
- Титова С. С. Проблемы качества перевозки пассажиров в условиях городской агломерации // Молодой учёный. — 2018. — № 23. — С. 241–245.
- Van Lierop, D., El-Geneidy, A. Is having a positive image of public transit associated with travel satisfaction and continued transit usage? An exploratory study of bus transit. *Public Transport*, 2018, Vol. 10, Iss. 2, pp. 241–256.
- Eboli, L., Forciniti, C., Mazzulla, G. Formative and reflective measurement models for analysing transit service quality. *Public Transport*, 2018, Vol. 10, Iss. 1, pp. 107–127.
- Блудян Н. О. К концепции развития транспортного обслуживания населения в московском регионе // Автотранспортное предприятие. — 2009. — № 2. — С. 11–13.
- Кудряшов М. А. Методические подходы к обследованию формирования и распределения пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2017. — № 2 (49). — С. 96–102.
- Sharmin, S., Kamruzzaman, M. Meta-analysis of the relationships between space syntax measures and pedestrian movement. *Transport Reviews*, 2018, Vol. 38, Iss. 4, pp. 524–550. DOI: 10.1080/01441647.2017.1365101.
- Zang, Zhaoqi, Xu, Xiangdong, Yang, Chao, Chen, Anthony. A closed-form estimation of the travel time percentile function for characterizing travel time reliability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, Vol. 118, pp. 228–247. DOI: 10.1016/j.trb.2018.10.012.
- Raposo, H., Farinha, J. T., Ferreira, L., Galar, D. Dimensioning reserve bus fleet using life cycle cost models and condition based/predictive maintenance: a case study. *Public Transport*, 2018, Vol. 10, Iss. 1, pp. 169–190.
- Abulibdeh, A. O., Zaidan, E. A., Modeling ground access mode choice behavior for Hamad International Airport in the 2022 FIFA World Cup city, Doha, Qatar. *Journal of Air Transport Management*, 2018, Vol. 73, Iss. 3, pp. 32–45. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2018.08.007.
- Блудян Н. О., Айриев Р. С. Агломерационные подходы к решению транспортных проблем // Автотранспортное предприятие. — 2014. — № 8. — С. 2–7.
- Проект ТПУ «Ховрино». [Электронный ресурс]: <https://stroimsk.ru/construction/2165?from=cl>. Доступ 22.07.2018.
- Мороз Д. Г., Титова С. С., Коротаев А. С. Особенности планирования и организации транспортно-пересадочных узлов // Наука, техника и образование. — 2017. — № 2 (32). — С. 39–42.
- Блудян Н. О., Айриев Р. С., Акопов Ф. В., Реал С. Современная модель организации мультимодальных межрегиональных пассажирских перевозок в условиях агломерации // В мире научных открытий. — 2015. — № 6. — С. 233–242.
- Маршруты компании «Мосгортранс». [Электронный ресурс]: <http://www.mosgortrans.ru/routes/>. Доступ 22.07.2018.
- Маршруты компании «Мострансавто». [Электронный ресурс]: <http://mostransavto.ru/passengers/routes>. Доступ 22.07.2018.
- Реестр регулярных маршрутов Москвы. [Электронный ресурс]: <https://www.mos.ru/dt/function/razvitiye-nazemnogo-obshchestvennogo-transporta/reestr-regulyarnyh-marshrutov>. Доступ 22.07.2018.
- Реестр регулярных маршрутов Московской области. [Электронный ресурс]: https://mtdi.mosreg.ru/deyatelnost/celeveye-programmy/marshrutnaya-set#tab-menu_link_3. Доступ 22.07.2018.
- Пассажиропоток метро. [Электронный ресурс]: <http://www.metro-msk.ru/stancii-metro/liniya-2/rechnoj-vokzal.htm>. Доступ 22.07.2018.
- Титова С. С., Чернышев А. А. Совершенствование перевозок пассажирским наземным общественным транспортом в международный аэропорт Шереметьево // Международный студенческий научный вестник. — 2018. — № 5. — С. 6–7. [Электронный ресурс]: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=19131>. Доступ 01.03.2019.



Application of Passenger Flow Analysis Methods to Restructuring the Passenger Transport System of the Levoberezhny District of Moscow



Dmitry G. MOROZ



Svetlana S. TITOVA



Alexander A. CHERNYSHEV

*Moroz, Dmitry G., Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia.
Titova, Svetlana S., Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia.
Chernyshev, Alexander A., Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia*.*

ABSTRACT

One of the key problems when ensuring the quality of life of residents of large cities of the world is to raise the transport services standards. Among the main aspects of solving this problem is the search for the optimal distribution of flows of personal and ground public municipal passenger transport. In this regard the planning, design, and localization of multifunctional transport interchange hubs (hereinafter – TIH) take on great significance. The experience of their arrangement has received wide acceptance in many countries of the world. In recent years Moscow has also been actively working on the design and construction of TIH; large-scale projects of transport infrastructure facilities construction are being developed. The TIH system should be capable of flexible response to changing transport needs of the population and to their realistic transformation to effectively ensure transport mobility of the population.

The objective of the study is to test the passenger flow analysis methods and their application for simulation of the organization and planning of the transport interchange hub in a large district of the city, planning of the route network of municipal passenger transport.

The route network of suburban and intercity transport of Northern Administrative District of Moscow has been reviewed. The passenger traffic within the TIHs Rechnoy vokzal and Khovrino has been analyzed.

Based on the study, the authors propose to change the route network of ground urban passenger transport. The implementation of route network changing proposals can shorten the time spent on passenger travel and transfer. It is the authors' opinion that the developed route network is more effective than the existing one and meets the design standards and requirements approved by local city regulations.

Keywords: transport, ground public municipal passenger transport, airport, passenger transportation, suburban transportation, route network, transport interchange hub.

*Information about the authors:

Moroz, Dmitry G. – Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Road Transportation of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia, dgm1984@mail.ru.

Titova, Svetlana S. – Senior Lecturer at the Department of Road Transportation of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia, titova_ss@inbox.ru.

Chernyshev, Alexander A. – student at the Department of Road Transportation of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia, chernyshev.alex@gmail.com.

Article received 01.03.2019, accepted 19.09.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 268.

Introduction

Despite global research and practical changes in the field of passenger traffic there is a number of problems that need to be addressed in order to ensure a balanced and step-by-step development of transport infrastructure.

Among such problems is the improvement of transportation by ground municipal passenger transport which affects the mobility of the urban population and its needs for transportation services. Under the conditions of social and economic changes aimed at improving the quality of life of citizens the role of urban automobile passenger transport is constantly growing.

This problem is typical for many world megalopolises. Thus, according to the statistical bulletin of the Ministry of Transport of Russia (January–June 2019), the share of automobile transport in the total volume of public transport traffic is about 89 %, while the passenger turnover is 21 % [1, p. 1].

Improvement of the quality of transport services provided to the city population is in many respects due to the optimal distribution of flows of personal and ground municipal public passenger transport.

Transport interchange hub (TIH) is an important infrastructure facility of public municipal passenger transport system, which optimizes the transportation process when forming and redistributing the passenger flows between different modes of transport. Development of effective management model for different modes of passenger transport results in improving the quality of transport service by reducing the transfer time [2, p. 35].

Extensive experience in the design of planning pattern of multifunctional transport hubs has been accumulated in foreign countries. For example, in recent years, Japan has been carrying out a comprehensive modernization of its entire transport infrastructure. This facilitated the deep integration of common urban passenger transport and automobile and rail transport [3, p. 244]. When developing the large urban planning projects in Japan, special attention is given to the development of the TIH system.

Different methods are used to plan and assess the efficiency of urban transport systems. We can cite the example of the use

of binary logistics models used to improve the satisfaction of the passengers of bus routes in Montreal [4, p. 242]. The researchers from Calabria University (Italy) applied a specific method to evaluate transit service quality through the model of structural equations [5, p. 107]. Numerous examples of the same kind exist in many countries.

At present the transport and transport infrastructure of Moscow is the latest stage of formation and development. Its implementation should ensure that the urban systems of given modes of transport flexibly response to changing transport needs of the population and their consecutive transformation to effectively ensure transport mobility of the population.

In recent years the city of Moscow has also been actively working on the design and construction of TIH; large-scale projects of transport infrastructure facilities are being developed.

The TIH system solves the following key tasks:

- Reduction of total travel time of passengers, also due to transfer time minimization;
- Road and street network load reduction;
- Reduction of federal highway loading at the entrances to Moscow.

The proper organization and planning of the transport hub operation ensure the coordinated interaction of different modes of transport as well as the passenger comfort [6, pp. 11–13].

However, when organizing the TIHs, it is necessary to solve some problems related to their rational design and placement in urban environment. First of all it should be based on modelling the existing and future passenger flows. A lot of research studies are dedicated to this subject and planning of urban passenger routes as a whole, and offer various solutions.

To solve intra-hub problems while organizing and coordinating the operations of different modes of transport within the TIH the staff of Mosgortrans [federal unitary enterprise Moscow transport] suggested authentic methodological approach to survey on origination and distribution of passenger flows in TIH [7, p. 102].

Large-scale research was conducted in Queensland University of Technology (Australia)



Pic. 1. Khovrino TIH: Pribrezhny pr., metro station Khovrino, Oktyabrskaya railway, Housing complexes Businovo and Zapadnoye Degunino, Dybenko st.

on the impact of urban environment on the passenger travelling through data meta-analysis [8, p. 526].

The team of authors of Tongji University (Shanghai, China) and Hong Kong Kowloon University conducted the large research focused on time spent by passengers en route, and on respect of the schedules. The approach was based on Travel time reliability (TTR). The multiplicity of indices was studied with the help of assessment methods and unimodal models of probability distribution [9, p. 230].

Another example can refer to the research of a team of European scientists that focused on calculating the dimensions of a bus reserve fleet in relation to the necessity to respect its timetable and ensure its regular maintenance [10, p. 171].

The *objective* of the study is to test the passenger flow analysis methods and their application for simulation of the organization and planning of the transport interchange hub in a large district of the city, as well as for planning of the route network of municipal passenger transport.

The authors use statistical *methods*, mathematical modelling, and specific methods of analysis of urban transport systems.

The studied case was associated with Levoberezhny district of Moscow. The choice was determined by its additional

features that comprise presence of terminus stations, and of the routes of urban ground transport towards international Sheremetyevo airport.

The relevance of the link «city–airport» resulted in the interest shown to that topic by several researchers, e.g. by a group of authors from Qatar University and from Sultan Qaboos University (Sudan). See the expected high demand for transportation during World Cup 2022 the researchers analysed and modelled current and predictive availability of urban public transport in the airport of Doha and selected of the rational itinerary of urban routes [11, p. 35].

The authors of the present study also suggest to develop the route of urban ground passenger transport towards Sheremetyevo international airport to optimize and improve transit services provided to Moscow residents.

Results.

Analysis and review of route network of Levoberezhny district of Northern Administrative District of Moscow

In Moscow the TIHs have been greatly developed over the last years. The dedicated order of the Government of Moscow of December 23, 2015 No. 413-PP on the development of transport hubs in the city of Moscow was signed on December 23, 2015. Transport interchange hubs are open within



Table 1

Existing route network within Khovrino TIH [16–19]

No.	Route No.	Carrier / Operator	Terminal points	Time interval (frequency)
1	65	Mosgortrans	Levoberezhnaya st. – metro station Vodny Stadion	9 min
2	138	Transavtoliz	metro station Rechnoy Vokzal–metro station Rechnoy Vokzal	22 min
3	188	Transavtoliz	metro station Rechnoy Vokzal–metro station Rechnoy Vokzal	11 min
4	200	Mosgortrans	metro station Rechnoy Vokzal–Lobnenskaya st.	12 min
5	270	Mosgortrans	metro station Rechnoy Vokzal–station Khovrino	7 min
6	283	Mosgortrans	metro station Rechnoy Vokzal–metro station Rechnoy Vokzal	12 min
7	344	Mostransavto	metro station Khovrino–railway platform Levoberezhnaya	15 min
8	368	Mostransavto	metro station Khovrino–railway platform Dolgoprudnaya	5 min
9	400E	Mosgortrans	metro station Khovrino–Severnaya	7 min
10	559	Taxicab fleet No. 20	metro station Rechnoy Vokzal–Cherepovetskaya st.	18 min
11	673	Transavtoliz	metro station Rechnoy Vokzal–Businovo	10 min
12	739	Transavtoliz	metro station Rechnoy Vokzal–metro station Rechnoy Vokzal	22 min
13	745	Transavtoliz	metro station Rechnoy Vokzal–metro station Rechnoy Vokzal	11 min
14	958	Mosgortrans	metro station Rechnoy Vokzal–Yurma town	28 min



Pic. 2. Khovrino TIH.

the Moscow Central Circle (MCC) and at other locations.

For testing proposed approaches, the Levoberezhny [*if literally translated, Left Bank*] District of Northern Administrative District of Moscow was chosen as a subject of research [12, p. 4], since it's the location of one of the recent projects of development transport interchange hubs, namely of Khovrino TIH (Pic. 1) which is located near the similarly named metro station of Zamoskvoretskaya line in the Northern Administrative District of

Moscow. The TIH (scheduled start-up is about in 2022) [13] will integrate the passenger flows of metro, railway, and the routes of ground public municipal passenger transport. TIH has a potential to considerably improve the traffic situation in the north of the city [14, p. 40].

So far, the analysis of Khovrino TIH operation, conducted by MADI students during educational internship, shows that the passenger flow rates are as follow:

- metro station Khovrino: 17,4 thous. persons during rush hour (expected);

Table 2

Routes of ground municipal passenger transport and their characteristics per turnover run before optimization

No.	Route No.	Starting stopping point	Terminal stopping point	Route length, km	Travel time, min
1.	342	Pavlova st.	metro station Rechnoy Vokzal	21	81
2.	343	Novogorsk-Stadion	metro station Rechnoy Vokzal	31	120
3.	344	Railway platform Levoberezhnaya	metro station Rechnoy Vokzal	22	85
4.	345	Khimki station	metro station Rechnoy Vokzal	19	73
5.	368	Railway platform Dolgoprudnaya	metro station Rechnoy Vokzal	31	120
6.	370	Housing complex Welton park	metro station Rechnoy Vokzal	42	163
7.	443	Druzhby st.	metro station Rechnoy Vokzal	23	89
8.	482	Glass factory Elvaks	metro station Rechnoy Vokzal	52	201
9.	350	Mendeleyevo (Towers)	metro station Vodny Stadion	66	180
10.	437	Klin bus station	metro station Vodny Stadion	154	300
11.	440	Solnechnogorsk bus station	metro station Vodny Stadion	105	213

• bus routes: 9,3 thous. Persons during rush hour (existing); 10,2 thous. Persons during rush hour (expected).

The commissioning of new transport infrastructure facilities, including Khovrino TIH, involves a solid piece of work to modernize and restructure the existing route network located in the zone of influence of new transport infrastructure facilities.

14 bus routes actually run through the Khovrino TIH (Table 1) [16–19].

Metro station Rechnoy Vokzal had been terminal for 53 years until opening of Khovrino station in December, 2017. However the zone train turn-over [when Rechnoy Vokzal station becomes terminus] in rush hour and on weekends is also possible at the present time.

Rechnoy Vokzal station is one of the busiest stations of the Moscow metro. Owing to the large-scale development of the Levoberezhny district and the adjacent satellite towns, the load on the station has increased several times. In March 2002 the passenger flows were as follows:

- incoming – 111,9 thous. people,
- outgoing – 148,3 thous. people [20].

Once the Khovrino station has been opened, the daily passenger flow at the Rechnoy Vokzal station on weekdays decreased by about a third compared to 2017 and amounted to 63 thousand people per day. The opening of Belomorskaya station will help to further decrease the passenger flow [20].

The bus stations for thirty-two bus routes are currently located near the metro station thus complicating transport situation in the district (Pic. 2).

Role of Khovrino TIH in the transport service of Sheremetyevo airport and development of new routes

The Khovrino TIH is located 12 kilometers from Sheremetyevo Airport named after A. S. Pushkin (SVO), and Dybenko st., where the TIH is located, is adjacent to M-11 highway going to the airport.

Airport accessibility by transport should be improved due to the ongoing reconstruction of the airport and bringing the new terminals into service followed by the increase in the passenger flow.

At present only Aeroexpress trains form the direct non-stop route to Sheremetyevo, and that complicates the airport accessibility by transport and deteriorates the passenger service.

The following solutions can be considered as proposals for optimizing and restructuring the existing route network:

1. Develop the new express route Sheremetyevo Airport–Khovrino TIH;
2. Redistribute the existing bus routes from Rechnoy Vokzal TIH to Khovrino TIH.

It is proposed to develop the new express route to Sheremetyevo Airport with the following characteristics [14]:

- departure point is metro station Khovrino;
- terminal point is Sheremetyevo Airport, terminal D;



Table 3

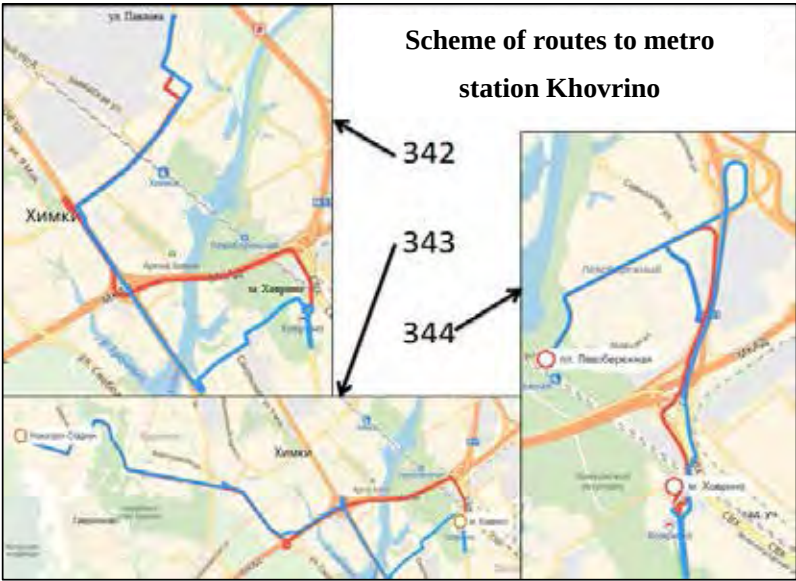
Routes of ground municipal passenger transport and their characteristics per turnover run after optimization

No.	Route No.	Starting stopping point	Terminal stopping point	Route length, km	Travel time, min
1.	342	Pavlova st.	metro station Khovrino	17	63
2.	343	Novogorsk-Stadion	metro station Khovrino	24	89
3.	344	Railway platform Levoberezhnaya	metro station Khovrino	12	44
4.	345	Khimki station	metro station Khovrino	13	48
5.	368	Railway platform Dolgoprudnaya	metro station Khovrino	24	90
6.	370	Housing complex Welton park	metro station Khovrino	40	150
7.	443	Druzhby st.	metro station Khovrino	21	78
8.	482	Glass factory Elvaks	metro station Khovrino	50	187
9.	350	Mendeleyevo (Towers)	metro station Khovrino	61	165
10.	437	Klin bus station	metro station Khovrino	148	275
11.	440	Solnechnogorsk bus station	metro station Khovrino	100	200

Table 4

Comparison of indices. Optimization results

No.	Route No.	Turnaround run distance before optimization, km	Turnaround run distance after optimization, km	Route distance change, km
1.	342	21	17	4
2.	343	31	24	7
3.	344	22	12	10
4.	345	19	13	6
5.	368	31	24	7
6.	370	42	40	2
7.	443	23	21	2
8.	482	52	50	2
9.	350	66	61	5
10.	437	154	148	6
11.	440	105	100	5
TOTAL		566	510	56



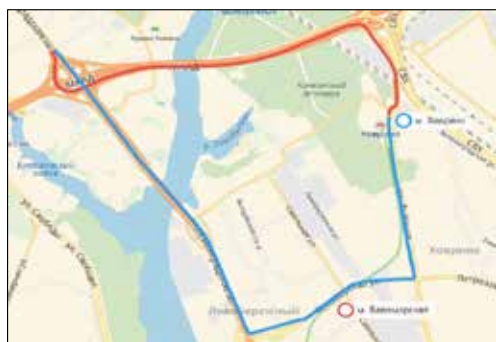
Pic. 3. Routes No. 342, 343, 344.



Pic. 4. Routes No. 345, 370, 368.



Pic. 5. Routes No. 443, 482.



Pic. 6. Layout of access road to Khovrino TIH of intercity routes No. 350, 437, 440.



Pic. 7. Khovrino Transport Interchange Hub. Severnye Vorota bus station.

- route length is 13 km;
- travelling time is equal to 30 minutes;
- time interval (frequency) is ~25 minutes;
- the fleet comprises LiAZ 6213.71 buses.

Proposals for optimizing the suburban and intercity transport network due to bringing the Khovrino TIH into service

For optimizing the work of suburban and intercity transport network the existing routes of suburban and intercity transport were analyzed and their characteristics were defined (Table 2).

Transport service of passengers from the Khimki urban district, Dolgoprudny, Klin, Solnechnogorsk towns and the worker's settlement [small town] Mendeleevo is provided at the indicated routes of the Mostransavto motor transport enterprise. 1–8 routes are suburban and 9–11 routes are the intercity ones. The routes are used for passenger transportation to Moscow therefore it is reasonable to use the nearest metro station for this purpose.

To optimize the expenditures and shorten travel time, it is recommended to re-locate

the terminal stopping point of the routes of the Mostransavto motor transport enterprise.

For assessment of effectiveness of the new suburban and intercity network, the length and travel time of the suburban and intercity routes were analyzed (Tables 3, 4).

Pics. 3–6 show the routes after optimization and shift of the terminal bus stations to the metro station Khovrino (Khovrino TIH)*.

As for routes No. 350, 437, 440, the layout of changed access to metro station Khovrino is given (Pic. 6). The rest of the route remains unchanged. It will help to keep the current passenger flow and even increase it due to shortened travel time.

As a result of optimization, we got the total distance reduction by 56 kilometers per run on 11 routes. Considering the average time interval of 25 minutes for these routes and the average working time of 18 hours, the average number of runs per day will be equal to 45. Then, compared to the current route scheme, buses will travel 2520 kilo-

* The forward direction routes are red-colored and backward direction routes are blue-colored.



meters less according to the proposed route schemes.

Conclusions.

The results of the analysis of passenger flows of transport system of Khovrino (Pic. 7) and Rechnoy Vokzal transport interchange hubs showed that the transport system of Rechnoy Vokzal TIH needs to be revised. It is found that Khovrino TIH has the passenger flow intensity margin.

A new suburban and intercity transport network consisting of 11 routes was developed in order to improve the quality of passenger transportation. The comparative assessment showed that the new network has some advantages compared to the existing one. The proposals to change the route network will result in reduction of time of passenger travel and transfer. The developed route network is more efficient than the existing one and meets the design standards and requirements established by the Decree of the Government of Moscow dated December 23, 2015 No. 945-PP on approval of the regional standards for urban planning of the city of Moscow in the field of transport, roads of regional or intermunicipal significance.

REFERENCES

1. Bludyan, N. O., Roshchin, A. I., Antonov, M. N. On the question of minimum social standards of transport services rendered to the population [*K voprosu minimal'nyh sotsial'nyh standartov transportnogo obsluzhivaniya naseleniya*]. Deposit manuscript No. 754-B2009 30.11.2009. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18092383>. Last accessed 22.12.2018.
2. Bludyan, N. O., Kudryashov, M. A., Kachanova, N. A. Analysis and assessment of the effectiveness of transport services transport hub of the Moscow central circle [*Analiz i otsenka effektivnosti transportnogo obsluzhivaniya TPU MSK*]. Gruzovik, 2018, Iss. 4, pp. 34–40.
3. Titova, S. S. Problems of quality of transportation of passengers in the conditions of city agglomeration [*Problemy kachestva perevozki passazhirov v usloviyakh gorodskoi aglomeratsii*]. Molodoj uchyonyi, 2018, Iss. 23, pp. 241–245.
4. Van Lierop, D., El-Geneidy, A. Is having a positive image of public transit associated with travel satisfaction and continued transit usage? An exploratory study of bus transit. *Public Transport*, 2018, Vol. 10, Iss. 2, pp. 241–256.
5. Eboli, L., Forciniti, C., Mazzulla, G. Formative and reflective measurement models for analysing transit service quality. *Public Transport*, 2018, Vol. 10, Iss. 1, pp. 107–127.
6. Bludyan, N. O. On the concept of development of transport services rendered to the population in the Moscow region [*O kontseptsii razvitiya effektivnosti transportnogo obsluzhivaniya naseleniya v moskovskom regione*]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2009, Iss. 2, pp. 11–13.
7. Kudriashov, M. A. Methodological approaches to the study on the origination and distribution of passenger flows in transport interchange hubs [*Metodicheskie podhody k obsledovaniyu formirovaniya i raspredeleniya passazhiropotokov v transportno-peresadochnykh uzlak*]. *Vestnik MADI*, 2017, Iss. 2 (49), pp. 96–102.
8. Sharmin, S., Kamruzzaman, M. Meta-analysis of the relationships between space syntax measures and pedestrian movement. *Transport Reviews*, 2018, Vol. 38, Iss. 4, pp. 524–550. DOI: 10.1080/01441647.2017.1365101.
9. Zang, Zhaoqi, Xu, Xiangdong, Yang, Chao, Chen, Anthony. A closed-form estimation of the travel time percentile function for characterizing travel time reliability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, Vol. 118, pp. 228–247. DOI: 10.1016/j.trb.2018.10.012.
10. Raposo, H., Farinha, J. T., Ferreira, L., Galar, D. Dimensioning reserve bus fleet using life cycle cost models and condition based/predictive maintenance: a case study. *Public Transport*, 2018, Vol. 10, Iss. 1, pp. 169–190.
11. Abulibdeh, A. O., Zaidan, E. A., Modeling ground access mode choice behavior for Hamad International Airport in the 2022 FIFA World Cup city, Doha, Qatar. *Journal of Air Transport Management*, 2018, Vol. 73, Iss. 3, pp. 32–45. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2018.08.007.
12. Bludyan, N. O., Ayriyev, R. S. Agglomerative approaches to the solution of transport problems [*Agglomeratsionnye podhody k resheniyu transportnyh problem*]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2014, Iss. 8, pp. 2–7.
13. Project of transport hub Khovrino [*Proekt TPU Khovrino*]. [Electronic resource]: <https://stroimsk.ru/construction/2165?from=cl>. Last accessed 22.07.2018.
14. Moroz, D. G., Titova, S. S., Korotayev, A. S. Features of scheduling and organization of transport hubs [*Osobennosti planirovaniya i organizatsii transportno-peresadochnykh uzlov*]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2017, Iss. 2(32), pp. 39–42.
15. Bludyan, N. O., Ayriyev, R. S., Akopov, F. V., Real, S. The modern model of the organization of multimodal interregional passenger traffic in the conditions of agglomeration [*Sovremennaya model' organizatsii multimodal'nyh mezhregional'nyh passazhirskih perevozok v usloviyakh aglomeratsii*]. In *The World of Scientific Discoveries*, 2015, Iss. 6 (66), pp. 233–242.
16. Routes of the Mosgortrans company [*Marshruty kompanii Mosgortrans*]. [Electronic resource]: <http://www.mosgortrans.ru/routes/>. Last accessed 22.07.2018.
17. Routes of the company of the Mostransavto [*Marshruty kompanii Mostransavto*]. [Electronic resource]: <http://mostransavto.ru/passengers/routes>. Last accessed 22.07.2018.
18. Register of regular routes in Moscow [*Reestr regulnykh marshrutov Moskvy*]. [Electronic resource]: <https://www.mos.ru/dt/function/razvitie-nazemnogo-obshchestvennogo-transporta/reestr-regulnykh-marshrutov>. Last accessed 22.07.2018.
19. Register of regular routes of the Moscow region [*Reestr regulnykh marshrutov Moskovskoy oblasti*]. [Electronic resource]: https://mtdi.mosreg.ru/deyatelnost/celevyie-programmy/marshrutnaya-set#tab-menu_link_3. Last accessed 22.07.2018.
20. Subway passenger traffic [*Passazhiropotok metro*]. [Electronic resource]: <http://www.metro-msk.ru/stancii-metro/liniya-2/rechnoj-vokzal.htm>. Last accessed 22.07.2018.
21. Titova, S. S., Chernyshev, A. A. Perfecting of transportations by passenger ground public transport in the international airport Sheremetyevo [*Sovershenstvovaniye perevozok passazhirskim nazemnym transportom v mezhduarodny aeroport Sheremet'yevo*]. *International Student Scientific Herald*, 2018, Iss. 5, pp. 6–7. [Electronic resource]: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=19131>. Last accessed 01.03.2019.



БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ 286

Новые технологии порождают новые вызовы в сфере безопасности. БПЛА в городах: безопасность полётов... или движения? Оценка подходов, постановка проблемы и путей её решения.



БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРЕВОЗОК 298

Интеллектуальные системы видеонаблюдения: как лучше воспользоваться их преимуществами.



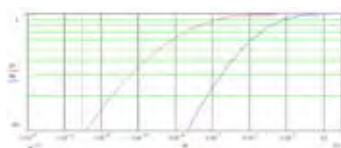
UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS 292

New technology results in new challenges for safety. UAS in the cities: should we speak about traffic of flight safety? Overview of approaches, statement of the problem and suggestion of methods to solve it.



TRAFFIC SAFETY 307

Intelligent video surveillance systems: how better implement their advantages.





Анализ безопасности при перевозке грузов беспилотными летательными аппаратами



Светлана ШВЕЦОВА



Алексей ШВЕЦОВ

*Швецова Светлана Валерьевна – Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия.
Швецов Алексей Владиславович – Северо-Восточный федеральный университет (СВФУ), Якутск, Россия*.*

Современные транспортные компании во всём мире активно изучают возможность внутригородских перевозок грузов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Цель настоящего исследования – выявление существующих проблем на пути полномасштабного внедрения БПЛА в производственный цикл логистических центров, осуществляющих грузоперевозки в современных мегаполисах, а также направлений их решения.

Проведённое с применением методов сравнительного анализа и обобщения исследование показало, что основным препятствием на пути применения беспилотных летательных аппаратов в сфере доставки грузов в настоящее время остаётся нерешённая проблема безопасности при движении БПЛА в условиях городской среды.

В статье был проведён анализ реализуемых в мире программ обеспечения безопасности полётов БПЛА. Среди рассмотренных программ: U-Space (программа реализуется Европейской комиссией и другими участниками); NASA Unmanned Aircraft System Traffic Management (программа реализуется NASA и Федеральным авиационным управлением США); European Aviation Safety Agency drone categories (программа реализуется Европейским агентством по авиационной безопасности (EASA)); Urban Traffic Management of Unmanned Aircraft

System (программа реализуется Научно-исследовательским институтом управления воздушным движением (ATMRI) и другими участниками). Проведённый анализ показал, что в данных программах большое внимание уделено предотвращению столкновения БПЛА с другими воздушными транспортными средствами, но при этом практически не уделяется внимание тому, что маршруты полёта беспилотных летательных аппаратов будут пересекаться с наземными транспортными магистралями.

Проведённый в статье анализ позволяет сделать вывод, что одним из направлений решения проблемы внедрения БПЛА в сферу доставки грузов является разработка новой концепции безопасности движения БПЛА в городских условиях, в которой будет учтена угроза столкновения грузовых БПЛА не только с воздушными транспортными средствами, но и с наземными. Концепция должна определить требования к технологии безопасного пролёта беспилотников над наземными транспортными магистралями, включая шоссе, высокоскоростные железные дороги и т.д. Разработка такой концепции станет переломным моментом для начала полномасштабного применения БПЛА как нового и эффективного средства доставки грузов в условиях города, что, в свою очередь, позволит создать в городах транспортную инфраструктуру следующего поколения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, беспилотник, дрон, перевозка грузов БПЛА, безопасность, авиация, городской транспорт.

*Информация об авторах:

Швецова Светлана Валерьевна – аспирант Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, transport-safety@mail.ru.

Швецов Алексей Владиславович – кандидат технических наук, доцент Северо-Восточного федерального университета (СВФУ), Якутск, Россия, zit-otb@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 13.06.2019, актуализирована 25.09.2019, принята к публикации 01.10.2019.

For the English text of the article please see p. 292

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотный летательный аппарат (другие обозначения: БПЛА, беспилотник, дрон) согласно определению, одобренному Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) — «воздушное судно без пилота, которое полностью дистанционно управляется из другого места (с земли, с борта другого воздушного судна, из космоса), либо запрограммировано и полностью автономно» [1].

В последние несколько десятилетий БПЛА были внедрены в различные отрасли промышленности для различных применений. Среди тех, кто применяет эту технологию, есть и транспортные компании.

Несомненным преимуществом этого способа доставки является более высокая скорость доставки, независимость от пробок, сокращение вовлечённого персонала.

Одним из пионеров доставки грузов с применением БПЛА выступила компания Amazon, разработавшая концептуальную систему доставки товара покупателям под названием «Prime Air» [2].

«Prime Air» позиционируется как сервис, который позволит компании доставлять посылки весом до пяти фунтов (2,268 кг) в течение 30 минут и менее, используя беспилотники вертолётного типа (рис. 1). Доставка грузов планируется осуществлять в районах в радиусе 16 километров от логистических центров компании.

7 декабря 2016 года Amazon впервые осуществил доставку груза с использованием сервиса «Prime Air» в Кембридже (Великобритания).

В 2017 году компания Matternet (США) представила разработку в сфере срочной доставки грузов медицинского назначения беспилотными летательными аппаратами, состоящую из дрон-станции «Station Matternet» и дрона «M2 Drone» [3]. Значимость данной разработки заключается, в первую очередь, в том, что она нацелена на экстренную доставку органов для трансплантации, лабораторных образцов и других грузов медицинского назначения, скорость и надёжность доставки которых является жизненно важной для пациентов лечебных учреждений. При этом именно такой способ, не зависящий от внутригородских пробок, по мнению разработчи-



Рис. 1. Беспилотник сервиса «Prime Air», осуществляющий доставку груза [2].

ков, способен обеспечить надёжную и, главное, быструю доставку.

С 10 декабря 2018 года компания Matternet начала перевозить беспилотниками лабораторные образцы из Университетской больницы Цюриха в кампус Цюрихского университета. «Лабораторные образцы смогут добраться до места назначения по воздуху вдвое быстрее, чем по дорогам Цюриха — сэкономленное время может оказаться неоценимым для пациентов, врачей и других медицинских работников» [3].

Необходимо отметить, что, несмотря на все достоинства применения беспилотных летательных аппаратов в сфере доставки грузов, внедрение данной технологии в настоящий момент, как правило, происходит только в рамках экспериментов и небольших стартапов.

Цель настоящего исследования — выявить существующие проблемы на пути внедрения БПЛА в производственный цикл существующих логистических центров, осуществляющих грузоперевозки в современных мегаполисах, а также предложить направления их решения.

БЕЗОПАСНОСТЬ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК БПЛА

Согласно информации, приведённой в источнике [4], в ближайшее время в России в соответствии с подготовленной Министерством транспорта России «дорожной картой» планируется предоставить владельцам беспилотников право на перевозку грузов на коммерческой основе.

Сейчас в соответствии с действующим законодательством в Российской Федерации беспилотники не имеют права совершать коммерческие перевозки, что становится одной из причин возникновения «серых» схем в данном секторе.

Ожидается, что программа, предусматривающая создание условий для коммерческого





Рис. 2. Беспилотник «Почты России», разбившийся при пробной доставке почтовой корреспонденции [8].

использования БПЛА, уже в ближайшем будущем будет разработана Минтрансом России. При этом владельцам беспилотников не потребуется регистрировать авиакомпанию и оформлять сертификат эксплуатанта, так как сертификат можно будет получить по упрощённой схеме. Требования к безопасности полёта останутся стандартными.

При этом анализ источников [5–12] позволяет сделать вывод, что именно обеспечение безопасности можно рассматривать как одну из главных проблем, задерживающих внедрение беспилотников на рынке доставки грузов.

К примеру, в 2018 году ФГУП «Почта России» провела пробную доставку почтовой корреспонденции грузовым беспилотным летательным аппаратом. Испытания закончились аварией, БПЛА потерял управление, столкнулся со зданием и упал на землю [8] (рис. 2).

ПРОГРАММЫ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БПЛА: МИРОВОЙ ОПЫТ

В настоящее время в мире разрабатывается ряд программ, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации беспилотных летательных аппаратов, в их числе нижеперечисленные:

1. U-Space.

Наиболее значимой программой интеграции беспилотных летательных аппаратов, осуществляемой в настоящее время в Европе, считается инициатива U-Space [9], являющаяся частью совместного проекта исследований «Единого европейского неба» (SESAR). SESAR — это государствен-

но-частное партнёрство с участием Европейской комиссии, Евроконтроля и ряда поставщиков аэронавигационного обслуживания и заинтересованных сторон отрасли. Эти игроки развивают концепцию «U-Space», включающую набор сервисов с цифровым управлением, которые позволят выполнять сложные масштабные беспилотные операции, учитывать высокий уровень автономности в сложных (особенно городских) условиях.

2. NASA Unmanned Aircraft System Traffic Management.

NASA сотрудничает в программе Unmanned Aircraft System Traffic Management с Федеральным авиационным управлением США. Цель программы — разработка систем управления движением гражданских БПЛА для обеспечения полётов в воздушном пространстве на небольшой высоте [10]. В проекте используется поэтапный подход, который предусматривает четыре последовательных уровня технологических возможностей. Предыдущие демонстрации в рамках программы включали полёты в малонаселённых районах и в умеренно населённых районах. Заключительный этап программы позволит осуществлять операции в густонаселённых (то есть городских) районах и справляться с большими объёмами трафика. Подробная информация о проекте доступна на веб-сайте NASA [10].

3. European Aviation Safety Agency drone categories.

Европейское агентство по авиационной безопасности (EASA) находится в процессе разработки новых правил [11], касающихся негосударственного использования БПЛА, и базируется на подходе, основанном на оценке риска, который разбивает БПЛА на три основные категории:

- Открытая: это категория с наименьшим риском, сертифицированные по этой категории БПЛА будут работать в соответствии с определёнными принципами без необходимости получения разрешения от контролирующего органа для выполнения данной операции.
- Специфическая: категория повышенного риска, требующая авторизации для развёртывания БПЛА / типа развёртывания. Это означает, что должна проводиться оценка риска с учётом возможностей дро-



Рис. 3. Иллюстрация структуры управления городским движением БПЛА в воздушном пространстве Сингапура, разрабатываемая NTU [12].

на, оператора, окружающей среды и конкретной задачи.

- Сертифицированная: категория наивысшего риска, предусматривающая, что дрон и оператор должны быть сертифицированы соответствующим контролирующим органом.

Различные варианты использования БПЛА могут включать все три категории. Часть задачи включает в себя интеграцию различных профилей риска для БПЛА, выполняющих миссии различных типов.

4. Urban Traffic Management of Unmanned Aircraft System (UTM-UAS).

Исследователи из Наньянского технологического университета (Nanyang Technological University (NTU)) работают над созданием системы управления движением беспилотных летательных аппаратов [12] для того, чтобы БПЛА могли эффективно и безопасно летать в воздушном пространстве Сингапура (рис. 3). Данная программа сфокусирована на таких областях, как интеллектуальная и безопасная маршрутизация, системы обнаружения и предотвращения и управления движением для координации воздушного движения.

Проект возглавляется Научно-исследовательским институтом управления воздушным движением (ATMRI), объединённым исследовательским центром NTU и Управлением гражданской авиации Сингапура (CAAS). Руководителем исследовательской программы является профессор NTU Лоу Кин Хуат (Low Kin Huat), эксперт в области робототехники и беспилотных летательных аппаратов из Школы машиностроения и аэрокосмической техники.

Сравнительный анализ и обобщение информации, представленной в перечисленных выше программах, показывает, что основной применяемый в них принцип безопасности — это выбор маршрутов для полёта БПЛА над такими территориями города, аварийное падение на которые не причинит ущерба или причинит наименьший ущерб. К таким территориям относятся водоёмы, парки и т.д. Также большое внимание в программах уделено предотвращению столкновения БПЛА с другими воздушными транспортными средствами, но при этом практически не уделяется внимание тому, что маршруты полётов не только любительских, но и грузовых БПЛА будут пересекаться с наземными транспортными магистралями, к примеру, шоссе и железными дорогами, в т.ч. и высокоскоростными. Аварийное падение грузового беспилотника на транспортную магистраль может привести к катастрофическим последствиям, например, ДТП на скоростном шоссе или аварии на высокоскоростной железной дороге.

Так в качестве примера исследования возможных последствий аварии с участием БПЛА можно привести тест британских учёных, проведённый в лаборатории исследовательского центра авиации в Фарнборо (Англия). Тест был проведён с использованием пневматической пушки, беспилотных летательных аппаратов, а также кабин вертолёта и авиалайнера [13].

Проведённый тест позволил установить, что даже небольшой любительский беспилотник может представлять серьёзную опасность, и, что более тяжёлые, но





Рис. 4. Беспилотник, пробивающий лобовое стекло кабины авиалайнера в процессе проведения теста [13].

всё более широко используемые БПЛА могут разбить лобовое стекло авиалайнера при столкновении на высотах и скоростях, типичных для самолёта, совершающего заход на посадку (рис. 4). При этом необходимо учитывать, что такая скорость вполне сопоставима со скоростью движения высокоскоростного поезда, а структура и форма кабины авиалайнера также во многом аналогичны кабине высокоскоростного поезда.

«Хотя существующая вероятность столкновения беспилотников с другими транспортными средствами кажется низкой» [14], его последствия согласно исследованиям [15–18] могут быть достаточно серьёзными (рис. 5), особенно если учитывать, что вес профессиональных дронов достигает десятков килограммов и некоторые из них работают на жидком топливе [19].

Также, можно привести ряд примеров столкновения БПЛА и наземных транспортных средств, в том числе с поездами [21] и автомобилями [22; 23]. «Беспилотник столкнулся с автомобилем на автомагистрали А99 близ г. Гермеринг, Бавария. Ни водитель, ни пассажир машины не пострадали, однако авария нанесла ущерб передней части транспортного средства. Пилот беспилотника сдался полиции после своего обращения к прессе, однако настаивает, что в столкновении виновата техническая проблема с беспилотником. Мужчина, 51-летний житель Мюнхена, сказал полиции, что беспилотник потерял управление из-за технического дефекта или сбоя передачи сигнала управления. БПЛА весом 1,2 кг, который



Рис. 5. Авиалайнер, получивший повреждения при столкновении с беспилотником [20].

был запущен в нескольких километрах от места происшествия, в мюнхенском районе Нойаубинг, приземлился на автомагистрали, в результате чего автомобиль въехал прямо в него. В настоящее время полиция проводит расследование на предмет опасных помех для дорожного движения» [22]. Это не первый случай аварий с участием БПЛА на автомагистралях Германии [23], в результате в настоящее время введён запрет на полёты беспилотников над автобанами [23].

«Такие события могут быть вызваны ошибкой пилота или технической неисправностью с самим беспилотником. Не только операторы любители, но и даже профессиональные операторы могут допускать ошибки при пилотировании» [18].

«Необходимо отметить, что серьёзную угрозу для безопасности при эксплуатации беспилотников представляет кибервмешательство, такое, как перехват канала управлением БПЛА» [24], а также радиочастотные помехи, приводящие к потере оператором контроля над летательным аппаратом [25–26].

В настоящее время «БПЛА всё ещё являются развивающейся областью авиации с большим количеством факторов неучтённого риска» [18].

Выводы

Проведённый анализ показал, что существует необходимость разработки концепции безопасности полётов грузовых беспилотников в условиях городской среды, в которой будет уделено особое внимание угрозе столкновения БПЛА с другими транспортными средствами.

Концепция должна, в том числе, определять требования к технологии безопасного полёта беспилотников над транспортными магистралями, включая шоссе, высокоскоростные железные дороги и т.д. Разработка такой концепции станет переломным моментом для начала полномасштабного применения БПЛА как нового и эффективного средства доставки грузов, что позволит создать в городах транспортную инфраструктуру следующего поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Unmanned Aircraft Systems Advisory Group (UAS-AG). Официальный сайт ICAO. [Электронный ресурс]: [https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-\(UAS-AG\).aspx](https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-(UAS-AG).aspx). Доступ 17.05.2019.
2. Prime Air. Официальный сайт компании «Amazon». [Электронный ресурс]: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>. Доступ 10.06.2019.
3. Matternet. Официальный сайт компании «Matternet». [Электронный ресурс]: Retrieved from <https://mtr.net/product>. Доступ 10.06.2019.
4. Правительство планирует внедрить интеллектуальные системы управления наземным движением. Официальный сайт Минтранса РФ. [Электронный ресурс]: <https://www.mintrans.ru/press-center/branch-news/1342>. Доступ 17.05.2019.
5. Швецов А. В., Швецова С. В., Балалаев А. С. Направление реформирования системы обеспечения транспортной безопасности в Российской Федерации // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2018. — № 3. — С. 81–87.
6. Швецов А. В., Швецова С. В. Регулирование в сфере транспортной безопасности // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы: Матер. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Хабаровск: ДВГУПС, 2015. — С. 268–273.
7. Швецов А. В., Швецова С. В. Повышение эффективности обеспечения транспортной безопасности в Российской Федерации // Современные технологии управления транспортным комплексом России: Инновации, эффективность, результативность: Матер. перв. нац. науч.-практ. конф. — М.: РУТ (МИИТ), 2018. — С. 226–232.
8. Почтовый дрон сбили военные глушилки? [Электронный ресурс]: <https://daily03.ru/news/pochtoviy-dron-sbili-voennye-glushilki.html>. Доступ 10.06.2019.
9. SESAR2020. Официальный сайт EUROCONTROL [Электронный ресурс]: <https://www.eurocontrol.int/esar2020>. Доступ 10.06.2019.
10. Unmanned Aircraft System Traffic Management. Официальный сайт National Aeronautics and Space Administration (NASA). [Электронный ресурс]: <https://utm.arc.nasa.gov/index.shtml>. Доступ 17.05.2019.
11. Civil drones (Unmanned aircraft). Официальный сайт European Aviation Safety Agency. [Электронный ресурс]: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas#group-easa-related-content>. Доступ 10.06.2019.
12. NTU to develop traffic management solutions so drones can fly safely in Singapore's airspace. Официальный сайт Nanyang Technological University. [Электронный ресурс]: <http://news.ntu.edu.sg/Pages/NewsDetail.aspx?URL=http://news.ntu.edu.sg/news/Pages/NR2016Dec28.aspx&Guid=20327ba4-b019-4a38-a86f-47e64d89ba0d&Category=All>. Доступ 10.06.2019.

13. UK test flies drones into damaging collisions with aircraft. Crikey. [Электронный ресурс]: <https://blogs.crikey.com.au/planetalking/2017/07/23/uk-test-flies-drones-into-damaging-collisions-with-aircraft/>. Доступ 15.05.2019.
14. Dourado, E., Hammond, S. Do consumer drones endanger the national airspace? Evidence from wildlife strike data. Mercatus Center, George Mason University, Arlington and Fairfax, Virginia, 2016.
15. Small remotely piloted aircraft systems (drones): Mid-air collision study. Report by QinetiQ, Natural Impacts commissioned by the Department for Transport, the Military Aviation Authority and British Airline Pilots' Association, 2016. [Электронный ресурс]: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/628092/small-remotely-piloted-aircraft-systems-drones-mid-air-collision-study.pdf. Доступ 15.05.2019.

16. Schroeder, K., Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS ingestion into high-bypass engines. Part II: Drone parametric study. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017.
17. Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS Ingestion into High-Bypass Engines. Part I: Bird vs. Drone. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017.
18. Wild, G., Murray, J., Baxter, G. Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters. Aerospace, 2016, Vol. 3, Iss. 3, pp. 22–32.
19. Huttunen, M. Civil unmanned aircraft systems and security: The European approach. Journal of Transportation Security, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12198-019-00203-0>. Доступ 25.09.2019.

20. В Мексике дрон врезался в самолет, когда он заходил на посадку. Фокус. [Электронный ресурс]: <https://focus.ua/world/414989-v-meksike-dron-vrezalsya-v-samolet-kogda-on-zaxodil-na-posadku/>. Доступ 15.05.2019.
21. Flying Scotsman hit by drone on North York Moors. The Telegraph. [Электронный ресурс]: <https://www.telegraph.co.uk/news/uknews/road-and-rail-transport/12196992/Flying-Scotsman-hit-by-drone-on-North-York-Moors.html/>. Доступ 15.05.2019.

22. Drone crashes into car on Autobahn outside Munich. The Local. [Электронный ресурс]: <https://www.thelocal.de/20170130/drone-collides-with-car-on-motorway/>. Доступ 15.05.2019.
23. Autobahn driver suffers drone windscreen smash. The Local. [Электронный ресурс]: <https://www.thelocal.de/20150522/drone-smashes-into-car-windscreen-on-autobahn/>. Доступ 15.05.2019.

24. Altawy, R., Youssef, A. M. Security, privacy, and safety aspects of civilian drones: a survey. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 2016, Vol. 1, Iss. 2, Article No. 7.
25. Huttunen, M. Drone Operations in the Specific Category: A Unique Approach to Aviation Safety. The Aviation & Space Journal, 2019, Vol. 18, No. 2, pp. 2–21. [Электронный ресурс]: <http://www.aviationspacejournal.com/wp-content/uploads/2019/08/The-Aviation-Space-Journal-Year-XVIII-April-July-2019-1.pdf>. Доступ 25.09.2019.

26. Klenka, M. Major incidents that shaped aviation security. Journal of Transportation Security, 2019, Vol. 12, Iss. 1–2, pp. 39–56.





Safety Analysis of Goods Transportation by Unmanned Aerial Vehicles



Svetlana V. SHVETSOVA



Alexey V. SHVETSOV

Shvetsova, Svetlana V., Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia.

Shvetsov, Alexey V., North-East Federal University (NEFU), Yakutsk, Russia.*

ABSTRACT

Modern transport companies around the world actively study the possibility of intra-urban transportation of goods using unmanned aerial vehicles (UAV).

The objective of the study is to reveal the existing problems preventing full-scale introducing of UAVs into the operations of logistics centers that accomplish cargo delivery in modern megacities as well as to propose a possible option for their solution.

The study conducted applying the methods of comparative analysis and generalization showed that the main obstacle to the use of unmanned aerial vehicles for cargo delivery is currently unsettled problem of safety when UAVs operate in the urban environment.

The study has analyzed the worldwide UAV traffic safety management programs. Among the programs reviewed were U-Space (the program is implemented by the European Commission and other participants); NASA Unmanned Aircraft System Traffic Management (the program is implemented by NASA and the US Federal Aviation Administration); European Aviation Safety Agency drone categories (the program is

implemented by European Aviation Safety Agency (EASA)); Urban Traffic Management of Unmanned Aircraft System (the program is implemented by Air Traffic Management Research Institute (ATMRI) and other participants). The analysis showed that these programs paid a lot of attention to preventing the UAVs collisions with other air vehicles. But almost no attention was paid to the fact that the flight routes of unmanned aerial vehicles would intersect with the ground highways.

The analysis carried out in the article allows us to conclude that one of the solutions to the problem of UAV implementation in the field of cargo delivery is the development of a new concept of UAV traffic safety in the urban conditions, which will take into account the threat of collision of cargo UAV not only with air vehicles but also with ground ones. The concept should determine the requirements for the technology for safe traffic of drones over the main surface transport routes including highways, high-speed railways, etc. The development of such a concept will be a turning point for starting the full-scale use of UAVs as a new and effective means of cargo delivery in the city, which, in its turn, will create the next-generation transport infrastructure in the cities.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, air drone, UAV transportation of goods, safety, aviation, urban transport.*

*Information about the authors:

Shvetsova, Svetlana V. – Ph.D. student of Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia, transport-safety@mail.ru.

Shvetsov, Alexey V. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of North-East Federal University (NEFU), Yakutsk, Russia, zit-otb@mail.ru.

Article received 13.06.2019, revised 25.09.2019, accepted 01.10.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 286.

Introduction

Unmanned aerial vehicle (other names: UAV, unmanned aircraft, drone) according to the definition approved by International Civil Aviation Organization (ICAO) is «any aircraft intended to be flown without a pilot on board which can be remotely and fully controlled from another place (ground, another aircraft, space) or pre-programmed to conduct its flight without intervention» [1].

In the past few decades, UAVs have been implemented in various industries for various applications. Among those who use this technology, there are transport companies.

The undoubted advantage of this method of delivery is the higher delivery speed, independence from traffic jams, reduction of the number of the employees directly involved in delivery process.

One of the pioneers in the cargo delivery using the UAVs is Amazon which developed a conceptual cargo delivery system named Prime Air [2].

Prime Air is a service that will deliver packages up to five pounds in 30 minutes or less using hybrid aircrafts capable to make vertical takeoff (Pic. 1). It is planned to deliver goods in the areas within a radius of 16 kilometers from the company's logistics centers.

On December 7, 2016, Amazon first delivered the goods using the Prime Air service in Cambridge (UK).

In 2017, Matternet (USA) introduced a development in the field of urgent delivery of medical supplies by unmanned aerial vehicles consisting of the Station Matternet drone station and the M2 Drone [3]. The importance of this development is linked primarily to the fact that it is aimed at the emergency delivery of organs for transplantation, laboratory samples and other medical supplies; speed and reliability of their delivery is vital for patients of medical institutions. Moreover, according to the developers, it is this method that is independent of the city traffic jams which can provide the reliable and, above all, fast delivery.

Matternet has been transporting laboratory samples by drones from University Hospital Zurich to the Zurich University campus. «Compared to a courier on the road in Zurich, the drone with laboratory samples is able to travel the route twice as quickly; the time saved can be invaluable for patients, doctors and other medical professionals» [3].

It is necessary to point out that despite all the advantages of using unmanned aerial vehicles for cargo delivery this technology at the moment, as a rule, is introduced so far only within the framework of experiments and small startups.

The objective of this study is to identify the existing problems in introducing of UAVs in the operation cycle of logistics centers engaged in the freight delivery in modern megacities as well as to propose certain options for their solution.

Safety of cargo delivery by UAVs

According to the data provided in [4] in the near future in Russia it is planned to give the UAV owners the right to transport goods on a commercial basis in accordance with the road map prepared by the Ministry of Transport of Russia.

At present in accordance with the current legislation of the Russian Federation air drones do not have the right to make commercial transportation, what becomes one of the causes for shadow schemes in this sector.

It is expected that the program that ensures the arrangement of conditions for commercial use of UAVs will be developed by the Ministry of Transport of Russia in the near future. In this case, the owners of air drones will not need to register an airline and be issued an Air Operator Certificate as it can be obtained according to a simplified scheme. Flight safety requirements will remain standard.

Meanwhile analysis of the sources [5–12] allows to draw a conclusion that it is safety that can be considered as one of the main problems that delay the introduction of air drones in the cargo delivery market.

To illustrate, in 2018 Federal State Unitary Enterprise *Russian Post* carried out a trial delivery of mail correspondence by a cargo



Pic. 1. Prime Air delivery drone [2].





Pic. 2. Russian Post's drone crashed on the trial delivery of mail correspondence [8].

unmanned aerial vehicle. The tests ended in an accident, the UAV lost control, clashed with the building and fell to the ground [8] (Pic. 2).

UAV safe operation programs: global experience

A number of programs are currently being developed in the world, which are aimed at ensuring the safe operation of unmanned aerial vehicles, including the following.

1. U-Space

The most significant program of unmanned aerial vehicle integration currently underway in Europe is the U-Space initiative [9], which is part of a joint research project on a Single European Sky. SESAR is a public-private partnership involving the European Commission, Eurocontrol and a number of air navigation service providers and industry stakeholders. These stakeholders are developing the U-Space concept which includes a set of digitally controlled services that will make it possible to perform complex large-scale unmanned operations, taking into account the high level of independence in difficult (especially urban) conditions.

2. NASA Unmanned Aircraft System Traffic Management

NASA is cooperating with the US Federal Aviation Administration in the Unmanned Aircraft System Traffic Management program. The purpose of the program is the development of civil UAV motion control systems to ensure low-level flights in airspace [10]. The project takes a step-by-step approach which provides

four consecutive levels of technological capabilities. The previous demonstrations within the frame of the program included the flights in sparsely populated areas and in moderately populated areas. The final stage of the program will make it possible to carry out the operations in densely populated (i.e. urban) areas and to get through the large volume of traffic. The project details are available on the NASA website [10].

3. European Aviation Safety Agency drone categories

The European Aviation Safety Agency (EASA) is currently developing new rules [11] regarding the private use of UAVs and takes a risk-based approach that breaks down UAVs into three main categories:

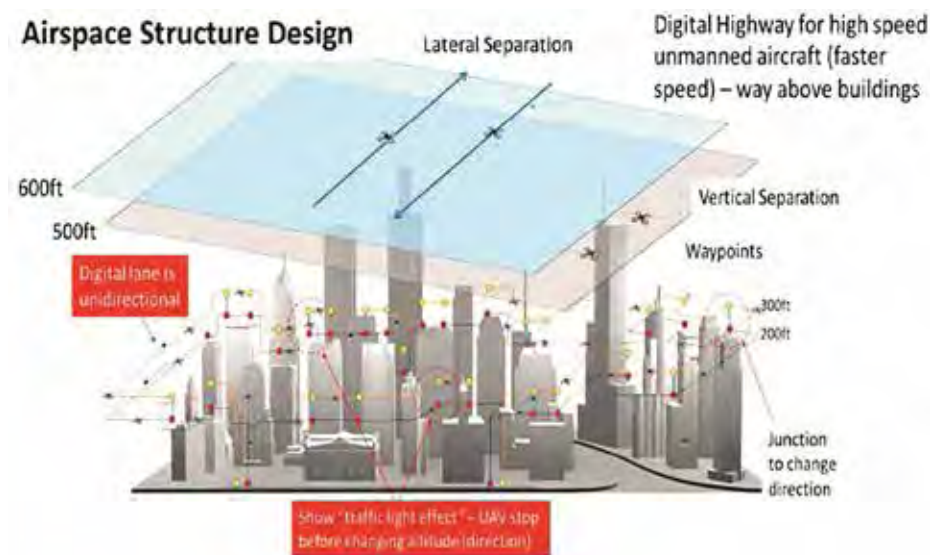
- *Open*: this is the low risk category; UAVs certified in this category will operate in accordance with certain principles without an operation permission of the respective authority.

- *Specific*: high risk category which requires authorization for UAV deployment/type of deployment. That means that a risk shall be assessed taking into account the capabilities of a drone, operator, environment and a specific task.

- *Certified*: maximum risk category which requires the drone and operator certification by the respective authority.

All three categories can be used for different applications of UAVs. Part of the task involves the integration of various risk profiles for UAVs which perform missions of various types.

4. Urban Traffic Management of Unmanned Aircraft System (UTM-UAS)

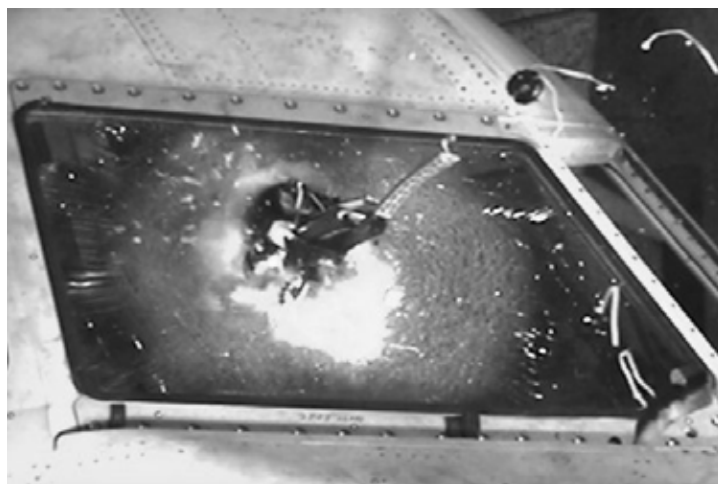


Pic. 3. Singapore Airspace Urban Traffic Control Structure developed by NTU [12].

The researchers from Nanyang Technological University (NTU) are working on the creation of the UAV movement control system [12] so that UAVs can efficiently and safely fly in Singapore's airspace (Pic. 3). This program is focused on such areas as intellectual and safe routing, motion detection and prevention and control systems for air traffic coordination.

Air Traffic Management Research Institute (ATMRI), a joint NTU research center and Civil Aviation Authority of Singapore (CAAS) take charge of the project. The leader of the research program is NTU Professor Low Kin Huat, an expert in robotics and unmanned aerial vehicles from the School of Machine Engineering and Aerospace Engineering.

A comparative analysis and synthesis of the information presented in the programs mentioned above shows that the main safety principle applied there is the choice of routes for UAV flights over such areas of the city which will not be damaged or will be slightly damaged by accidental crash. These areas cover water reservoirs, parks, etc. The programs also paid a lot of attention to preventing the UAVs collisions with other air vehicles. But almost no attention was paid to the fact that the flight routes of not only amateur UAVs but also cargo UAVs would intersect with the main land driveways, transport routes, e.g. highways and railways, including high-speed ones. An accidental crash of a cargo drone on the main



Pic. 4. Air drone breaking through the airliner's windshield during testing [13].



Pic. 5. Airliner damaged following the collision with UAV [20].

land transport route can cause disastrous effects due to, for example, a highway accident or a high-speed railway accident.

Thus one can cite a test of British scientists conducted in the laboratory of the Aviation Research Center in Farnborough (England) as an example of possible consequences of the accident involving UAVs. The test was carried out using an air gun, unmanned aerial vehicles as well as helicopter and airliner cabs [13].

The test has shown that even a small amateur drone can constitute a serious danger, and that the heavier UAVs which are in ever-growing use can break the airliner's windshield at collision at the heights and speeds typical of the airplane approaching to land (Pic. 4). In this regard it should be borne in mind that such a speed is quite comparable to the speed of a high-speed train, and the design and shape of the airliner's cabin are also very similar to that of a high-speed train.

«While an existing probability of a collision of UAVs with other vehicles seems to be low» [14], its consequences according to researches [15–18] might be rather important (Pic. 5), considering particularly the weight of professional drones that can attain tens of kilogrammes and the fact that some of them use liquid fuel [19].

We can also cite several examples of collision of UAV with land vehicles, comprising trains [21] and automobiles [22; 23]. «UAV collided with a vehicle on the highway A99 near the city of Germering in Bavaria. No driver, neither a passenger were victims, but the accident damaged the front part of the vehicle. The UAV pilot surrendered to the police after addressing the media, but still insisted that the fault was caused

by a technical malfunction of the UAV. The man, 51 year old resident of Munich stated to the police that the UAV came out of control due to technical malfunction or a fault of the control signal transmission. The UAV of 1,2 kg was launched in Munich Neuauubing district located at some kilometres from the accident site, landed on the highway, and the vehicle drove directly into it. The police was investigating whether dangerous obstacles had been created to road traffic» [22]. It is not for the first time that a UAV is engaged in accidents on highways in Germany [23], so now the flights of UAVs over the highways are prohibited [23].

«The events of such kind can be caused by pilots' errors or by technical malfunctioning of the UAV. Not only amateur pilots but professional operators can also commit errors while piloting the UAV» [18].

«It worth noting that cyber interference, like interference of the control channel of the UAV, is a serious threat for safety of operation of UAVs» [24], as well as radio frequency interference, resulting in the loss of operator's control of the aircraft [25; 26].

Currently «UAVs are still a developing sphere of aviation with a huge quantity of factors of unaccountable risks» [18].

Conclusions

The analysis showed that there is a need to develop a new concept of the safety of cargo drones in the urban environment, which will pay special attention to the threat of UAVs collision with other vehicles.

The concept should, among other things, define the requirements for the technology of safe UAV flight over the transport routes,

including highways, high-speed railways, etc. The development of such a concept will be a turning point to start the full-scale use of UAVs as a new and effective means of cargo delivery what will create the next-generation transport infrastructure in cities.

REFERENCES

1. Unmanned Aircraft Systems Advisory Group (UAS-AG). Official website of ICAO. [Electronic resource]: [https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-\(UAS-AG\).aspx](https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-(UAS-AG).aspx). Last accessed 17.05.2019.
2. Prime Air. Official website of Amazon. [Electronic resource]: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>. Last accessed 10.06.2019.
3. Matternet. Official website of Matternet. [Electronic resource]: Retrieved from <https://mttr.net/product>. Last accessed 10.06.2019.
4. The government plans to introduce the intelligent surface traffic control systems [*Pravitel'stvo planiruet vnedrit' intellektual'nye sistemy upravleniya nazemnym dvizheniem*]. Official website of the Ministry of Transport of Russia. [Electronic resource]: <https://www.mintrans.ru/press-center/branch-news/1342>. Last accessed 17.05.2019.
5. Shvetsov, A. V., Shvetsova, S. V., Balalayev, A. S. The direction of reforming of system of ensuring transportation security in the Russian Federation [*Napravlenie reformirovaniya sistemy obespecheniya transportnoj bezopasnosti v Rossijskoj Federatsii*]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situatsij*, 2018, Iss. 3, pp. 81–87.
6. Shvetsov, A. V., Shvetsova, S. V. Transport Safety Regulation [*Regulirovanie v sfere transportnoj bezopasnosti*]. In: Grown efficiency of transport system of a region; problems and prospects [*Povyshenie effektivnosti transportnoj sistemy regiona: problem i perspektivy*]. Proceedings of All-Russian Research and Practice Conference with foreign participation. Khabarovsk, FESTU publ., 2015, pp. 268–273.
7. Shvetsov, A. V., Shvetsova, S. V. Enhancement of efficiency of ensuring transportation security in the Russian Federation [*Povyshenie effektivnosti obespecheniya transportnoj bezopasnosti v Rossijskoj Federatsii*]. In: Modern technology of the Russian transport system management: Innovations, Efficiency, Effectiveness [*Sovremennye tekhnologii upravleniya transportnym kompleksom Rossii: Innovatsii, effektivnost', rezul'tativnost'*]. Proceedings of First National Research and Practice Conference. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2018, pp. 226–232.
8. Mail drone was shot down by military jammers? [*Pochtovyj dron sbili glushilki?*] [Electronic resource]: <https://daily03.ru/news/pochtovyj-dron-sbili-voennye-glushilki.html>. Last accessed 10.06.2019.
9. SESAR2020. Official website of Eurocontrol [Electronic resource]: <https://www.eurocontrol.int/esar2020>. Last accessed 10.06.2019.
10. Unmanned Aircraft System Traffic Management. Official website of National Aeronautics and Space Administration (NASA). [Electronic resource]: <https://utm.arc.nasa.gov/index.shtml>. Last accessed 17.05.2019.
11. Civil drones (Unmanned aircraft). Official website of European Aviation Safety Agency. [Electronic resource]: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas#group-easa-related-content>. Last accessed 10.06.2019.
12. NTU to develop traffic management solutions so drones can fly safely in Singapore's airspace. Official website of Nanyang Technological University. [Electronic resource]: http://news.ntu.edu.sg/Pages/NewsDetail.aspx?URL=http://news.ntu.edu.sg/news/Pages/NR2016_Dec28.aspx&Guid=20327ba4-b019-4a38-a86f-47e64d89ba0d&Category=All. Last accessed 10.06.2019.
13. UK test flies drones into damaging collisions with aircraft. Crikey. [Electronic resource]: <https://blogs.crikey.com.au/planetalking/2017/07/23/uk-test-flies-drones-into-damaging-collisions-with-aircraft/>. Last accessed 15.05.2019.
14. Dourado, E., Hammond, S. Do consumer drones endanger the national airspace? Evidence from wildlife strike data. Mercatus Center, George Mason University, Arlington and Fairfax, Virginia, 2016.
15. Small remotely piloted aircraft systems (drones): Mid-air collision study. Report by QinetiQ, Natural Impacts commissioned by the Department for Transport, the Military Aviation Authority and British Airline Pilots' Association, 2016. [Electronic resource]: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/628092/small-remotely-piloted-aircraftsystems-drones-mid-air-collision-study.pdf. Last accessed 15.05.2019.
16. Schroeder, K., Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS ingestion into high-bypass engines. Part II: Drone parametric study. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017.
17. Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS Ingestion into High-Bypass Engines. Part I: Bird vs. Drone. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017.
18. Wild, G., Murray, J., Baxter, G. Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters. Aerospace, 2016, Vol. 3, Iss. 3, pp. 22–32.
19. Huttunen, M. Civil unmanned aircraft systems and security: The European approach. Journal of Transportation Security, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12198-019-00203-0>. Last accessed 25.09.2019.
20. In Mexico a drone collided with an airplane during landing [*V Mexike dron vrezalsya v samolyot kogda on zakhodil na posadku*] [Electronic resource]: <https://focus.ua/world/414989-v-meksike-dron-vrezalsya-v-samolet-kogda-on-zakhodil-na-posadku/>. Last accessed 15.05.2019.
21. Flying Scotsman hit by drone on North York Moors. The Telegraph. [Electronic resource]: <https://www.telegraph.co.uk/news/uknews/road-and-railtransport/12196992/Flying-Scotsman-hit-by-drone-on-North-York-Moors.html>. Last accessed 15.05.2019.
22. Drone crashes into car on Autobahn outside Munich. The Local. [Electronic resource]: <https://www.thelocal.de/20170130/drone-collides-with-car-on-motorway/>. Last accessed 15.05.2019.
23. Autobahn driver suffers drone windscreen smash The Local. [Electronic resource]: <https://www.thelocal.de/20150522/drone-smashes-into-car-windscreen-on-autobahn/>. Last accessed 15.05.2019.
24. Altawy, R., Youssef, A. M. Security, privacy, and safety aspects of civilian drones: a survey. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2016, Vol. 1, Iss. 2, Article No. 7.
25. Huttunen, M. Drone Operations in the Specific Category: A Unique Approach to Aviation Safety. *The Aviation & Space Journal*, 2019, Vol. 18, No. 2, pp. 2–21. [Electronic resource]: <http://www.aviationspacejournal.com/wp-content/uploads/2019/08/The-Aviation-SpaceJournal-Year-XVIII-April-July-2019-1.pdf>. Last accessed 25.09.2019.
26. Klenka, M. Major incidents that shaped aviation security. *Journal of Transportation Security*, 2019, Vol. 12, Iss. 1–2, pp. 39–56. ●





Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте



Ивашевский Михаил Романович – ОАО «РЖД», Москва, Россия.*

Михаил ИВАШЕВСКИЙ

Статья посвящена анализу способов повышения безопасности движения поездов. Одним из путей снижения аварийности на железной дороге является своевременное обнаружение опасных объектов и оповещение всех участников движения, прежде всего машиниста. Подобное оповещение возможно реализовать с помощью системы интеллектуального видеонаблюдения (СИВ). Цель статьи – исследовать возможности использования СИВ для повышения безопасности движения поездов. Метод (способ достижения цели) состоит из нескольких этапов: разработка критериев соответствия функциональных возможностей СИВ задачам повышения безопасности движения поездов, оценка и расчёт допустимых значений критериев соответствия.

В работе предложена схема организации СИВ на базе волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) и сети передачи данных, отмечены достоинства и недостатки СИВ, сфор-

мулированы требования к ней. Достоинством видеонаблюдения является наличие видеоинформации об объекте у машиниста поезда, позволяющей своевременно предотвратить аварию. Недостатком СИВ является высокая вероятность ложного обнаружения, которая может привести к ложным срабатываниям системы.

Для снижения числа ложных срабатываний существуют два пути: совершенствование алгоритмов видеоаналитики в устройстве распознавания (УР) и повышение качества видеосигналов на входе УР. Работа посвящена снижению вероятности ложного срабатывания за счёт улучшения качества связи. Отмечено, что эффективным методом является использование новой элементной базы электроники на базе наноструктурированных материалов. Такие материалы позволяют улучшить оптоэлектронные характеристики основных элементов СИВ: фотосенсоров и фотоприёмников.

Ключевые слова: транспорт, безопасность движения, видеонаблюдение, видеоаналитика, фотосенсор, цифровой шум, погрешность распознавания, оптоэлектроника, вероятность ошибки.

*Информация об авторе:

Ивашевский Михаил Романович – администратор телекоммуникационных ресурсов 1 категории Центра управления телекоммуникационными ресурсами (ЦУТК) структурного подразделения Центральной станции связи (ЦСС) – филиала ОАО «РЖД», аспирант кафедры автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, misha_13@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.08.2019, принята к публикации 21.10.2019.

For the English text of the article please see p. 307.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Железнодорожный транспорт во всём мире признан самым безопасным видом транспорта. Однако статистика аварий высока [1]. Самые частые последствия аварий — наезды подвижного состава на автотранспорт и пешеходов. Это происходит в местах отсутствия защитных ограждений железнодорожных путей, особенно на участках скоростного движения, а также на переездах из-за нарушений правил пересечения железной дороги [2].

Существуют несколько кардинальных способов предотвращения аварий на переездах: устранение одноуровневого пересечения железнодорожного полотна и автомобильной дороги; сокращение числа переездов; своевременное предупреждение водителей о приближающемся поезде, а в случае возникновения опасной ситуации своевременное обнаружение посторонних объектов и оповещение специальных служб железной дороги и прежде всего, машиниста приближающегося поезда [3; 4].

Первый вариант — очень затратный и применение его обосновано только для дорог с интенсивным движением транспорта. Второй ухудшает социальную и транспортную инфраструктуру, сообщение между близлежащими населёнными пунктами. Третий путь своевременного оповещения всех участников движения является наиболее целесообразным. Такое оповещение можно реализовать с помощью технических средств систем интеллектуального видеонаблюдения (СИВ) [5, с. 40—44].

Основная идея концепции «умного переезда» — создание интеллектуальной системы мониторинга, способной выявлять потенциально опасные объекты, отслеживать перемещение объекта в заданной зоне наблюдения и информировать о наличии потенциальной угрозы всех участников перевозочного процесса, прежде всего машиниста.

В последние несколько лет на железных дорогах Европейского союза, Японии, Северной Америки ведутся работы по улучшению существующих систем оповещения на железнодорожных переездах за счёт внедрения передовых технологий связи, видеонаблюдения и обработки изображе-

ний. Подобная концепция получила название «умный переезд» (smart railroad crossing) [6].

Так, в Великобритании на железной дороге компании Network Rail при участии операторов связи Amplicon и TEW Plus Ltd внедряется система видеонаблюдения, обеспечивающая автоматическое сканирование и обнаружение препятствий на переезде [7].

В ЕС, в рамках проекта SELCAT (Safer European Level Crossing Assessment and Technology), направленного на минимизацию воздействия человеческого фактора как основной причины аварий, сформирована стратегия для контроля и снижения рисков на переезде. Предложенное решение заключается в обнаружении препятствия (на переезде) за счёт использования технологии видеонализа. Это решение интегрирует другие современные технологии, такие, как использование спутниковой связи и систем радиопередачи.

Примером использования данной технологии является Германия: на железнодорожных переездах устанавливается камера с функцией внутренней видеоаналитики. Поступающая информация обрабатывается диспетчером, который может запретить проезд поезда в случае обнаружения препятствия. Одним из производителей, разработавших такую систему безопасности, является компания Alstom [8].

Компания ОАО «РЖД» также реализует передовые цифровые технологии. Так в 2019 году была принята долгосрочная программа развития холдинга, предусматривающая переход на «Цифровую железную дорогу». Концепция «Цифровой железной дороги» заключается в полной интеграции интеллектуальных коммуникационных технологий между пользователем, транспортным средством, системой управления движением и инфраструктурой [9].

Видеонаблюдение широко используется на железнодорожном транспорте в РФ и за рубежом для различных целей, главной из которых является охрана объектов. Функция повышения безопасности движения поездов отличается критериями и оценками эффективности СИВ.

Внедрение новых систем оповещения является перспективным направлением повышения безопасности движения.



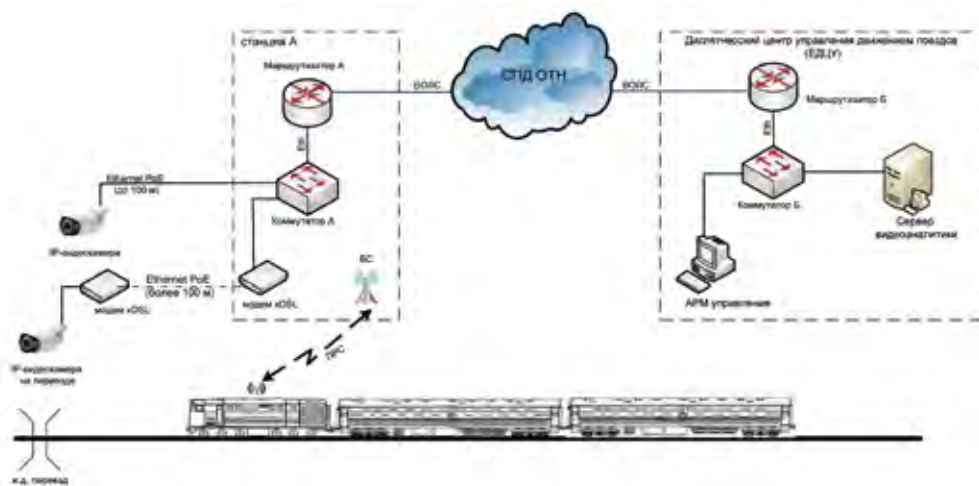


Рис. 1. Организации СИБ на железнодорожном транспорте.

ЦЕЛЬ И МЕТОД

Цель данной работы заключается в рассмотрении вопроса возможности использования систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения. Метод решения этой задачи состоит из нескольких этапов:

- 1) разработка критериев соответствия СИБ задачам повышения безопасности движения;
- 2) разработка методики оценки критериев соответствия;
- 3) расчёт допустимых значений критериев.

В статье предлагаются два критерия соответствия СИБ задачам повышения безопасности движения на железнодорожном транспорте:

- 1) качество видеосигнала;
- 2) достоверность полученной информации.

Первый критерий характеризует канал связи и оценивается приведённой дисперсией суммарной погрешности δ^2_{Σ} . Второй критерий характеризует алгоритмы распознавания (видеоаналитику) СИБ и оценивает вероятностями правильного и ложного обнаружений.

Такая оценка критериев соответствия согласуется с показателями функциональной безопасности на железнодорожном транспорте (ГОСТ 33358-2015 «Системы управления и обеспечения безопасности движения поездов»).

Для расчёта допустимых значений оценок качества и достоверности сигнала

СИБ (критериев) в работе вводится понятие функции потерь (величина экономического ущерба, который наступает в результате пропуска или ложного обнаружения опасного объекта).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариант организации системы интеллектуального видеонаблюдения на железнодорожном транспорте

Простейшая СИБ предусматривает: установку видеокамер на переездах, передачу видеосигнала на видеосервер единого диспетчерского центра управления (ЕДЦУ), распознавание опасных объектов с помощью видеоаналитики, передача команд торможения на локомотив из ЕДЦУ посредством поездной радиосвязи (ПРС). Схема организации СИБ представлена на рис. 1.

В качестве сетевой инфраструктуры использована сеть передачи данных общетехнологического назначения (СПД ОТН) ОАО «РЖД». СПД ОТН отвечает требованиям по пропускной способности, предъявляемой к каналам связи. СПД ОТН является сетью передачи данных на основе протокола TCP/IP. В качестве направляющих линий от сетевого элемента до видеокамеры на объекте наблюдения можно применить медножильный кабель, либо волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС). В случае подключения по медножильному кабелю на расстояние более 100 м требуется применение модемов xDSL

(цифровая абонентская линия). Питание оборудования видеонаблюдения возможно организовать по технологии Power over Ethernet (PoE) [10].

Достоинством видеонаблюдения является наличие видеoinформации об объекте у машиниста поезда, позволяющей своевременно предотвратить аварию. Однако системы СИВ имеют существенный недостаток: высокую вероятность ложного обнаружения $P_{\text{лож.обн.}} \geq 10^{-3}$, которая может привести к необоснованным командам экстренного торможения и, как следствие, к тяжёлым последствиям в виде травм пассажиров, нарушению графика движения поездов и т.д. Одна из причин ложных обнаружений — в недостаточно высоком качестве формирования цифрового видеосигнала [11, с. 24–29].

Для снижения числа ложных срабатываний существуют два пути: совершенствование алгоритмов видеоаналитики в устройстве распознавания (УР) и повышение качества видеосигналов на входе УР. Работа посвящена снижению вероятности ложного срабатывания за счёт улучшения качества связи. Недостаточно высокое качество формирования цифрового видеосигнала оказывает существенное влияние на эффективность распознавания опасных объектов. Поэтому главными задачами, связанными с внедрением СИВ, являются оценка качества передачи видеосигналов и разработка путей снижения вероятности ложного обнаружения.

Самым эффективным способом снижения вероятности ложного обнаружения является использование новой элементной базы электроники на наноструктурированных материалах, которые позволяют значительно улучшить оптоэлектронные характеристики фотосенсоров (ФС) и фотоприёмников (ФП). Следует отметить, что при использовании в качестве линий связи волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) искажения видеосигналов за счёт хроматической и поляризационной дисперсий (при условии постоянного мониторинга) имеют значения на два порядка ниже, чем от ФС и ФП [12].

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной задачи состоит из нескольких этапов:

1) выбор и обоснование критериев оценки соответствия количественных и качественных характеристик СИВ требованиям безопасности на железнодорожном транспорте. В качестве функции потерь выбраны экономические убытки железных дорог из-за аварий на переездах, которые позволили получить допустимые значения $P_{\text{лож.обн.}}$, $P_{\text{пр.обн.}}$;

2) разработка методик оценки количественных и качественных показателей эффективности СИВ на железнодорожном транспорте;

3) определение допустимых значений показателей функционирования СИВ исходя из условий работы железнодорожного транспорта и с учётом функции потерь;

4) разработка предложений по повышению эффективности СИВ (за счёт элементной базы электроники нового поколения на наноструктурах);

5) расчёт величины выигрыша по показателям оценки эффективности СИВ (приведённой дисперсии суммарной погрешности и вероятности правильного обнаружения) для двух элементных баз: микроэлектроники и наноэлектроники.

Реализация каждого этапа основывается на исследованиях особенностей работы ФС и ФП, их оптоэлектронных характеристик и влияния на них полупроводникового материала.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В качестве критериев эффективности СИВ для повышения безопасности движения поездов следует выбрать показатель качества сигналов видеонаблюдения (отношение мощностей сигнала и шума) и показатель достоверности, оцениваемый вероятностью правильного обнаружения опасных объектов.

Для анализа эффективности СИВ необходимо разработать следующие методики:

1. Методика расчёта показателя качества, которая включает:

1) оценку качества сигналов СИВ с помощью приведённой суммарной дисперсии



Экономический ущерб от аварии на железнодорожном переезде

Наезд поезда на объект в результате пропуска опасной ситуации		Экстренное торможение в результате ложного обнаружения объекта	
Описание последствий происшествия	Описание расходов	Описание последствий происшествия	Описание расходов
1. Тяжёлое, либо лёгкое ранение человека. Смерть человека	а) лечение в больнице; б) реабилитация; в) выплаты пособий по утрате трудоспособности, либо компенсация семье погибшего	1. Тяжёлое ранение, либо лёгкое человека	а) лечение в больнице; б) реабилитация; в) выплаты пособий по утрате трудоспособности
2. Полная утрата или повреждение объекта хозяйствования (например, автомобиль)	Стоимость объекта хозяйствования, стоимость ремонта, стоимость утилизации, компенсация по страхованию	2. Повреждения внутреннего оснащения вагонов, конструктивных элементов систем торможения и др.	Стоимость восстановления повреждённого оборудования вагонов и всего поезда в целом
3. Нарушение графика движения поездов	Ущерб от нарушения производственных связей предприятий, пользующихся услугами транспортной системы; ущерб от снижения эффективности работы транспортной системы	3. Порча груза (багажа)	Стоимость груза (багажа), компенсация по страхованию
		4. Нарушение графика движения поездов	Ущерб от нарушения производственных связей предприятий, пользующихся услугами транспортной системы; ущерб от снижения эффективности работы транспортной системы

текущей погрешности δ^2_{ϵ} , учитывающей искажения сигнала фотосенсором, линией связи и фотоприёмником (обратной величине сигнал/шум);

2) оценку качества сигналов СИВ на выходе фотосенсора с помощью приведённой дисперсии аномальной погрешности $\delta^2_{\text{фс}}$, возникающей за счёт внутренних шумов пикселей;

3) оценку качества сигналов СИВ на выходе ФП с помощью приведённой дисперсии аномальной погрешности $\delta^2_{\text{ан}}$, возникающей за счёт теплового шума фотоприёмника.

2. Методика расчёта показателя достоверности сигналов СИВ с помощью вероятности правильного обнаружения $P_{\text{пр.обн}}$, осуществляемой на основании критерия Неймана–Пирсона.

3. Методика обоснования предложений по повышению показателей качества и достоверности сигналов СИВ за счёт применения новой элементной базы с использованием наноструктури-

рованных материалов, которая предполагает поиск решений следующих задач:

1) проектирования нового полупроводникового материала с заданными оптоэлектронными характеристиками;

2) расчёта показателей эффективности нового материала на объёмных кристаллах (микроэлектроника) и квантовых структурах (наноэлектроника) в виде количественных оценок повышения:

- а) коэффициента поглощения света;
- б) квантовой эффективности;
- в) чувствительности;
- г) отношения сигнал/шум;

3) оценки повышения качества сигналов СИВ за счёт нового полупроводникового материала в виде расчётов:

- а) вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ на выходе ФП;
- б) величины выигрыша по параметру $\delta^2_{\text{ан}}$;
- в) величины выигрыша по параметру $\delta^2_{\text{фс}}$;

г) величины выигрыша по параметру δ_ε^2 для наихудших условий (с/ш).

4) оценки повышения достоверности сигналов СИВ за счёт нового материала с помощью расчёта вероятности правильного обнаружения $P_{\text{пр.обн.}}$.

ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ

В качестве функции потерь принята величина экономического ущерба, который наступает в результате пропуска или ложного обнаружения опасного объекта. Анализ всех возможных вариантов аварийных ситуаций на переездах, касающихся расчёта вероятностей пропуска и ложного обнаружения, показал, что самыми опасными являются те случаи, когда сигнал от СИВ поступил (или не поступил) в момент, когда торможение возможно только в экстренном режиме. Торможение в экстренном режиме — это особый процесс, который строго регламентируется служебными инструкциями [13].

При поступлении от СИВ ложного сигнала о наличии опасного объекта машинист применяет экстренное торможение. В случае пропуска системой опасного объекта машинист не имеет информации о ситуации на переезде и не может немедленно включить режим экстренного торможения и, как следствие, происходит наезд на объект. При сближении с объектом процесс торможения происходит в другом более безопасном для пассажиров режиме.

В таблице 1 приведено описание опасных случаев с подвижным составом в виде наездов и экстренного торможения в результате которых железная дорога будет нести большие экономические убытки [14, с. 12–13].

Максимальные значения вероятностей пропуска $P_{\text{пр.}}$ и ложного обнаружения $P_{\text{л.обн.}}$ и минимальное значение вероятности правильного обнаружения $P_{\text{пр.обн.}}$ определяют следующим образом:

$$P_{\text{пр.}} = \frac{Q_{\text{min}}}{\kappa \cdot Q_{\text{пр.}}}; \quad (1.1)$$

$$P_{\text{пр.обн.}} = 1 - P_{\text{пр.}}; \quad (1.2)$$

$$P_{\text{лож.обн.}} = \frac{Q_{\text{min}}}{l \cdot Q_{\text{лож.обн.}}}, \quad (1.3)$$

где Q_{min} , $Q_{\text{пр.}}$, $Q_{\text{лож.обн.}}$ — расходы соответственно минимальные, при пропуске, при ложном срабатывании;

κ , l — среднее число соответственно пропусков (наездов) и ложных торможений для одной дороги за год.

Расчёты показали следующие значения вероятностей:

$$\begin{aligned} P_{\text{пр.}} &= 0,0007; \\ P_{\text{пр.обн.}} &= 1 - P_{\text{пр.}} = 0,9993; \\ P_{\text{л.обн.}} &= 10^{-4}. \end{aligned}$$

Таким образом, системы видеонаблюдения, используемые для повышения безопасности движения, должны обеспечить показатели эффективности $P_{\text{пр.обн.}} \geq 0,9993$; $P_{\text{л.обн.}} \leq 10^{-4}$.

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА СИГНАЛОВ СИВ

Безопасность движения поездов во многом определяется результатом работы устройства распознавания опасных объектов СИВ. Результат распознавания образа в видеосервере СИВ зависит от многих факторов: качества формирования цифрового сигнала на передающей стороне (разрешения фотосенсора видеокамеры, погрешностей цифрового преобразования, погодных условий, освещённости, посторонних источников света и т.д.), помех и искажений в линии связи, шумов фотоприёмника и погрешностей интерполяции на приёмной стороне, алгоритма распознавания. Большинство из этих факторов вызывают искажения видеосигнала, которые можно оценить показателем качества в виде приведённой к мощности полезного сигнала дисперсии суммарной погрешности δ_ε^2 на входе устройства распознавания СИВ [12; 15, с. 12]:

$$\delta_\varepsilon^2 \approx \delta_{\text{фс}}^2 + \delta_{\text{ан}}^2. \quad (2)$$

Основной причиной погрешностей, вносимых фотосенсором, является цифровой шум [16, с. 400]. Поэтому влияние внутреннего шума пикселей необходимо анализировать с учётом цифровой обработки видеосигнала.

Особенности работы ФС заключаются в том, что внутренние шумы пикселей складываются с фототоком видеоизображения. После процесса дискретизации непрерывного сигнала амплитуда им-



пульсов состоит из суммы сигнала λ и шума h . Положительная разность между суммой $(\lambda + h)$ и ближайшим целым числом (уровнем квантования) может быть меньше половины шага квантования $(\Delta_{\text{кв}}/2)$. В случае округления в меньшую сторону (по правилам арифметического округления) шум отбрасывается. В других вариантах соотношений сигнала и шума могут происходить аномальные ошибки, т.е. ошибки в присвоении номера уровня квантования. Величину аномальной ошибки $\delta_{\text{фс}}^2$ при условии гауссовского распределения плотности вероятностей фототока можно рассчитать следующим образом [15, с. 13]:

$$\delta_{\text{фс}}^2 \approx 12 \cdot \left[\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{9\rho_{\text{вых.фс}}^2}{2L_{\text{кв}}^2}\right) \right], \quad (3)$$

где $\rho_{\text{вых.фс}}^2 = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{\sigma_h^2}$ — отношение мощностей

фототока и шума на выходе фотосенсора и входе устройства аналого-цифрового преобразования АЦП;

$L = a^K$ — количество уровней квантования;

a — разрядность кода;

K — число разрядов в кодовой комбинации.

Для расчёта значений аномальной погрешности на выходе фотоприёмника $\delta_{\text{ан}}^2$ можно воспользоваться методом вычисления вероятности ошибки при приёме элементарного импульса на основе анализа Q -фактора [17, с. 96], зависящего от отношения мощностей сигнала и шума на выходе ФП $\rho_{\text{вых.фп}}^2$.

Величина аномальной ошибки на выходе ФП для гауссовского распределения плотностей вероятностей сигнала рассчитывается по формуле [18, с. 392]:

$$\delta_{\text{ан}}^2 = 12 \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{вых.фп}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{вых.фп}}^2}{8}\right). \quad (4)$$

Отсюда выражение приведённой дисперсии суммарной погрешности СИВ равно (1):

$$\delta_{\text{с}}^2 \approx 12 \cdot \left[\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{9\rho_{\text{вых.фс}}^2}{2L_{\text{кв}}^2}\right) + \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{вых.фп}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{вых.фп}}^2}{4}\right) \right]. \quad (5)$$

Составляющие (2), (3) приведённой дисперсии суммарной погрешности (4) имеют разный вес, зависящий от отношения мощностей сигнала и шума на выходе ФС и ФП.

РАСЧЁТ КРИТЕРИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ СИГНАЛОВ СИВ

Критерий достоверности оценивается с помощью вероятности правильного обнаружения $P_{\text{пр.обн.}}$ согласно алгоритму Неймана—Пирсона.

Вероятность правильного обнаружения на выходе устройства обнаружения СИВ, реализованного в виде согласованного фильтра, рассчитывается следующим образом [12, с. 12; 18, с. 173]:

$$P_{\text{пр.обн.}} = V \left[\frac{H}{\sqrt{2/\delta_{\text{с}}^2}} - \sqrt{2/\delta_{\text{с}}^2} \right], \quad (5)$$

где $V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-z^2/2} dz$ —

табличный интеграл.

Алгоритм расчёта следующий:

а) задаётся вероятность ложного обнаружения;

б) по табличному интегралу $V(x)$ находится порог срабатывания приёмного устройства H с учётом отношения мощностей сигнала и шума $\alpha_{\text{обн}}^2$;

в) по формуле (5) определяется вероятность $P_{\text{пр.обн.}}$.

Отношение мощностей сигнала и шума $\alpha_{\text{обн}}^2$ (с/ш) есть величина, обратная приведённой дисперсии суммарной погрешности $(\alpha_{\text{обн}}^2 = \frac{1}{\delta_{\text{с}}^2})$.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Улучшение качества видеосигналов возможно путём снижения тепловых шумов и повышение чувствительности оптоэлектронных устройств (ОЭУ), лежащих в основе ФС и ФП. Такой результат достигается за счёт применения элементной базы нового поколения. Главное отличие таких ОЭУ — использование наноструктурированных материалов, предварительно очищенных от тяжёлых изотопов. Эффективность изотопической очистки можно оценить на примере наиболее распространённых

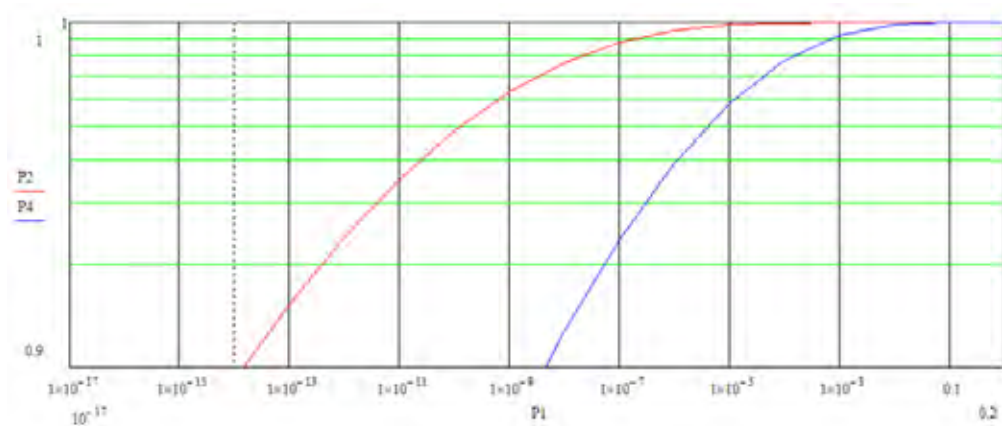


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от вероятности ложного обнаружения $P_{\text{пр.обн.}} = f(P_{\text{л.обн.}})$.

соединений, а именно, твёрдых растворов на основе арсенида галлия. Известно, что изотопическая очистка полупроводникового кремния позволила повысить быстродействие микропроцессоров более чем в два раза [19, с. 409]. Большого эффекта можно ожидать от изотопической очистки твёрдых растворов из арсенида галлия, т.к. галлий легче кремния (отношение эффективных масс электронов

$$\frac{m_{eSi}}{m_{eGa}} = \frac{0,19m_0}{0,067m_0} = 2,84.$$

Основным показателем улучшения качества ФС и ФП за счёт очистки полупроводникового материала от тяжёлых изотопов является повышение чувствительности R_i ОЭУ. Чувствительность напрямую связана с квантовой эффективностью материала η , зависящей от n (концентрации тяжёлых изотопов), и коэффициентом поглощения света α [16, с. 393, 399].

Как показали исследования, повышение квантовой эффективности увеличит чувствительность R_i оптоэлектронного устройства (соответственно ФС или ФП) на полупроводниковом кристалле в 1,23 раза, на квантовой яме в 1,325 раз. Соответственно уменьшится мощность теплового шума, увеличится отношение сигнал/шум на выходе ОЭУ.

Так, значение $\rho^2_{\text{вых.фс.}}$ для пикселей на объёмном кристалле из арсенида галлия увеличится в 1,23 раза, что значительно

уменьшит величину приведённой дисперсии текущей погрешности ФС $\delta^2_{\text{фс}}$.

Аналогично увеличится отношение мощностей сигнала и шума $\rho^2_{\text{вых.фп}}$ на выходе фотоприёмника на множественных квантовых ямах (МКЯ) после изотопической очистки материала. Величина $\rho^2_{\text{вых.фп}}$ повысится в 1,255 раза. Этот факт отразится на значении приведённой дисперсии аномальной ошибки $\delta^2_{\text{ан}}$ ФП, а также приведённой дисперсии суммарной погрешности δ^2_{Σ} и вероятности правильного обнаружения $P_{\text{пр.обн.}}$ устройством распознавания объекта СИВ. Так, улучшение оптоэлектронных характеристик материала ФС и ФП позволит уменьшить приведённую дисперсию суммарной погрешности более чем в 5,76 раза.

Рассчитанный выигрыш по отношению мощностей сигнала и шума на входе устройства распознавания приводит к увеличению вероятности правильного обнаружения, уменьшению вероятности ложного обнаружения опасных объектов и повышению безопасности движения поездов.

На рис. 2 представлены две зависимости $P_{\text{пр.обн.}} = f(P_{\text{л.обн.}})$ вероятности правильного обнаружения ($P_{2,4}$) от вероятности ложного обнаружения (P_3).

Вероятности рассчитаны для случая использования согласованных фильтров в качестве устройств распознавания по критерию Неймана–Пирсона для вариантов ОЭУ без очистки полупроводнико-



вого материала (P_2) и с очисткой (P_4). Как видно из графиков, изотопическая очистка материала даёт значительное повышение вероятности $P_{\text{пр.обн.}}$ и уменьшение вероятности $P_{\text{л.обн.}}$.

Так, полученное выше увеличение отношения мощностей сигнала и шума в 5,76 раз после очистки материала пикселей ФС и ФП увеличивает $P_{\text{пр.обн.}}$ более чем на порядок, и уменьшает $P_{\text{л.обн.}}$ на три порядка. Расчёты показали (рис. 2), что необходимые для предотвращения аварий вероятности ложного срабатывания $P_{\text{л.обн.}} = 10^{-4}$ и правильного обнаружения $P_{\text{пр.обн.}} = 0,9993$ можно обеспечить только с помощью новой элементной базы электроники.

ВЫВОДЫ

1. Как показывает зарубежный и отечественный опыт, СИВ успешно используются для многих функций на ж.д. транспорте: охрана объектов, пожарная безопасность, выявление преступников в местах скопления пассажиров. Но для функции повышения безопасности движения необходимо повышение показателей качества и достоверности сигналов (критериев соответствия).

2. Для повышения показателей качества и достоверности сигналов СИВ необходимо улучшать оптоэлектронные характеристики ОЭУ путём использования наноструктурированного материала нового поколения.

3. Повышение безопасности движения поездов с помощью СИВ зависит от вероятностей правильного $P_{\text{пр.обн.}}$ и ложного обнаружения $P_{\text{л.обн.}}$, которые определяются величиной приведённой дисперсии суммарной погрешности δ_Σ^2 СИВ. Эффективность СИВ, оцениваемая в виде показателей качества (δ_Σ^2) и достоверности ($P_{\text{л.обн.}}$) улучшаются с помощью ОЭУ нового поколения соответственно более чем в 5,76 раз и 10^3 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астапенко Е. В России увеличилось количество ДТП на железнодорожных переездах. 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.kolesa.ru/news/v-rossii-uvlechilos-kolichestvo-dtp-na-zh-d-pereezdah>. Доступ 21.10.2019.
2. Соловьёв А. Е. Виды аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте и их причины // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 5. — С. 156–159.

3. Журавлёва Л. М., Богачёв А. П., Яцкивский Н. В. Снижение аварийных рисков с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения // Мир транспорта. — 2017. — № 3. — С. 206–212.

4. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р., Ефимова Н. О., Яцкивский Н. В. Оценка качества передачи сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения // Проектирование и технология электронных средств. — 2017. — № 3. — С. 10–15.

5. Хрулев А. А. Интеллектуальная система видеонаблюдения в составе комплексной системы безопасности на метрополитене // Системы безопасности. — 2014. — № 2. — С. 40–44.

6. Charles Chen, Harry Hsiao. How to Make Railroad Crossings Safer and Smarter. [Электронный ресурс]: <https://ohsonline.com/Articles/2017/03/01/How-to-Make-Railroad-Crossings-Safer-and-Smarter.aspx>. Доступ 30.10.2019.

7. Пресс-релиз компании Amplicon. Cutting-edge CCTV Level Crossing Surveillance System for Network Rail, 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.amplicon.com/projects/cutting-edge-cctv-level-crossing-surveillance-system-network-rail/>. Доступ 30.10.2019.

8. Turcu, T. Video surveillance of level crossings. [Электронный ресурс]: <https://www.railwaypro.com/wp/video-surveillance-of-level-crossings>. Доступ 30.10.2019.

9. Гапанович В. Цифровая железная дорога: настоящее и будущее. [Электронный ресурс]: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1348652>. Доступ 30.10.2019.

10. Журавлёва Л. М., Богачёв А. П., Яцкивский Н. В., Журавлёв О. Е. Использование систем интеллектуального видеонаблюдения // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 9. — С. 13–15.

11. Орлов С. Видеоаналитика: задачи и решения // Журнал сетевых решений LAN. — 2014. — № 6. — С. 24–29.

12. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р., Яцкивский Н. В., Мягков Я. Ю. Качество сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения // Автоматика, связь, информатика — 2018. — № 2. — С. 2–5.

13. Распоряжение ОАО «РЖД» от 12 декабря 2017 г. № 2580р «О вводе в действие Регламента взаимодействия работников, связанных с движением поездов, с работниками локомотивных бригад при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД».

14. СТО «РЖД» 1.02.003-2006. Методика оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности движения поездов.

15. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р., Курьянцев Д. Г., Лошкарёв В. Л. Повышение качества сигналов системы интеллектуального видеонаблюдения // Проектирование и технология электронных средств. — 2018. — № 1. — С. 10–15.

16. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника — М.: Техносфера, 2006. — 588 с.

17. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. — М.: Солон-Пресс, 2004. — 261 с.

18. Горелов В. Г., Фомин А. Ф., Волков А. А. и др. Теория передачи сигналов. — М.: Маршрут, 2012. — 415 с.

19. Богданова В. А., Давлеткильдеев Н. А., Семиколонова Н. А., Сидоров Е. Н. Эффективная масса электронов в сильнолегированном арсениде галлия при упорядочении примесных комплексов // Физика и техника полупроводников. — 2002. — № 4. — С. 407–411.



Video Surveillance Systems for Railway Transport



Ivashevsky, Mikhail R., JSC Russian Railways, Moscow, Russia.*

Mikhail R. IVASHEVSKY

ABSTRACT

The article is devoted to analysis of ways to increase train traffic safety. One of ways to reduce accident rate on railways is timely detection of dangerous objects and notification of all traffic participants, primarily, the driver. Such a notification can be performed with the help of intelligent video surveillance system (IVS). The objective of the article is to study the possibility of using IVS to increase train traffic safety. Method (way to achieve the objective) consists of several stages: development of criteria of compliance of functional possibilities of IVS with tasks to increase train traffic safety, assessment, and calculation of permissible values of fitting criteria.

The work suggests a scheme of organization of IVS based on fiber-optic data transmission system (FOTS) and data transmission network, highlights advantages and disadvantages of IVS, formulates requirements for IVS.

Advantage of video surveillance is availability of video information about an object to a train driver, which allows to timely prevent an accident. Disadvantage of IVS is high probability of false detection, which can lead to false triggering of a system.

To reduce the number of false triggering there are two ways: improvement of algorithms of video analytics in recognition device (RD) and increase of quality of video signals at the input of RD. The work is devoted to reduction of probability of false triggering due to improvement of communication quality. It is noted that an efficient method is the use of a new element base of electronics based on nanostructured materials. These materials allow to improve optoelectronic characteristics of main elements of IVS which are photosensors and photoreceivers.

Keywords: transport, traffic safety, video surveillance, video analytics, photosensor, digital noise, detection error, optoelectronics, error probability.

*Information about the author:

Ivashevsky, Mikhail R. – category I telecommunications resources administrator of Telecommunication Resource Management Center of the structural unit of the Central Communications Station – a branch of JSC Russian Railways; Ph.D. student at the department of railway automation, telemechanics and communication of Russian University of Transport, Moscow, Russia, misha_13@mail.ru.

Article received 15.08.2019, accepted 21.11.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 298.

Background. Railway around the world is recognized as the safest mode of transport. However, accident statistics are high [1]. The most frequent consequences of accidents are vehicles and pedestrians are hit by rolling stock. This occurs in places where there are no railway guards, especially in high-speed sections, as well as at crossings due to violations of the rules for crossing the railway [2].

There are several cardinal ways to prevent accidents at level crossings: eliminating a single-level intersection of a railway track and a road; reduction in the number of crossings; timely warning of drivers about an approaching train, and, in case of a dangerous situation, timely detection of foreign objects and notification of special railway services and, above all, the train driver of an approaching train [3; 4].

The first option is very costly, and its use is justified only for railways with heavy traffic. The second option worsens social and transport infrastructure, communication between nearby settlements. The third way which is to timely notify all traffic participants is the most appropriate. Such a notification can be implemented using the technical means of intelligent video surveillance systems (IVS) [5, pp. 40–44].

The main idea of the «smart crossing» concept is creation of an intelligent monitoring system that can detect potentially dangerous objects, track movement of an object in a given observation zone and inform about the presence of a potential threat all the participants in the transportation process, especially the driver.

In the past few years, work has been carried out on the railways of the European Union, Japan, and North America to improve existing warning systems at level crossings by introducing advanced communication technologies, video surveillance and image processing. That concept is usually called «smart railroad crossing» [6].

For example, in the United Kingdom, Network Rail, with participation of telecom operators Amplicon and TEW Plus Ltd, is introducing a video surveillance system that automatically scans and detects obstacles at the crossings [7].

In the EU, in the framework of SELCAT (Safer European Level Crossing Assessment

and Technology) project aimed at minimizing the impact of the human factor as the main cause of accidents, a strategy has been formed to control and reduce risks at crossings. The proposed solution is to detect obstacles (at the crossing) through the use of video analysis technology. This solution integrates other modern technologies, such as the use of satellite communications and radio transmission systems.

An example of the use of this technology is Germany: a camera with the function of internal video analytics is installed at level crossings. The incoming information is processed by the dispatcher, who can prohibit train passage if an obstacle is detected. One of the manufacturers who developed such a security system is Alstom [8].

JSC Russian Railways also implements advanced digital technologies. So in 2019, a long-term holding company development program was adopted, providing for transition to the Digital Railway. The concept of the Digital Railway is complete integration of intelligent communication technologies amidst a user, a vehicle, traffic control system and infrastructure [9].

Video surveillance is widely used at railways in the Russian Federation and abroad for various purposes, the main of which is protection of facilities. The function of improving train traffic safety differs in criteria and assessment of IVS efficiency.

The introduction of new warning systems is a promising area for improving traffic safety.

Objective and method

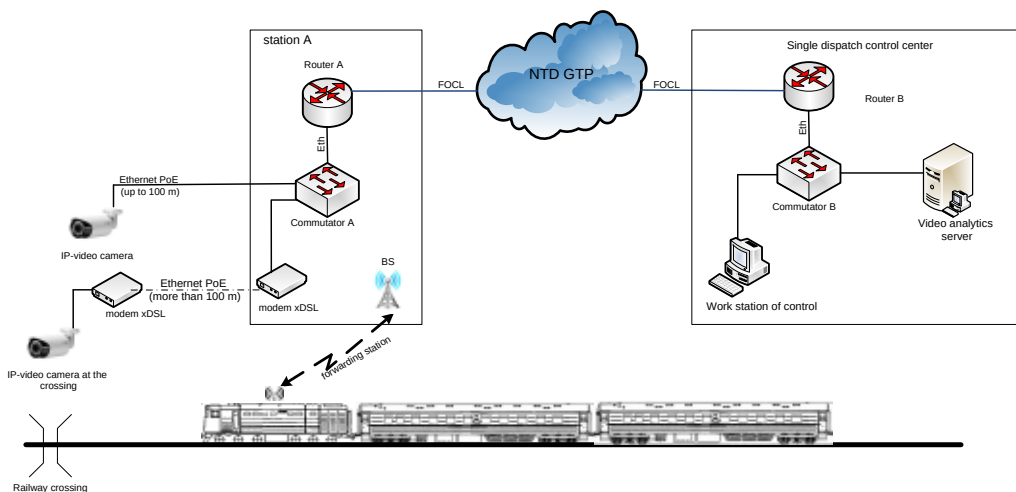
The *objective* of this work is to consider the possibility of using video surveillance systems to improve traffic safety. The *method* for solving this problem consists of several stages:

- 1) development of criteria of compliance with IVS objectives to improve traffic safety;
- 2) development of methods for assessing compliance criteria;
- 3) calculation of acceptable criteria values.

The article proposes two criteria of compliance of IVS with the objectives of improving railway safety:

- 1) video signal quality;
- 2) accuracy of the information received.

The first criterion characterizes the communication channel and is estimated by the reduced dispersion of total error δ_e^2 . The



Pic. 1. Organization of IVS on railway transport.

second criterion characterizes IVS recognition algorithms (video analytics) and estimates the probabilities of correct and false detections.

Such an assessment of compliance criteria is consistent with functional safety indicators for railway transport (GOST [State standard] 33358-2015 «Control systems and provision of train traffic safety»).

To calculate the acceptable values for assessing quality and reliability of IVS signals (criteria), the concept of loss function (the amount of economic damage that occurs as a result of missing or false detection of a dangerous object) is introduced.

Results.

The option of organizing an intelligent video surveillance system in railway transport

The simplest IVS provides for: installing video cameras at level crossings, transmitting a video signal to a video server of a single dispatch control center (SDCC), identifying dangerous objects using video analytics, transmitting braking commands to a locomotive from SDCC through train radio communications (TRC). The organization of IVS is shown in Pic. 1.

As a network infrastructure, a network for transfer of data of a general technological purpose (NTD GTP) of JSC Russian Railways was used. NTD GTP OTN meets the bandwidth requirements for communication channels. NTD GTP is a data transmission network based on TCP/IP protocol. As guide lines from the network element to the video camera at the object of observation, it is possible to use a copper core cable, or fiber

optic communication line (FOCL). In case of connecting via a copper cable over a distance of more than 100 m, the use of xDSL modems (digital subscriber line) is required. It is possible to supply power to video surveillance equipment using Power over Ethernet (PoE) technology [10].

The advantage of video surveillance is the availability of video information about the object for the train driver, which allows to prevent an accident in a timely manner. However, IVS systems have a significant drawback: a high probability of false detection $P_{fal.det.} \geq 10^{-3}$, which can lead to unreasonable emergency braking commands and, as a result, to grave consequences in the form of passenger injuries, disruption of train schedules, etc. One of the reasons for false detections is insufficiently high quality of digital video signal formation [11, pp. 24–29].

There are two ways to reduce the number of false triggering: improving video analytics algorithms in a recognition device (RD) and improving quality of video signals at the input of RD. The work is devoted to reducing the likelihood of false triggering by improving quality of communication. The insufficiently high quality of digital video signal generation has a significant impact on recognition efficiency of dangerous objects. Therefore, the main tasks associated with implementation of IVS are to assess quality of video signal transmission and develop ways to reduce the likelihood of false detection.

The most effective way to reduce the probability of false detection is to use a new element base of electronics on nanostructured



materials, which will significantly improve the optoelectronic characteristics of photosensors (PS) and photoreceivers (PR). It should be noted that when using fiber-optic information transmission systems (FOTS) as the communication lines, video signal distortions due to chromatic and polarization dispersions (subject to constant monitoring) are two orders of magnitude lower than from PS and PR [12].

The main areas of research

The solution of the task consists of several stages:

1) selection and justification of criteria for assessing conformity of quantitative and qualitative characteristics of IVS to safety requirements in railway transport. As a loss function, the economic losses of railways due to accidents at crossings have been selected, which made it possible to obtain acceptable values of $P_{fal.det.}$, $P_{cor.det.}$;

2) development of methods for assessing quantitative and qualitative indicators of IVS efficiency in railway transport;

3) determination of permissible values of IVS functioning indicators based on working conditions of railway transport and taking into account loss function;

4) development of proposals to improve IVS efficiency (due to element base of electronics of new generation on nanostructures);

5) calculation of merit value in terms of indicators of IVS efficiency assessment (reduced dispersion of total error and probability of correct detection) for two element bases: microelectronics and nanoelectronics.

The implementation of each stage is based on studies of the features of operation of PS and PR, their optoelectronic characteristics and the effect of semiconductor material on them.

Criteria for assessing IVS efficiency for railways

As criteria for IVS efficiency to increase train traffic safety, one should choose an indicator of quality of video surveillance signals (ratio of signal and noise powers) and a reliability indicator estimated by the probability of correct detection of dangerous objects.

To analyze IVS efficiency, it is necessary to develop the following methods:

1. *Method for calculating the quality indicator*, which includes:

1) assessment of quality of SIV signals using the reduced total dispersion of current error δ_{ε}^2 , which takes into account signal distortion by a photosensor, a communication line, and a photoreceiver (reciprocal of the signal-to-noise ratio);

2) assessment of quality of IVS signals at the photosensor output using the reduced dispersion of anomalous error δ_{ps}^2 , arising from internal noise of pixels;

3) assessment of quality of IVS signals at the PR output using the reduced dispersion of anomalous error δ_{an}^2 , arising from the thermal noise of the photoreceiver.

2. *Method for calculating the reliability indicator of IVS signals* using the probability of correct detection of $P_{cor.det.}$, carried out on the basis of the Neumann–Pearson criterion.

3. *Method for substantiating proposals to improve quality and reliability of IVS signals* through the use of a new element base using nanostructured materials, which involves finding solutions to the following problems:

1) designing a new semiconductor material with specified optoelectronic characteristics;

2) calculation of performance indicators of a new material on bulk crystals (microelectronics) and quantum structures (nanoelectronics) in the form of quantitative estimates of increase:

- a) light absorption coefficient;
- b) quantum efficiency;
- c) sensitivity;
- d) signal/noise ratio;

3) estimates of improving quality of IVS signals due to the new semiconductor material in the form of calculations:

- a) probability of error $P_{er.}$ at the output of PR;
- b) merit value in the parameter δ_{an}^2 ;
- c) merit value in the parameter δ_{ps}^2 ;
- d) merit value in the parameter δ_{ε}^2 for the worst conditions (s/sh).

4) estimates of increasing reliability of IVS signals due to new material by calculating the probability of correct detection $P_{cor.det.}$

Justification of loss function

As a function of losses, the amount of economic damage that occurs as a result of missing or false detection of a dangerous

Table 1

Economic damage from a railway crossing accident

Train hitting an object as a result of missing a dangerous situation		Emergency braking due to false detection of an object	
Description of incident consequences	Description of expenses	Description of incident consequences	Description of expenses
1. Severe or slight injury to a person. Death of a person	a) treatment in a hospital; b) rehabilitation; c) payment of disability benefits or compensation to the family of the deceased	1. Severe or slight injury to a person	a) treatment in a hospital; b) rehabilitation; c) payment of disability benefits
2. Complete loss or damage of an economic object (for example, a car)	Cost of an economic object, cost of repair, cost of disposal, insurance compensation	2. Damage to the internal equipment of cars, structural elements of braking systems, etc.	Cost of repairing damaged equipment of cars and a train as a whole
3. Violation of train schedule	Damage from violation of production relations of enterprises using the services of the transport system; damage from a decrease in efficiency of the transport system	3. Damage to cargo (baggage)	Cost of cargo (baggage), insurance compensation
		4. Violation of train schedule	Damage from violation of production relations of enterprises using the services of the transport system; damage from a decrease in efficiency of the transport system

object is accepted. The analysis of all possible emergency situations at crossings regarding calculation of the probabilities of missing and false detection showed that the most dangerous cases are when the signal from IVS arrived (or did not arrive) at the moment when braking is possible only in emergency mode. Emergency braking is a special process that is strictly regulated by service instructions [13].

When a false signal is received from IVS about the presence of a dangerous object, the driver applies emergency braking. If the system passes a dangerous object, the driver does not have information about the situation at the crossing and cannot immediately turn on emergency braking and, as a result, the object collides. When approaching an object, the braking process takes place in another safer mode for passengers.

Table 1 provides a description of dangerous cases with rolling stock in the form of collisions and emergency braking as a result of which the railway will incur large economic losses [14, pp. 12–13].

Maximum probabilities of missing the case P_{miss} and false detection $P_{fal.det.}$ and minimum value of probability of correct detection $P_{cor.det.}$ are defined as follows:

$$P_{miss} = \frac{Q_{min}}{\kappa \cdot Q_{miss}} ; \tag{1.1}$$

$$P_{miss.cor.det.} ; \tag{1.2}$$

$$P_{fal.det.} = \frac{Q_{min}}{l \cdot Q_{fal.det.}} , \tag{1.3}$$

where Q_{min} , Q_{miss} , $Q_{fal.det.}$ – expenses, respectively, minimal, in case of missing, in case of false detection;

κ , l – average number of, respectively, missed cases (collisions) and false braking for one road, respectively, per year.

Calculations showed the following values of probabilities:

$$\begin{aligned} P_{miss} &= 0,0007; \\ P_{cor.det.} &= 1 - P_{miss} = 0,9993; \\ P_{fal.det.} &= 10^{-4}. \end{aligned}$$

Thus, the video surveillance systems used to improve traffic safety should provide performance indicators $P_{cor.det.} \geq 0,9993$; $P_{fal.det.} \leq 10^{-4}$.

Calculation of an indicator of IVS signals quality

Train traffic safety is largely determined by the result of operation of IVS hazardous



object recognition device. The result of image recognition in IVS video server depends on many factors: quality of digital signal generation on the transmitting side (resolution of the camera's photosensor, digital conversion errors, weather conditions, lighting, extraneous light sources, etc.), noise and distortion in the communication line, noise of the photoreceiver and interpolation errors on the receiving side, recognition algorithm. Most of these factors cause video signal distortion, which can be estimated by the quality indicator in the form of the total error dispersion δ_ε^2 reduced to the power of the useful signal at the input of IVS recognition device [12; 15, p. 12]:

$$\delta_\varepsilon^2 \approx \delta_{ps}^2 + \delta_{an}^2. \quad (2)$$

The main cause of errors introduced by the photosensor is digital noise [16, p. 400]. Therefore, the effect of internal pixel noise must be analyzed taking into account the digital processing of the video signal.

The features of PS operation are that the internal noise of the pixels is added to the photocurrent of the video image. After the process of sampling a continuous signal, the pulse amplitude consists of the sum of the signal λ and noise h . The positive difference between the sum $(\lambda + h)$ and the nearest integer (quantization level) can be less than half the quantization step $(\Delta_{qu}/2)$. In case of rounding down (according to the rules of arithmetic rounding), the noise is discarded. In other variants of signal-to-noise ratios, abnormal errors can occur, i.e. errors in assigning a quantization level number. The value of the anomalous error δ_{ps}^2 under the condition of a Gaussian distribution of the probability density of the photocurrent can be calculated as follows [15, p. 13]:

$$\delta_{ps}^2 \approx 12 \cdot \left[\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{9\rho_{out.ps}^2}{2L_{qu}^2}\right) \right], \quad (3)$$

where $\rho_{out.ps}^2 = \frac{\sigma_\lambda^2}{\sigma_h^2}$ is ratio of the photocurrent

power and noise at the output of the photosensor and the input of the analog-to-digital conversion device (ADC);

$L = a^K$ is the number of quantization levels;
 a is code length;

K is the number of bits in the code combination.

To calculate the anomalous error at the output of the photoreceiver δ_{an}^2 , it is possible to use the method of calculating the probability of error when receiving an elementary pulse based on the analysis of Q -factor [17, p. 96], which depends on the ratio of signal power and noise at the output of PR $\rho_{out.pr}^2$.

The value of the anomalous error at the PR output for Gaussian distribution of signal probability densities is calculated by the formula [18, p. 392]:

$$\delta_{an}^2 = 12 \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{out.pr}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{out.pr}^2}{8}\right). \quad (4)$$

Hence the expression of reduced dispersion of total error of IVS is (1):

$$\delta_\varepsilon^2 \approx 12 \cdot \left[\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{9\rho_{out.ps}^2}{2L_{qu}^2}\right) + \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{out.pr}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{out.pr}^2}{4}\right) \right]. \quad (5)$$

Components (2), (3) of reduced dispersion of total error (4) have different weights, depending on the ratio of signal power and noise at the output of PS and PR.

Calculation of reliability criterion of IVS signals

The reliability criterion is estimated using the probability of correct detection $P_{cor.det.}$ according to the Neumann–Pearson algorithm.

The probability of correct detection at the output of IVS detection device, implemented as a matched filter, is calculated as follows [12, p. 12; 18, p. 173]:

$$P_{cor.det.} = V\left[\frac{H}{\sqrt{2/\delta_\varepsilon^2}} - \sqrt{2/\delta_\varepsilon^2}\right], \quad (5)$$

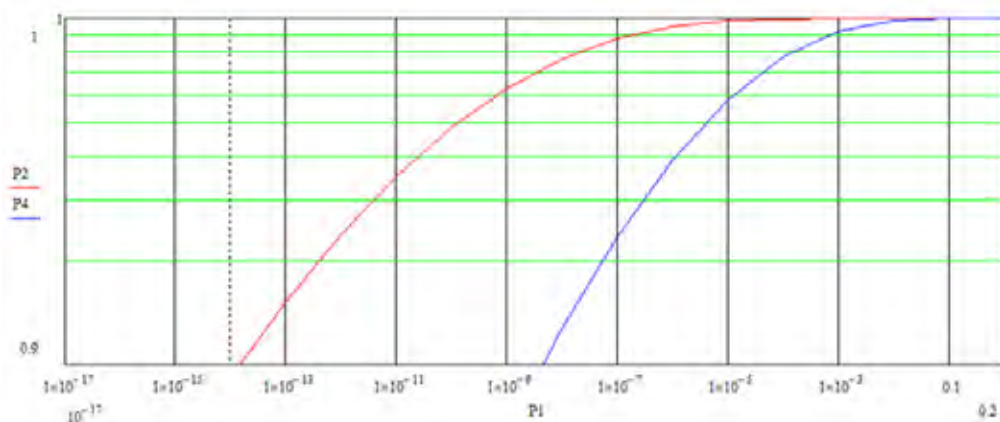
where

$$V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-z^2/2} dz \text{ is table integral.}$$

The calculation algorithm is as follows:

- sets the probability of false detection;
- according to the table integral $V(x)$, the response threshold of the receiving device H is found taking into account the ratio of signal powers and noise α_{det}^2 ;
- according to the formula (5), the probability $P_{cor.det.}$ is determined.

The ratio of signal power and noise α_{det}^2 (s/n) is the reciprocal of reduced dispersion of total error ($\alpha_{det}^2 = \frac{1}{\delta_\varepsilon^2}$).



Pic. 2. Dependence of probability of correct detection on probability of false detection $P_{cor.det.} = f \cdot (P_{fal.det.})$.

Justification for the use of a new element base of electronics

Improving quality of video signals is possible by reducing thermal noise and increasing sensitivity of optoelectronic devices (OED) that underlie PS and PR. This result is achieved through the use of element base of a new generation. The main difference between these OED is the use of nanostructured materials previously purified from heavy isotopes. The effectiveness of isotopic purification can be estimated by the example of the most common compounds, namely, solid solutions based on gallium arsenide. It is known that isotopic purification of semiconductor silicon made it possible to increase speed of microprocessors by more than two times [19, p. 409]. A greater effect can be expected from isotopic purification of solid solutions from gallium arsenide, since gallium is lighter than silicon (the ratio of the effective masses of electrons

$$\frac{m_{eSi}}{m_{eGa}} = \frac{0,19m_0}{0,067m_0} = 2,84.$$

The main indicator of improvement of quality of PS and PR due to purification of semiconductor material from heavy isotopes is an increase in sensitivity of R_i OED. The sensitivity is directly related to quantum efficiency of the material η , which depends on n (concentration of heavy isotopes), and light absorption coefficient α [16, pp. 393, 399].

Studies have shown that an increase in quantum efficiency will increase sensitivity R_i of an optoelectronic device (respectively, PS or PR) on a semiconductor crystal by 1,23 times, on a quantum well by 1,325 times. Accordingly, the thermal noise power

decreases, the signal-to-noise ratio at the output of OED increases.

So, the value $\rho^2_{out.ps.}$ for pixels on a bulk crystal from gallium arsenide will increase by 1,23 times, which will significantly reduce the magnitude of reduced dispersion of current PS error $\delta^2_{ps.}$

Similarly, the ratio of signal power and noise $\rho^2_{out.pr.}$ at the output of the photoreceiver at multiple quantum wells (MQW) after isotopic cleaning of the material will increase. The value of $\rho^2_{out.pr.}$ will increase by 1,255 times. This fact will affect the value of reduced dispersion of anomalous error $\delta^2_{an.}$ PR, as well as reduced dispersion of total error $\delta^2_{e.}$ and probability of correct detection of IVS object recognition device. Thus, improvement of optoelectronic characteristics of the material of PS and PR allows one to reduce reduced dispersion of total error by more than 5,76 times.

The calculated merit value in the ratio of signal power and noise at the input of the recognition device leads to an increase in probability of correct detection, a decrease in probability of false detection of dangerous objects, and an increase in safety of train traffic.

Pic. 2 shows two dependencies $P_{cor.det.} = f \cdot (P_{fal.det.})$ of probability of correct detection ($P_{2,4}$) on probability of false detection (P_3).

The probabilities are calculated for the case of using matched filters as recognition devices by the Neumann–Pearson criterion for versions of OED without cleaning the semiconductor material (P_2) and with cleaning (P_4). As can be seen from the graphs, isotopic purification of the material gives a significant increase in the probability of $P_{cor.det.}$ and a decrease in the probability of $P_{fal.det.}$



Thus, a 5,76-fold increase in the signal-to-noise ratio obtained above, after cleaning the material of PS and PR pixels, increases $P_{cor.det.}$ more than an order of magnitude, and reduces $P_{fal.det.}$ three orders of magnitude. The calculations showed (Pic. 2) that the probability of false triggering $P_{fal.det.} = 10^{-4}$ and correct detection $P_{cor.det.} = 0,9993$ necessary to prevent accidents can only be achieved using the new element base of electronics.

Conclusions.

1. As foreign and domestic experience shows, IVS are successfully used for many functions on railways: facilities security, fire safety, identification of criminals in places of passenger congestion. But for the function of improving traffic safety, it is necessary to increase quality and reliability of signals (compliance criteria).

2. To improve quality and reliability of IVS signals, it is necessary to improve optoelectronic characteristics of OED by using a new generation of nanostructured material.

3. Improving safety of train traffic using IVS depends on the probabilities of correct $P_{cor.det.}$ and false detection $P_{fal.det.}$, which are determined by the magnitude of reduced dispersion of total error δ^2_{ϵ} of IVS. The efficiency of IVS, estimated in the form of quality (δ^2_{ϵ}) and reliability ($P_{fal.det.}$) indicators are improved with the help of new-generation OED by more than 5,76 times and 10^3 times, respectively.

REFERENCES

1. Astapenko, E. The number of accidents at railway crossings increased in Russia. 2018 [V Rossii uvelichilos' kolichestvo DTP na zheleznodorozhnykh pereezdakh. 2018]. [Electronic resource]: <https://www.kolesa.ru/news/v-rossii-uvlechilos-kolichestvo-dtp-na-zh-d-perezdah>. Last accessed 21.10.2019.
2. Solovyov, A. E. Types of emergency situations in railway transport and their causes [Vidy avariynykh situatsii na zheleznodorozhnom transporte i ikh prichiny]. *Mountain Information and Analytical Bulletin*, 2005, Iss. 5, pp. 156–159.
3. Zhuravleva, L. M., Bogachev, A. P., Yatskiy, N. V. Reduction of Emergency Risks with the help of Intelligent Video Surveillance Systems. *World of Transport and Transportation*, 2017, Vol. 15, Iss. 3, pp. 206–212.
4. Zhuravleva, L. M., Ivashevsky, M. R., Efimova, N. O., Yatskiy, N. V. Assessment of signal transmission quality of intelligent video surveillance systems [Otsenka kachestva peredachi signalov sistem intellektualnogo videonablyudeniya]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2017, Iss. 3, pp. 10–15.
5. Khrulev, A. A. Intelligent video surveillance system as part of an integrated security system on the subway [Intellektualnaya sistema videonablyudeniya v sostave

kompleksnoi sistemy bezopasnosti na metropolitene]. *Sistemy bezopasnosti*, 2014, Iss. 2, pp. 40–44.

6. Charles, Chen; Harry, Hsiao. How to make railroad crossings safer and smarter. [Electronic resource]: <https://ohsonline.com/Articles/2017/03/01/How-to-Make-Railroad-Crossings-Safer-and-Smarter.aspx>. Last accessed 30.10.2019.

7. Press-release of the company Amplicon. Cutting-edge CCTV Level Crossing Surveillance System for Network Rail, 2019. [Electronic resource]: <https://www.amplicon.com/projects/cutting-edge-cctv-level-crossing-surveillance-system-network-rail/>. Last accessed 30.10.2019.

8. Turcu, T. Video surveillance of level crossings. [Electronic resource]: <https://www.railwaypro.com/wp/video-surveillance-of-level-crossings>. Last accessed 30.10.2019.

9. Gapanovich, V. Digital railway: present and future [Tsifrovaya zheleznyaya doroga: nastoyashchee i budushchee]. [Electronic resource]: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1348652>. Last accessed 30.10.2019.

10. Zhuravleva, L. M., Bogachev, A. P., Yatskiy, N. V., Zhuravlev, O. E. Use of intelligent video surveillance systems [Isopolzovanie sistem intellektualnogo videonablyudeniya]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2017, Iss. 9, pp. 13–15.

11. Orlov, S. Video analytics: tasks and solutions [Videoanalitika: zadachi i resheniya]. *Journal of LAN solutions*, 2014, Iss. 6, pp. 24–29.

12. Zhuravleva, L. M., Ivashevsky, M. R., Yatskiy, N. V., Myagkov, Y. Yu. Quality of signals of intelligent video surveillance systems [Kachestvo signalov sistem intellektualnogo videonablyudeniya]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2018, Iss. 2, pp. 2–5.

13. Decree of JSC Russian Railways dated December 12, 2017 No. 2580r «On enactment of the rules for interaction of train-related workers with locomotive brigade workers in case of emergencies and non-standard situations on the infrastructure of JSC Russian Railways [Rasporyazhenie OAO «RZD» ot 12 dekabrya 2017 g. No. 2580r «O vvode v deystvie Reglamenta vzaimodeystviya rabotnikov, svyazannykh s dvizheniem poezdov, s rabotnikami lokomotivnykh brigad pri vozniknovenii avariynykh i nestandartnykh situatsii na putyakh obshchego polzovaniya infrastruktury OAO «RZD»].

14. STO RZD 1.02.003-2006. Methodology for evaluating the effectiveness of measures to improve train traffic safety [STO «RZD» 1.02.003-2006. Metodika otsenki effektivnosti meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov].

15. Zhuravleva, L. M., Ivashevsky, M. R., Kuryantsev, D. G., Loshkarev, V. L. Improving quality of signals of an intelligent video surveillance system [Povyshenie kachestva signalov sistem intellektualnogo videonablyudeniya]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2018, Iss. 1, pp. 10–15.

16. Rozenher, E., Vinter, B. Optoelectronics [Optoelektronika]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2006, 588 p.

17. Sklyarov, O. K. Fiber-optic networks and communication systems [Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi]. Moscow, Solon-Press, 2004, 261 p.

18. Gorelov, V. G., Fomin, A. F., Volkov, A. A. [et al]. Theory of signal transmission [Teoriya peredachi signalov]. Moscow, Marshrut publ., 2012, 415 p.

19. Bogdanova, V. A., Davletkildiev, N. A., Semikolenova, N. A., Sidorov, E. N. Effective mass of electrons in heavily doped gallium arsenide during ordering of impurity complexes [Effektivnaya massa elektronov v silnolegirovannom arsenide galliya pri uporyadochenii primesnykh kompleksov]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2002, Iss. 4, pp. 407–411.



ИСТОРИЯ ТРАНСПОРТА ОДНОГО ГОРОДА 316

Магнитогорский трамвай – ровесник, свидетель и участник развития нового промышленного центра.



ПРЕСС-АРХИВ 326

- Соединение Сибири и Аляски, Архангельска и Оби железной дорогой и другие проекты начала прошлого века, состоявшиеся и всё ещё обсуждаемые.
- Мультимодальные перевозки и транспортно-логистические центры: к истокам правового регулирования.



КОЛЕСО ИСТОРИИ • HISTORY WHEEL



THE HISTORY OF THE TRANSPORT OF A TOWN 321

The tram of Magnitogorsk is an age-mate, witness and participant of development of a new industrial centre.



NEWS FROM THE ARCHIVES 329

- Railways between Siberia and Alaska, Archangelsk and Ob, and other last century's projects: implemented and still discussed ones.
- Multimode transportation and transport & logistics centres: coming back to the origins of legal regulations.





Роль трамвайного движения в формировании транспортной системы Магнитогорска



Марина ПОТЁМКИНА



Михаил ГРЯЗНОВ



Татьяна ПАШКОВСКАЯ



Егор ТИМОФЕЕВ

Потёмкина Марина Николаевна – Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова), Магнитогорск, Россия.

Грязнов Михаил Владимирович – Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова), Магнитогорск, Россия.

Пашковская Татьяна Григорьевна – Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова), Магнитогорск, Россия.

Тимофеев Егор Анатольевич – ООО «Ситно-Продукт», Магнитогорск, Россия*.

В статье приведены сведения о состоянии магнитогорского электротранспорта в период его становления. Это один из шагов к сохранению истории развития трамвайного движения, попытка обозначить его основополагающую роль в формировании транспортной системы, а также в социально-экономической и политической жизни Магнитогорска – одного из первых соцгородов Советского Союза. Материал статьи структурирован по разделам, касающимся расширения маршрутной трамвайной сети, состояния и развития вагонного парка. Рассматриваемый временной период захватывает годы

Великой Отечественной войны и ограничен началом «оттепели» во внутривнутриполитической жизни страны.

Посредством систематизации документальных свидетельств определена основополагающая роль трамвайного движения в формировании транспортной системы Магнитогорска за исследуемый временной период. Это должно способствовать информационному обеспечению исследований исторических закономерностей формирования транспортных систем городов, основанных в период индустриализации.

(В этом номере публикуется первая часть статьи).

Ключевые слова: трамвайное движение, маршрутная сеть, городская транспортная система, индустриальная археология, памятники индустриального наследия, Магнитогорск.

*Информация об авторах:

Потёмкина Марина Николаевна – профессор, доктор исторических наук, заведующая кафедрой всеобщей истории Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова), Магнитогорск, Россия, mpotemkina@mail.ru.

Грязнов Михаил Владимирович – доцент, доктор технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова), Магнитогорск, Россия, gm-autolab@mail.ru.

Пашковская Татьяна Григорьевна – доцент, кандидат философских наук, доцент кафедры всеобщей истории Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова), Магнитогорск, Россия, czaczulia@inbox.ru.

Тимофеев Егор Анатольевич – директор по логистике ООО «Ситно-Продукт», директор МП «Маггортранс» (2015–2017 гг.), Магнитогорск, Россия, wolf_tea@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 18.06.2019, принята к публикации 16.08.2019.

For the English text of the article please see p. 321.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение и сохранение индустриального наследия позволяет современному обществу понять индустриализацию как один из наиболее значимых периодов в истории цивилизации. Одним из старейших видов городского пассажирского общественного транспорта, из существующих и в начале XXI века, является трамвай. Он возник в первой половине XIX века — первоначально на конной тяге. Электрический трамвай появился в конце XIX века — в 1881 году в Германии. После расцвета, эпоха которого пришлось на период между мировыми войнами, начался упадок трамвайного движения. Но, если в Европе уже с конца 1930-х гг. начинают доминировать взгляды на трамвай как устаревший вид транспорта и активно закрываются трамвайные системы, то в СССР трамвайная эпоха в самом расцвете. В основанном в чистой степи в 1929 г. соцгороде Магнитогорске трамвайное движение было открыто в 1935 г., и на многие десятилетия трамвай стал магистральным видом общественного транспорта.

Этим объясняется выбор объекта исследования — городская транспортная система как материальное свидетельство, созданное индустриальным процессом в условиях социалистической экономической модели. Предметом исследования в работе являются закономерности развития городской транспортной системы как явления, представляющего неотъемлемую часть городской экономической и социокультурной жизни Магнитогорска, как одного из первых соцгородов Советского Союза. Цель данного исследования состоит в изучении становления и функционирования городской транспортной системы Магнитогорска, как продукта социалистического индустриального наследия 1935–1955 гг.

Исследований, посвящённых анализу встроенности транспортной системы в пространство города сталинской социально-экономической модели, не много. Но среди исследователей есть консенсус о том, что трамвай в первой половине XX века являлся одним из ведущих видов общественного транспорта индустриальных городов. Некоторые исследователи изучали эволюцию государственной политики по формированию городской транспортной системы, другие акцентировали внимание на общественном транспорте как коммуникативном пространстве современного города.

Документальные свидетельства и фотоматериалы, приведённые в данной статье, хранятся: в Магнитогорском историко-краеведческом музее; в архиве Магнитогорского муниципального предприятия «Маггортранс»; в личных архивах сотрудников этого предприятия. Источником публичной информации, сохранившимся до нашего времени интересующие нас сведения о магнитогорском трамвае, послужили периодические печатные издания¹.

РАСШИРЕНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ

В период становления Советская власть ставила своей целью наиболее быструю индустриализацию страны с приоритетным развитием военно-промышленного производства. Помимо прочего, эта цель достигалась путём сокращения всех «непрофильных» расходов, в том числе на строительство жилья, техническое обеспечение городских территорий, развитие систем транспорта общего пользования, бытового обслуживания.

Повышения общего уровня жизни трудового населения в годы первых пятилеток планировалось достичь строительством социальных городов (соцгородов). Так назывались в различных городах ныне бывшего СССР жилые массивы-микрорайоны, которые возводились в годы индустриализации по комплексному единому плану и располагались, как правило, неподалёку от крупных строящихся заводов для проживания и досуга работников.

Изначально в Магнитогорске при металлургическом заводе предполагался рабочий посёлок, численностью населения в пределах 20 тыс. человек, определённой по методу «трудового баланса». Он примыкал к промышленной площадке металлургического комбината у центральной проходной с радиальными, сходящимися к центру улицами.

Строительство соцгорода изначально велось не по генеральному плану, а исходя из постоянно меняющихся потребностей градообразующего предприятия. С 1930 года Магнитогорск начал строиться по проектам архитектора Эрнста Мая, согласно которым жилая застройка оказалась как бы зажатой между

¹ Статья написана по материалам монографии Тимофеев Е. А. Магнитогорский трамвай: исторический опыт и перспективы развития: Монография [в 3 ч.] Становление, война, послевоенные годы (1930–1955) / Е. А. Тимофеев, М. Н. Потёмкина, М. В. Грязнов; под ред. М. Н. Потёмкиной. — Магнитогорск: Магнитогорский Дом печати, 2018. — 204 с.





Рис. 1. Генеральный план Магнитогорска².

невысоким горным массивом и цепью холмов, при этом между рекой Урал и соцгородом находится промышленное предприятие (рис. 1).

Транспортная инфраструктура города не была приспособлена для ежедневного и пунктуального перемещения большого количества рабочих на металлургический комбинат. Необходимо учесть непрерывный характер металлургического производства и отдалённость промышленной площадки от жилых кварталов. Транспорт общего пользования Магнитогорска с первых дней основания состоял из гужевых повозок и автомобилей (рис. 2).

Обстановка с гужевым транспортом была напряжённой, несмотря на то, что в 1931 г., дополнительно к имеющемуся конному двору, был выстроен ещё один конный парк, рассчитанный на 2000 лошадей. В конце 1931 г. произошла эпидемия сапа. Сотни лошадей находились в карантине. С трудом, но эту проблему удалось решить. Нехватка корма, низко квалифицированный уход и другие факторы привели к тому, что к середине тридцатых годов по результатам обследования выявлено истощение 65 % лошадей. Привлечение к уголовной ответственности виновных, повышение заработной

² Использованы фотоматериалы из следующих источников: личные архивы сотрудников МП «Маггортранс» (рис. 2, 4); подшивка газеты «Магнитогорский рабочий» за 1937 г. (рис. 3); Конышева Е. В., Меерович М. Г. Эрнст Май и проектирование соцгородов в годы первых пятилеток (на примере Магнитогорска). — М., 2011. — 221 с. (рис. 1).



Рис. 2. Будни работы городского транспорта Магнитогорска в 1940-е годы.

платы в гужевом хозяйстве действенных результатов не принесли. Данный вид транспорта так и не смог решить проблему общественных и грузовых перевозок.

Автомобильный транспорт в городе был развит слабо. В основном это были грузовые автомашины (около 100 единиц). Они использовались для перевозки людей на работу и обратно. Так продолжалось до августа 1930 г., когда перевозка людей грузовым транспортом была запрещена. В начале 1931 г. Магнитогорск получил первые автобусы для пассажирских перевозок. Уже к 1933 г. автотранспорт города из 100 грузовых автомобилей увеличился более чем в семь раз и ориентировочно состоял из: 80 легковых автомобилей; 530 грузовых автомобилей; 14 автобусов; 57 пожарных машин; 4 санитарных машин; 16 цистерн; 8 тракторов; 8 мотоциклов. Всего эксплуатировалось более 700 автотранспортных средств.

Несмотря на малое количество транспортных средств, в городе очень часто происходили аварии. Главной причиной была низкая квалификация водителей. В эти же годы на дорогах города появляются первые простейшие дорожные знаки. Контроль дорожного движения осуществляла милиция и единственный автоинспектор по фамилии Горбенко.

Осенью 1932 г. начинается работа сразу по трём направлениям: переквалификация водителей, обязательный осмотр транспортных средств и активное строительство дорог. В 1933 г. произведены работы по освещению основной автодороги от соцгорода до посёлка Берёзки. Основной дорогой в тот период была так называемая магистраль от железнодорожного вокзала (сейчас в районе станции Товарная) через посёлок Берёзки до посёлка Магнитный. К 1936 г. в городе появляются первые тротуары, очищаемые от снега.

Однако говорить об улучшении в работе городского транспорта нельзя. В городе суще-

существовал только один гараж, остальные автомобили базировались в освобождённых конюшнях. Было плохо организовано техническое обслуживание и ремонт. Вдобавок к этому стоит отметить, что значительная часть автомобилей была импортная. Снабжение автомобилями запасными частями начало налаживаться только к 1936 г.

Магнитогорск становился полноценным промышленным городом с огромным производством, требовавшим чёткой и пунктуальной работы сотрудников. Плохая обеспеченность жителей транспортом ставила под угрозу рост жилой застройки, повышала вероятность сбоев в работе промышленных предприятий. И если в период строительства, когда посёлки располагались близко к строительным площадкам, транспортный вопрос удавалось решать конными повозками и автомобилями, то с заселением города огромные маятниковые людские потоки поставили задачу перед руководством города об организации принципиально нового вида транспорта.

Этот транспорт должен был быть способен выполнять свою задачу в суровом климате, холмистой местности и при слабо развитой дорожной сети. Климатические условия Магнитогорска характеризуются умеренно-холодным климатом со среднегодовой температурой $-1,6^{\circ}\text{C}$ и значительным количеством осадков: среднее количество осадков в год составляет 381 мм.

К середине 1931 г. городские власти осознали, что строительство трамвайного парка и пуск трамвая жизненно необходимы для Магнитогорска. В 1933 г. в составе Магнитогорского металлургического комбината создаётся «Трамвайстрой» — организация, которая приступила к строительству трамвайного хозяйства города. Со времени основания и практически до распада Советского Союза городское трамвайное хозяйство находилось в подчинении металлургического комбината, после чего перешло в ведение муниципалитета.

Трамвайное строительство на начальных этапах шло с постоянными срывами сроков сдачи объектов, что было вызвано рядом объективных причин, связанных с задержками в поставке оборудования и материалов, дефицитом кадрового обеспечения, несвоевременной поставкой трамвайных вагонов, не развитой производственно-технической базой трамвайного хозяйства, отсутствием



Рис. 3. Движение трамваев вдоль ул. Кирова по маршруту «Щитовые–Заводу» (1937 г.).



Рис. 4. Дамба (Центральный переход) через заводской пруд (вверху – фото 1948 г., внизу (обратное направление) – фото 1953 г.).

проектной документации на начало строительства ряда объектов. Ситуация усугублялась дефицитом рельсов в масштабах страны. На тот период времени действовал старый стандарт на рельсы типов 1-а, 2-а, 3-а и 4-а с массой одного погонного метра соответственно 43, 57, 38, 42, 33, 48, 30, 89 кг.

К моменту пуска трамвая строительство депо завершено не было, ремонтная база отсутствовала, что ставило под угрозу движение в случае возникновения неисправностей моторных вагонов. Несмотря на объективные трудности, пуск первого трамвая в Магнитогорске состоялся 18 января 1935 г.



За первые три года трамвайная сеть охватила основную часть многоэтажной и значительную часть индивидуальной жилой застройки Магнитогорска. Процесс массовой доставки работников градообразующего предприятия был отлажен. Об этом свидетельствует фотоснимок, на котором запечатлены будни городской жизни, неотъемлемой частью которых стало трамвайное движение (рис. 3).

Интенсификация строительства трамвайных линий в довоенные годы, стремление обеспечить транспортную доступность отдалённых районов города никак не сказывалось на развитии сопутствующей улично-дорожной сети. Несмотря на то, что железнодорожное полотно было проложено, и по нему осуществлялось движение трамваев, о том, чтобы замостить или как-то обустроить остановочные площадки, тротуары, автодороги в попутном направлении и квартальные проезды не было и речи. На это не хватало ресурсов. Такая ситуация наблюдалась ещё несколько лет даже в послевоенные годы.

Своеобразное расположение города диктовало траекторию строительства трамвайных линий. До 1939 г. жилая зона располагалась исключительно на левом берегу реки Урал. Однако отсутствие возможности дальнейшего развития города в левобережной части привели к актуализации изысканий строительства на правом берегу. Этому способствовал нестабильный степной ветровой режим, усугублённый вредностью производства в левобережье. Правобережный вариант расположения города имел ряд преимуществ:

- направленность 25 % ветров от завода на левый берег и 9 % – на правый берег;
- рельеф местности на правом берегу более пригоден для строительства и эксплуатации города;
- наличие транзитной транспортной магистрали, обеспечивающей хорошие подходы железнодорожных путей как в широтном (Кузбасс—Карталы—Магнитная—Уфа), так и в меридиональном направлении (Ташкент—Оренбург—Магнитогорск—Верхнеуральск—Миасс—Свердловск);
- нежелательность строительства города на левом берегу – под будущими жилыми районами могут залежать полезные ископаемые;
- сложность эксплуатации транспорта ввиду холмистости левого берега;

• опасность ограничения населения численностью в 80 000 чел., поскольку большее количество в левобережной части рационально разместить невозможно;

• возможность строительства на берегу заводского пруда;

• расположение на правом берегу допускает развитие крупного административно-политического и социально-культурного центра;

• при правобережном расположении города расстановка зданий с севера на юг приходится вдоль горизонталей, что позволяет избежать уступов в линиях зданий, тем самым облегчается решение вопросов стандартизации и механизации строительства (при левобережном варианте меридиональное расположение зданий идёт поперёк горизонталей, что вызовет разность уровней по длине зданий до 5–7 метров);

• наличие заводского пруда упрощает озеленение территории.

В 1939 г. на правом берегу реки был заложен первый капитальный дом на первой улице, позднее названной Уральской. К 1945 году население правобережной части города уже составляло 25 тыс. человек, общее же население города на тот момент превышало 200 тыс. жителей. В перспективе население правобережной части города должно было составить 200 тысяч человек, левобережной 40 тысяч человек.

По состоянию на середину 1945 г. никакой транспортной инфраструктуры в правобережной части не существовало, добираться до комбината приходилось пешком. При строительстве домов на правом берегу актуальной стала проблема, указанная в своё время архитектором Э. Маём, – затруднённая транспортная доступность, усугубившаяся почти полным отсутствием вложений в коммунальную и транспортную инфраструктуры. Ситуация изменилась лишь с середины 1940-х годов, когда развернулось масштабное проектирование и застройка правобережной части города. Это переломило психологическое нежелание людей селиться на правом берегу. В настоящее время, по сути, весь город располагается на правом берегу реки Урал, на левом осталась промышленная зона, частично – старые жилые постройки. Такая структура расселения горожан продиктована также экологической ситуацией.

Продолжение в следующем номере ●



Role of Tram Transit in Formation of Magnitogorsk Transportation System (1930–1955)



Marina N. POTYOMKINA



Mikhail V. GRYAZNOV



Tatyana G. PASHKOVSKAYA



Egor A. TIMOFEEV

Potemkina, Marina N., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gryaznov, Mikhail V., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Pashkovskaya, Tatyana G., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Timofeev, Egor A., LLC Sitno-Product, Magnitogorsk, Russia.*

ABSTRACT

The article provides information about the state of Magnitogorsk electric transport during its formation. This is one of the steps to preserving the history of emergence and development of tram traffic, an attempt to outline its fundamental role in formation of the transport system, as well as in socio-economic and political life of Magnitogorsk, one of the first so called social cities of the Soviet Union. The article is structured into sections relating to expansion of the tram route network, state and development of tram

fleet. The considered time period captures the years of the Great Patriotic War and is limited to the beginning of the «thaw» in the domestic political life of the Soviet state. Through systematization of documentary evidence, the fundamental role of tram traffic in formation of the transport system of Magnitogorsk for the studied time period is determined. This should contribute to development of information support for research on the historical patterns of formation of urban transport systems in the period of industrialization.

This issue offers the first part of the article.

Keywords: tram traffic, route network, urban transport system, industrial archeology, industrial heritage monuments.

*Information about the authors:

Potyomkina, Marina N. – Professor, D.Sc. (History), Head of the Department of World History of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, mpotemkina@mail.ru.

Gryaznov, Mikhail V. – Associate professor, D.Sc. (Eng), Head of the Department of Logistics and Transport Systems Management of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, gm-autolab@mail.ru.

Pashkovskaya, Tatyana G. – Associate professor, Ph.D. (Philosophy), Associate professor of the Department of World History of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, craczulia@inbox.ru.

Timofeev, Egor A. – Logistics Director of LLC Sitno-Product, Director of ME Maggortrans (2015–2017), Magnitogorsk, Russia, wolf_tea@mail.ru.

Article received 18.06.2019, accepted 16.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 316.

Background. The study and preservation of industrial heritage allows modern society to understand industrialization as one of the most significant periods in the history of civilization. One of the oldest types of urban passenger public transport, existing from the beginning of the 21st century, is a tram. It arose in the first half of the 19th century, and initially was horse-drawn. An electric tram appeared at the end of the 19th century, in 1881, in Germany. After the heyday, the era of which fell on the period between the world wars, the decline of tram traffic began. But, if already from the late 1930s in Europe views about the tram as of an obsolete mode of transport begin to dominate and tram systems are actively shutting down, then the USSR tram era is in its prime. In the social city of Magnitogorsk, founded in the steppe in 1929, tram traffic was opened in 1935 and for many decades tram was the main mode of public transport.

This explains the choice of the object of study which is urban transport system as material evidence created by the industrial process in the conditions of a socialist economic model. The subject of this study is associated with the patterns of development of the urban transport system as a phenomenon that is an integral part of urban economic and socio-cultural life of Magnitogorsk, as one of the first social cities of the Soviet Union.

Objective. The objective of this study is to study formation and functioning of the urban transport system of Magnitogorsk, as a product of the socialist industrial heritage of 1935–1955.

Methods. The authors use general scientific and historical-retrospective methods.

Results. There are few studies devoted to the analysis of transport systems integrated into the environment of the city of the Stalinist socio-economic model. But among researchers there is consensus that the tram in the first half of 20th century was one of the leading types of public transport in industrial cities. Some researchers studied evolution of public policy aimed at development of the urban transport system, while others focused on public transport as the communicative space of a modern city.

Documentary evidence and photographs given in this article are stored: in Magnitogorsk Museum of History and Local Lore; in the archive of Magnitogorsk municipal enterprise «Maggortrans»; in the personal archives of the

employees of this enterprise¹. The periodicals are also the source of public information, which has retained till our time the interesting information about Magnitogorsk tram.

Extension of the route network

During the first years of maturing, the Soviet government set as its goal the most rapid industrialization of the country with the priority development of military-industrial production. Among other things, this goal was achieved by reducing all «non-core» expenses, including construction of housing, the technical support of urban areas, development of public transport systems, and public services.

The increase in the general standard of living of the working population during the years of the first five-year plans was planned through construction of social cities. This is the name of housing estates in various cities of the former USSR, which were built during the years of industrialization according to a comprehensive unified plan and were located, as a rule, not far from large factories under construction for workers to live and leisure.

Initially, in Magnitogorsk, at a metallurgical plant, a working village was supposed to be, with a population of around 20 thousand people, that figure was determined by the «labor balance» method. It adjoined the industrial site of the metallurgical plant at the central entrance with radial streets converging to the center.

Construction of a social city was initially carried out not according to the general plan, but based on the constantly changing needs of the city-forming enterprise. Since 1930, Magnitogorsk began to be built according to the projects of the architect Ernst May, according to which residential buildings turned out to be sandwiched between a low mountain range and a chain of hills, while an industrial enterprise was located between the Ural River and the social city (Pic. 1).

The transport infrastructure of the city was not adapted for daily and punctual movement of a large number of workers to the metallurgical plant. It is necessary to take into account the continuous nature of

¹ The article is written using the materials of the monograph: Timofeev E. A. Magnitogorsk tram: historical experience and development prospects: Monograph [in 3 parts]. Formation, war, after-war years (1930–1955). E. A. Timofeev, M. N. Potyomkina, M. V. Gryaznov. Ed. by M. N. Potyomkina. Magnitogorsk, Magnitogorskiy Dom pechati, 2018, 204 p.



Pic. 1. General plan of Magnitogorsk².

metallurgical production and remoteness of the industrial site from residential areas. Public transport of Magnitogorsk from the first days of its foundation consisted of horse-drawn carts and cars (Pic. 2).

The situation with horse-drawn vehicles was tense, despite the fact that in 1931, in addition to the existing stable, another horse yard was built, designed for 2000 horses. At the end of 1931 there was an epidemic of glanders. Hundreds of horses were quarantined. With difficulty, but this problem was solved. Lack of feed, poorly qualified care and other factors led to the fact that by the mid-thirties, according to the results of the survey, depletion of 65 % of horses was revealed. The prosecution of those responsible, the increase in wages in horse-drawn households did not bring any effective results. This type of transport could not solve the problem of public and cargo transportation.

Road transport in the city was poorly developed. These were mainly trucks (about



Pic. 2. Working days of urban transport of Magnitogorsk in 1940s.

100 units). They were used to transport people to and from work. This continued until August 1930, when transportation of people by truck was prohibited. In early 1931, Magnitogorsk received the first buses for passenger transportation. By 1933, the city's motor transport of 100 trucks had increased more than seven times and roughly consisted of: 80 cars; 530 trucks; 14 buses; 57 fire engines; 4 ambulances; 16 tanks; 8 tractors; 8 motorcycles. In total, more than 700 vehicles were operated.

Despite the small number of vehicles, accidents occurred very often in the city. The main reason was low qualification of drivers. In the same years, the first simple road signs appeared on the city roads. Traffic control was carried out by the police and the only traffic inspector by the name of Gorbenko.

In the autumn of 1932, work began in three directions at once: re-qualification of drivers, mandatory inspection of vehicles and active construction of roads. In 1933, work was carried out to organize lighting of the main road from the social city to the village of Berezki. The main road at that time was the so-called highway from the railway station (now in the vicinity of Tovarnaya station), through the village Berezki to the village Magnitniy. By 1936, the first sidewalks appeared in the city, cleared of snow.

However, it is impossible to talk about improvement in operation of urban transport. There was only one garage in the city, the rest of the cars were parked in vacant stables. Maintenance and repair were poorly organized. In addition to this, it is worth noting that a significant part of cars were imported. The supply of automotive spare parts began to improve only by 1936.

² The photos used in the article were retrieved from: personal archives of employees of Maggortrans (Pics. 2, 4); archives of the newspaper *Magnitogorskiy rabochiy* for the year 1937 (Pic. 3); Konyshov, E. V., Meerovich, M. G. Ernst May and design of social cities during the first years of first five-years plans (at the example of Magnitogorsk), Moscow, 2011, 221 p. (Pic. 1).





Pic. 3. Tram traffic along Kirov street on the route «Shchitovie–Zavodoupravlenie» (1937).

Magnitogorsk became a full-fledged industrial city with huge production, requiring clear and punctual work of employees. Poor provision of residents with transport jeopardized the dynamics of growth in housing development, increased the likelihood of failures in the work of industrial enterprises. And if during the construction period, when the villages were located close to the construction sites, the transport issue could be solved by horse-drawn carts and cars, then with settlement of the city, huge pendulum flows set the task for the city leadership to organize a fundamentally new type of transport.

This transport was supposed to be able to fulfill its task in a harsh climate, hilly terrain and with a poorly developed road network. Climatic conditions of Magnitogorsk are characterized by a moderately cold climate with an average annual temperature of $-1,6^{\circ}\text{C}$ and significant rainfall: the average rainfall per year is 381 mm.

By mid-1931, city officials realized that building a tram park and launching a tram was vital for Magnitogorsk. In 1933, Tramwaystroy [directorate which name literally means tram track construction] was established as part of Magnitogorsk Iron and Steel Works, an organization that began construction of the city's tram economy. From the time of its founding and almost until the collapse of the Soviet Union, the urban tram system was subordinate to the metallurgical plant, after which it was transferred to the municipality.

Tram construction at the initial stages was followed by constant breakdowns in the deadlines for completion of facilities, which were caused by a number of objective reasons related to delays in

supply of equipment and materials, lack of staffing, untimely supply of tram cars, an undeveloped production and technical base of tram facilities, and lack of design documentation at the beginning of construction of a number of facilities. The situation was exacerbated by a shortage of rails nationwide. For that period of time, the old standard applied to rails of types 1-a, 2-a, 3-a and 4-a with a mass of one running meter, respectively, 43, 57, 38, 42, 33, 48, 30, 89 kilograms.

By the time the tram was launched, construction of the depot was not completed, there was no repair base, which jeopardized traffic in case of malfunctions of motor cars. Despite objective difficulties, the launch of the first tram in Magnitogorsk took place on January 18, 1935.

Over the first three years, the tram network covered the bulk of the multi-story and a significant part of the individual residential development of Magnitogorsk. The process of mass transit of employees of the city-forming enterprise has been debugged. This is evidenced by a photograph that depicts the everyday life of city, the tram movement being its integral part (Pic. 3).

Intensification of construction of tram lines in the pre-war years, the desire to ensure transport accessibility in remote areas of the city did not affect development of the associated street-road network. Despite the fact that the railway track was laid and trams were moving along it, there was no talk of paving or somehow equipping stopping areas, sidewalks, roads in the passing direction and quarterly driveways. The city did not have enough resources for this. This situation was observed for several more years, even in the postwar years.



Pic. 4. Dam (Central passage) across the factory pond (left – photo of 1948, right (reverse direction) – photo of 1953).

The peculiar location of the city dictated the trajectory of construction of tram lines. Until 1939, the residential area was located exclusively on the left bank of the Ural River. However, the lack of the possibility of further development of the city in the left-bank part led to actualization of construction surveys on the right bank. This was facilitated by the unstable steppe wind regime, exacerbated by harmfulness of production on the left bank. The right-bank version of the location of the city had several advantages:

- directivity of 25 % of winds from the plant to the left bank and 9 % to the right bank;
- terrain on the right bank is more suitable for construction and management of the city;
- presence of a transit transport line that provides good railway approaches both in latitudinal (Kuzbass–Kartaly–Magnitnaya–Ufa) and in the meridional direction (Tashkent–Orenburg–Magnitogorsk–Verkhneuralsk–Miass–Sverdlovsk);
- construction of city districts on the left bank was unwanted as mineral deposits might occur under future residential areas;
- complexity of operation of transport due to the hilly left bank;
- danger of restricting the number of population to 80 000, since it is impossible to rationally place a larger number in the left-bank part;
- possibility of building a factory pond on the shore;
- location on the right bank allows development of a large administrative-political and socio-cultural center;
- with the right-bank location of the city, arrangement of buildings from north to south is along the horizontal lines, which helps to avoid ledges in the building lines, thereby facilitating

the solution of issues of standardization and mechanization of construction (with the left-bank version, the meridional arrangement of buildings runs across the horizontal lines, which will cause level differences along the length of the buildings up to 5–7 meters);

- presence of a factory pond simplifies landscaping.

In 1939, on the right bank of the river, the first capital house was laid on the first street, later called Uralskaya. By 1945, the population of the right-bank part of the city had achieved 25 thousand people, while the total population of the city at that time exceeded 200 thousand inhabitants. In the future, the population of the right-bank part of the city was to be 200 thousand people, and the left-bank population was expected to reach 40 thousand people.

As of mid-1945, no transport infrastructure in the right-bank part existed, it was necessary to get to the plant on foot. During construction of houses on the right bank, the problem previously indicated by the architect E. May became urgent due to low transport accessibility, aggravated by the almost complete lack of investments in communal and transport infrastructure. The situation changed only in the mid-1940s, when large-scale design and development of the right-bank part of the city began. This reversed the psychological reluctance of people to settle on the right bank. Currently, in fact, the whole city is located on the right bank of the Ural River, while on the left bank there are an industrial zone, and partially old residential buildings. This pattern of resettlement of citizens is also dictated by the environmental situation.

To be continued ●



DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-326-330>

Вопросы связанности территорий и 110 лет назад находились в центре внимания транспортных экспертов. Сразу же после постройки Транссиба речь уже шла о дороге от Архангельска до Оби, о магистрали «Сибирь—Аляска». Привлекла внимание современников и одна из первых попыток нормативного регулирования взаимодействия во Франции инфраструктуры различных видов транспорта — морского и железнодорожного — для облегчения мультимодальных перевозок.

Ключевые слова: инфраструктура, железные дороги, магистраль «Сибирь—Аляска», порты, прикрытие путей, мультимодальные перевозки.

Редакция выражает признательность персоналу библиотеки Российского университета транспорта за помощь в подготовке материала.

О железной дороге «Сибирь—Аляска». — Подробно разбирая известный проект железной дороги «Сибирь—Аляска», с предложенной американской компании полосой территории в 24 километра по обе стороны, Рихард Генниг в берлинском еженедельнике «Zukunft» говорит:

«Американцы знают, какие сокровища таит в себе эта страна. В течение многих лет они посылали туда своих инженеров на разведки, и если они теперь готовы ассигновать 500 миллионов рублей, то прекрасно рассчитали всю ожидаемую прибыль: дороги длиной в несколько тысяч километров и морского тоннеля почти баснословных размеров по соседству с полярным кругом не сооружают зря! Что тут до поры до времени не придётся ожидать пассажирского сообщения, янки это знает хорошо. Но ему хочется ещё раз заключить выгодную сделку, как при покупке Аляски, из которой он ежегодно извлекает одного только золота почти на сумму всей покупной цены, уплаченной в 1867 году России за уступку края (всего за 3 миллиона рублей). Не питает ли Америка при постройке этой дороги и политических замыслов вроде тех, которые она лелеяла, приобретая Филиппины? Возможность экономического завоевания Восточной Азии стоит того, чтобы на это ассигно-

вать бешенные деньги» («СПб. Ведомости», № 12, 16 января с.г.).

— По поводу изложенного здесь взгляда немецкого писателя будет нелишним напомнить из напечатанного в «Железнодорожном деле» хотя бы только: «Что нам нужно и чего у нас нет», помещённую в 1906 году (стр. 349). Между прочим, там указано, что и немецкие капиталы были бы готовы завладеть концессиями на нашем Дальнем Востоке, но на условиях более для нас невыгодных, чем американцы. Да и самая статья г. Рихарда Геннига показывает их равнодушие по отношению к нашим сокровищам. Не будут же немцы изобличать американцев только с целью ограждения нас от невознаградимых потерь.

(Железнодорожное дело. — 1909. — № 14—15. — С. 88)

Проект соединения Архангельска с р. Обью. — В Инженерном совете Министерства путей сообщения рассматривается срочный проект расширения сети северных железных дорог. Предполагается сооружение новой линии, длиной до 1200 вёрст от г. Архангельска до реки Оби («Русское Знамя», № 286, 20 дек. 1908 г.).

(Железнодорожное дело. — 1909. — № 30. — С. 176)



По поводу нового Французского закона по примыканию железнодорожных линий к водным путям. — Во Франции обнародован новый закон, облегчающий установление более тесной связи между рельсовыми и водными путями сообщения.

Этот закон 3 декабря 1908 года заслуживает тем большего внимания, что и по настоящее ещё время, несмотря на общую, так сказать, аксиомную истину, что каждая железнодорожная линия, независимо от того, является ли она магистральной или второстепенной, только тогда может считаться в нормальном положении, когда она одним концом примыкает к промышленному или торговому центру, а другим упирается в море или другую рельсовую линию, связанную с каким-либо портом, или же соединяет две таковые рельсовые линии, — несмотря на эту истину, далеко не всеми государственными людьми сознаётся та неразрывная, взаимодействующая связь между рельсовыми и водными внутренними и внешними путями сообщения, которая должна лежать в основе правильного государственного хозяйства. Новый закон гласит:

Ст. 1. Предоставляется в морских портах и на судоходных реках собственникам и концессионерам общественных складов, а также концессионерам общественного оборудования и собственникам частного оборудования, законно разрешённого, право устройства примыкающих веток, предоставленное собственникам копей и заводов, на условиях, изложенных ст. 67 технических условий концессионного сооружения второстепенных железных дорог, согласно закону 11 июня 1880 года и 70 ст. Декрета 11 июля 1907 года.

Ст. 2. Декреты Государственного совета, издаваемые по представлению заинтересованных обществ, на основании результатов произведённой анкеты, признавшей общественную полезность, — могут предписывать сооружение бассейнов и устройство оборудования, необходимых для обеспечения и облегчения подхода судов к железнодорожным станциям.

Работы будут производиться обществами по проектам, одобренным министром публичных работ: расходы первоначального устройства принимает на себя государство с участием, буде таковое потребуется, заинтересованных.

Ст. 3. Государственный совет будет делать постановления относительно вознаграждения железнодорожных обществ за ущерб, могущий быть им причинён настоящим законом.

Это едва ли не первый закон, выдвинувший интересы водных путей на первый перед железными дорогами план и указывающий, что в государственном хозяйстве водные сообщения, порты и железные дороги суть сооружения, одинаково необходимые для благосостояния и процветания страны. Но при этом не следует забывать и ту весьма важную сторону дела, что естественные водные пути составляют явление природы и что там, где природа их не дала, искусственное их насаждение сопряжено с громадными затратами, а их эксплуатация обусловлена серьёзными климатическими затруднениями, тогда как железные дороги являются путями сообщения, легко создаваемыми, наиболее дешёвыми по сооружению, и могущими без затруднений развиваться в соответствие с возрастающими требованиями. Поэтому совершенно ясно, что не умаляя значения водных путей, роль



железных дорог в деле обслуживания страны всегда будет первенствующего значения.

Редко бывает, чтобы реки в действительности конкурировали с железными дорогами, или наоборот^{*}; их роль, и притом немаловажная роль — служить подходными путями сообщения, подвозящими грузы к железным дорогам; в конкретных случаях, они разгружают последние, и хотя часто появляются жалобы речников на то, что железные дороги конкурируют с ними своими льготным летними (навигационными) тарифами, но жалобы эти могут служить лишь доказательством ретроградного застоя самих речников, которые, забывая, что везти воз (поезд) по воде значительно дешевле, чем по рельсам, не хотят вводить в своих возах необходимые усовершенствования как технического, так и административного характера.

Совершенно в ином положении стоит вопрос относительно оборудования портов и пристаней; тут задача более сложная. Порты и пристани — это ворота железнодорожных магистралей; порты — как их главные ворота, а пристани — как их боковые ворота. Эти ворота-порты совершенно ошибочно атрофированы от железных дорог и административно выделены в особо ведомственное управление, что, впрочем, по серьёзности своего отрицательного значения, можно считать лишь временною мерой. Что же касается до «боковых ворот», т.е. пристаней судоходных рек, то совершенно правильно центр интереса их созидания и развития сосредоточить в самой среде водников, предоставив им право на облегчение концессионирования ими, примыкающих к магистралям, подъездных путей какого бы конкретного ни было характера, как это и предусматривает вышеприведённый новый закон во Франции.

Тут, кстати, стоит заметить, что составившееся почти всюду мнение о том, что водные пути являются как бы пасынками страны в сравнении с железными дорогами, нельзя признать правильным и основательным. Водные пути до появления железнодорожной сети играли выдающуюся роль, как дешёвые и немонополизированные способы сообщения; государство затрачивало большие средства на их взаимное искусственное сопряжение и на увеличение их пропускной способности. Сооружение

новых каналов, канализирование и шлюзование рек, а также расчистка и дноуглубительные работы издавна поглощали немало денег страны, но сами водники в большинстве случаев всё это запустили и забросили, между тем как железные дороги, получившие своё основное развитие за счёт частных капиталов и частной деятельности, при содействии выкупавшей их впоследствии и дополнявшей их сеть новыми линиями государственной казны, сами себя выдвинули на первый план сообщения страны.

Стоит только сравнить размеры нашего государственного бюджета 50 лет тому назад, т.е. за то время, когда водные и шоссейные пути были ещё в своём полном процветании, с той цифрой государственных доходов, достигающей ныне 2,5 миллиарда рублей в год, которые государственное казначейство получает, благодаря насаждению и развитию нашей железнодорожной сети, и тогда станет вполне ясно, в чём дело, и почему правительства всех стран продолжают более или менее как бы отодвигать в своих жертвах затинившиеся водные пути в сторону?

Железные дороги (за малым исключением) связаны в органически тесно обставленную систему, содействующую развитию государственных платёжных элементов, путём подъёма и развития промышленной, торговой и сельскохозяйственной деятельности страны, и если эти дороги берут что-либо от государства, то взамен возвращают ему сторицею; разумеется, не в смысле фискальных прямых доходов от остатков эксплуатации, но непосредственным содействием росту его активного бюджета.

Такова должна быть государственная точка зрения на железные дороги. Роль же водных путей — служить коммерческим вспомоществованием железнодорожным магистралям, являясь для последних подвозными, разгрузочными и передаточными путями, а также выпускными и приёмными воротами, причём при условии установления правильной административно-хозяйственной политики, эти водные пути могут не ложиться всей своею тяжестью на государственное казначейство, а черпать средства, потребные для самосуществования и саморазвития, — в самих себе.

Энаэс

(Железнодорожное дело. — 1909. —
№ 14—15. — С. 82—83) ●

^{*} Мы не говорим про лесные сплавные реки.



News from the archives

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-326-330>



110 years ago, the experts paid the same attention as they do today to the issues of how to better connect the territories. Immediately after the construction of the Trans-Siberian Main Railroad, the public discussion focused on the construction of the railway from Archangelsk to Ob, from Siberia to Alaska. It is worth also commemorating the first attempt initiated in France to legally regulate the interaction between the infrastructure of different modes of transport, sea and rail transport, to facilitate the multimode transportation.

Keywords: infrastructure, railways, Siberia–Alaska railway, sea ports, adjacent tracks, multimode transportation.

The editorial board expresses gratitude to the staff of the library of Russian University of Transport for the assistance in preparing this publication.

About Siberia–Alaska railway. — In detail analyzing the well-known project of Siberia–Alaska railway, with a strip of land 24 kilometers on both sides provided by the American company, Richard Gennig in the Berlin weekly Zukunft says:

«Americans know what treasures this country lurks in itself. For many years, they sent their engineers there for reconnaissance, and if they are now ready to allocate 500 million rubles, they have perfectly calculated all the expected profit: roads of several thousand kilometers and a sea tunnel of almost fabulous sizes in the vicinity of the Arctic Circle are not in vain! What for the time being, one does not have to wait for passenger traffic, the Yankees know this well. But he wants once again to conclude a profitable deal, as with purchase of Alaska, from which he annually extracts gold alone for almost the entire purchase price paid in 1867 to Russia for concession of the region (for only 3 million rubles). Does America not feed in construction of this road political plans like those that it cherished, acquiring the Philippines? The possibility of economic conquest of East Asia is worth allocating huge sums of money for this» («SPb. Vedomosti», No. 12, January 16, 1909).

— With regard to the German writer's view set forth here, it would be worthwhile to recall the paper in *Zheleznodorozhnoye Delo*, «What do we need and what we don't have», published in 1906 (p. 349). Incidentally, it states that German capital would be ready to seize concessions in our Far East, but on conditions more disadvantageous for us than the Americans. And the very article by Mr. Richard Gennig shows their indifference to our treasures.

The Germans will not expose the Americans only for the purpose of protecting us from irreparable losses.

(*Zheleznodorozhnoye delo [Railway Business]*, 1909, No. 14–15, p. 88).

The project of connecting Arkhangelsk with the river Ob. — The Engineering Council of the Ministry of Railways is considering an urgent project to expand the network of northern railways. It is planned to build a new line up to 1200 miles long from Arkhangelsk to the river Ob («*Russkoe Znamya*», No. 286, December 20, 1908).

(*Zheleznodorozhnoye delo [Railway Business]*, 1909, No. 30, p. 176).

Regarding the new French law on adjoining of railway lines to waterways. — In France, a new law has been promulgated, facilitating the establishment of a closer connection between rail and waterways.

This law of December 3, 1908 deserves all the more attention since up to now, despite the general, so to say, axiomatic truth, that each railway line, regardless of whether it is a main or secondary, can only be considered normal when it adjoins an industrial or commercial center at one end and rests against the sea or another rail line connected to a port with the other, or connects two of these rail lines — despite this truth, not all statesmen recognize that inextricable, interacting connection between rail and water internal and external communication lines, which should underlie the right state economy. The new law reads:



Art. 1. It is granted in seaports and on navigable rivers to owners and concessionaires of public warehouses, as well as concessionaires of public equipment and owners of private equipment legally authorized, the right to arrange adjacent branches granted to owners of mines and factories, under the conditions set forth in Art. 67 technical conditions of the concession construction of secondary railways, according to the law of June 11, 1880 and 70 Art. Of Decree of July 11, 1907.

Art. 2. Decrees of the State Council, issued upon presentation of interested societies, on the basis of the results of a questionnaire that recognized public utility, may prescribe the construction of waterways and the installation of equipment necessary to ensure and facilitate the approach of ships to railway stations.

The works will be carried out by the companies according to the projects approved by the Minister of public works: the costs of initial arrangement are borne by the state with participation, if necessary, of those interested.

Art. 3. The State Council will take decisions regarding the remuneration of railway companies for damage that may be caused to them by this law.

This is almost the first law that puts the interests of waterways in the forefront of the plan and indicates that in the state economy water communications, ports and railways are structures that are equally necessary for the welfare and prosperity of the country. But at the same time, one should not forget the very important side of the matter, that natural waterways constitute a natural phenomenon and that where nature did not give them, their artificial planting is associated with enormous costs, and their operation is caused by serious climatic difficulties, while the railways are communication lines, easily constructed, the cheapest in construction, and capable of developing without difficulty in accordance with increasing requirements. Therefore, it is clear that without diminishing the importance of waterways, the role of railways in serving the country will always be of paramount importance.

It is rare that rivers actually compete with railways, or vice versa*; their role, and, moreover, an important role, is to serve as suitable means of communication bringing goods to the railways; in specific cases, they unload the latter, and although rivermen often complain that the railways compete with them for their preferential summer (navigation) tariffs, these complaints can only serve as evidence of the retrograde stagnation of the river itself, which, forgetting to carry (train) on water is much cheaper than on rails, they do not want to introduce the necessary improvements in their carts, both technical and administrative.

A completely different situation is the question of the equipment of ports and marinas; here the task is more complicated. Ports and marinas are the gates of highways; ports as their main gate, and marinas as their side gates. These port gates were mistakenly atrophied from railways and administratively

allocated to a particularly departmental agency, which, however, due to the seriousness of its negative value, can only be considered as a temporary measure. As for the «side gates», i.e. of marinas of navigable rivers, it is absolutely right to concentrate the center of interest of their creation and development in the very environment of water businessmen, giving them the right to facilitate concession by them, adjacent to highways, of access roads of any particular nature, as the above new law in France provides for.

Here, by the way, it is worth noting that the opinion formed almost everywhere that the waterways are, as it were, stepsons of the country in comparison with railways, cannot be recognized as correct and thorough. Waterways before the emergence of the railway network played an outstanding role, as cheap and non-monopolized means of communication; the state spent large amounts of money on their mutual artificial conjugation and on increasing their throughput. The construction of new channels, canalization and river locks, as well as clearing and dredging, have long absorbed a lot of the country's money, but in most cases river companies themselves started and abandoned it, while the railways, which received their main development through private capital and private activities, with the assistance of the state treasury subsequently redeeming them and supplementing their network with new lines, they themselves put the country's communications to the forefront.

One has only to compare the size of our state budget 50 years ago, i.e. for the time when the water and highway routes were still in full prosperity, with the figure of state revenues now reaching 2,5 billion rubles a year that the state treasury receives thanks to the planting and development of our railway network, and then it will become quite clear, what the matter is, and why do the governments of all countries continue to more or less seemingly push aside the faded waterways becoming the victims?

Railways (with few exceptions) are connected in an organically tightly arranged system that promotes development of state payment elements by raising and developing the country's industrial, commercial and agricultural activities, and if these roads take anything from the state, they will return it a hundredfold in return; of course, not in the sense of fiscal direct revenues from the extras of operations, but by directly contributing to the growth of its active budget.

This should be the state point of view on railways. The role of waterways is to serve as a commercial aid to railways, being for them the last access, unloading and transfer routes, as well as exhaust and receiving gates, and provided that the correct administrative and economic policy is established, these waterways may not burden the state treasury, but draw the funds needed for self-existence and self-development from themselves.

Enaes
(Zheleznodorozhnoe delo [Railway
Business], 1909, No. 14–15, p. 82–83). ●

* We do not talk about timber floating rivers.



К 210-ЛЕТИЮ ЕДИНОГО ТРАНСПОРТНОГО ВЕДОМСТВА И ТРАНСПОРТНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ 332

*История транспорта России –
будущим транспортникам.*

АВТОРЕФЕРАТЫ 337

- Доступность данных автоматизированных информационных систем.
- Управление скоростью грузового поезда при использовании распределённой тяги.
- Напряжённо-деформированное состояние бесстыкового пути при воздействии поездов.

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ 339

Научные издания российских издательств.



КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ • BIBLIO-DIRECTIONS



210 YEARS OF RUSSIAN SINGLE TRANSPORT ADMINISTRATION BODY AND OF TRANSPORT EDUCATION 335

*The history of Russian transport
has been presented to future
transport employees.*

SELECTED ABSTRACTS OF D.SC. & PH.D. THESIS 338

- Automatic control of speed of a cargo train using distributed traction.
- Stress-strain state of a continuous jointless track under the impact of train traffic.
- Availability of data of automated information systems.

NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION 340

*Scientific editions of Russian
publishing houses.*





Движение к будущему через познание прошлого: о курсе истории транспорта России



Симон ИЛИЗАРОВ

Илизаров Симон Семёнович – Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН; Российский государственный гуманитарный университет Москва, Россия.*

История транспорта России: Учебник / Под общ. ред. Т. Л. Пашковой. – М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. – 380 с. – ISBN 978-5-907055-03-2.

Рецензируемый учебник посвящён истории становления и развития всех видов транспорта России. Его главная цель – показать эволюционный процесс исторического развития технического прогресса в транспортной сфере.

Учебник предназначен для студентов и курсантов, обучающихся на 1-м и 2-м курсах образовательных учреждений высшего образования, осуществляющих подготовку кадров для транспортной отрасли.

Издание может быть полезно научным работникам, аспирантам, работникам министерств и ведомств, а также широкому кругу читателей, проявляющих интерес к истории транспорта и транспортной отрасли.

Ключевые слова: авиация, автомобилестроение, виды транспорта, водный транспорт, городской транспорт, железнодорожный транспорт, история транспорта, морской транспорт, профессиональное транспортное образование, речной транспорт, трубопроводный транспорт.

*Информация об авторе:

Илизаров Симон Семёнович – доктор исторических наук, заведующий отделом историографии и источниковедения истории науки и техники ФГБУН Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, профессор Российского государственного гуманитарного университета (РГГУ), Москва, Россия, sinsja@mail.ru.

Рецензия поступила в редакцию 10.10.2019, принята к публикации 17.10.2019.

For the English text of the article please see p. 335.

2019 год для российского транспортного ведомства и отраслевого образования был юбилейным. Поэтому выход учебника «История транспорта России», изданного в «Учебно-методическом центре по образованию на железнодорожном транспорте», и символичен, и своевременен.

Любому молодому специалисту очень важно знать историю той отрасли и профессии, которые он выбрал делом своей жизни. Следует также подчеркнуть, что история науки и техники как неотъемлемая часть образовательного процесса, знание которой является обязательным для профессионального учёного, инженера и техника, — есть давняя традиция отечественной науки, уходящая своими корнями в XVIII столетие. Более ста лет тому назад великий русский учёный и мыслитель академик В. И. Вернадский, бывший также и выдающимся историком научно-технических знаний, писал, что при историческом изучении появляется возможность для верной оценки и обоснованной критики новых достижений. «История науки, — отмечал В. И. Вернадский, — является орудием достижения нового», а идеи прошлого часто становятся генераторами идей будущего.

Появление учебника по истории одной из государствообразующей отрасли, какой является транспортная система, именно в 2019 году нужно интерпретировать как удачную попытку с помощью ретроспективного взгляда предложить видение основного тренда развития в нашей стране единой транспортной системы, обеспечивающей через взаимодействие всех видов транспорта связанность территории, повышение доступности коммуникационных услуг для граждан и субъектов социально-экономических отношений, реализацию транзитного потенциала и т.д. Этому служит и то внимание, которое наряду с историко-техническим подходом уделяется перспективному видению развития отдельных транспортных систем и транспортной системы страны в целом. Такой подход успешно и последовательно проводится в учебнике, подготовленном большим коллективом высокопрофессиональных авторов, возглавляемых Т. Л. Пашковой.

Если обратиться непосредственно к тексту, то вначале несколько слов следует сказать о том, как организован учебник. Авторы поставили и успешно решили очень важную дидактическую задачу — добиться

простоты и удобства работы с данным учебным проектом. Каждый раздел (всего их восемь) включает непосредственно учебный материал, хронологию важнейших событий, глоссарий, контрольные вопросы, тестовые задания и список рекомендуемой литературы; в большинстве разделов содержится также дополнительная информация об отраслевых почётных нагрудных знаках, сопровождаемая их изображениями. Такая структурированная подача материала существенно упрощает восприятие и позволяет добиться более глубокого освоения предмета студентами, обучающимся по укрупнённым группам транспортных специальностей и направлений учебной подготовки.

Нельзя не отметить и следующую особенность учебника. В нём постоянно прослеживается стремление авторов вооружить читателя понятийным аппаратом и терминологией, относящимися не только к истории, но и к системному восприятию современной транспортной системы, причём делается это взвешенно, поэтапно, логически обоснованно по мере продвижения от раздела к разделу.

Первый раздел посвящён общим вопросам становления и развития российского транспорта, при этом он служит своего рода введением к пониманию единой транспортной системы, интеграции видов транспорта. Например, читатель знакомится с определениями таких понятий как «транспорт», «виды транспорта», «история транспорта» и т.п.

Затем следуют шесть разделов, относящихся к истории видов транспорта — городского, гражданской авиации, дорожной отрасли и автомобильного транспорта (включая вопросы автомобилестроения), железнодорожного, морского и речного транспорта, в которых демонстрируется эволюционный процесс развития соответствующих видов, с акцентом на кульминационные точки роста. В завершающем разделе курса на основе освоенного материала даётся обобщающее и углублённое понимание перспектив развития транспорта в XXI столетии как по его видам, так и как целостной системы.

В таком системном виде история транспорта страны ранее, насколько известно, не излагалась, и в этом очевидная инновационность учебника. В прошлом, как правило, предлагался подход, при котором акцент делался только на каком-либо отдельном



виде транспорта лишь с упоминанием других его видов, да и то скорее «по необходимости», нежели целевым образом. Естественным следствием такого системного представления генезиса российского транспорта является практическая предназначённость учебника для студентов всех транспортных специальностей.

К числу позитивных качеств учебника следует отнести то, что авторы не ограничиваются только хроникально-событийной историей, а насыщенный нарратив сопровождается портретными характеристиками выдающихся деятелей транспорта, игравших важную роль в его развитии. Кстати, этот «человеческий» элемент можно было бы усилить, поскольку изложение истории транспорта часто фокусируется или на технической стороне (появлении новых средств передвижения, изобретениях, технологиях), или на эксплуатационных аспектах (процессах перевозки, их масштабах, направлениях, способах организации и т.д.). В настоящем учебнике предложен сбалансированный подход, который увязывает и ту, и другую стороны развития транспорта. Представляется, что это оптимальный путь презентации сложного материала.

Главной чертой профессионального транспортного образования в России всегда была связь с задачами отрасли, чёткая ориентация на достижение государственных целей и учёт интересов работодателей, обеспечение непрерывного обучения всех уровней. Учебник целенаправленно и последовательно раскрывает развитие транспортного образования в связи с эволюцией (и в отдельные периоды — с технической революцией) транспортной отрасли.

Важно, что в учебнике говорится о трубопроводном транспорте, который играет ключевую роль в экономике страны. Развитие магистральных газо- и нефтепроводов служит определяющим фактором роста внешней торговли и интеграции России в мировую экономику. У всех на слуху газовые проекты «Ямал—Европа», «Северный поток», «Голубой поток», «Турецкий поток». Среди наиболее известных нефтепроводов — «Дружба», «Балтийская трубопроводная система-2 (БТС-2)», трубопроводная система «Восточная Сибирь—Тихий океан» (ВСТО), Каспийский трубопроводный консорциум (КТК). Многие из этих проектов уже реализованы. Переоценить значение

трубопроводного транспорта для нашей страны невозможно. Это самый дешёвый способ доставки, гарантирующий энергетическую независимость России. Поэтому, как правильно заметили авторы учебника, его развитию должно уделяться особое внимание.

В заключении, на последних страницах учебника, авторы представили информацию об основных транспортных вузах страны, назвали руководителей российской транспортной системы, начиная со времени Российской империи до наших дней, с их официальными должностями и годами службы.

Конечно, главное для учебно-методического материала слово—текст, но современный способ организации и подачи содержания—смысла предполагает выразительный визуальный ряд и дизайн. В этом плане заслуживают внимания оформление учебника, в частности, иллюстрации художника Е. А. Вединой.

Несмотря на сравнительно небольшое текстовое пространство (менее 24 печатных листов), авторам удалось представить огромный массив фактов по истории российского транспорта, но при этом, как уже отмечалось, удачное структурирование материала, лаконичная форма и стиль изложения сделали учебник цельным и информационно неперегруженным. Такая форма привлекательна не только для обучающихся, но и для других читателей, интересующихся отечественной историей и историей транспорта, в частности. Содержание учебника вполне достаточно для того, чтобы читатель получил достаточное и системное представление об истории становления и развития российского транспорта и системы транспортного образования. Учебник также послужит хорошим побудительным мотивом для поиска дополнительной информации по вызвавшим интерес вопросам и, может быть, станет отправной точкой для собственных исследований.

Поскольку российский транспорт одна из самых динамично развивающихся отраслей народного хозяйства и технического развития, а изменения в этой области происходят буквально каждодневно, то, наверное, целесообразно, не откладывая на неопределённое будущее, задуматься о подготовке нового издания учебника «История транспорта России», который ориентирует учащихся на движение к будущему через познание прошлого. ●



Moving to the Future by Studying the Past: on the Course in the History of Transport in Russia



Simon S. ILIZAROV

Ilizarov, Simon S., S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia.*

The history of transport in Russia: Textbook. Ed. by T. L. Pashkova.

Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Vocational Education «Training Methodological Center for Railway Education», 2019, 380 p. ISBN 978-5-907055-03-2.

ABSTRACT

The peer-reviewed textbook is dedicated to the history of origination and development of all modes of

transport in Russia. Its main goal is to show evolution historical process of development of technological progress in the transport sector. It is intended for the 1st and 2nd year students of higher education institutions training personnel for transport industry.

The publication may be useful to researchers, Ph.D. students, employees of ministries and departments, as well as to a wide circle of readers, whose attention is drawn to the history of transport and of the transport industry.

Keywords: aviation, mechanical engineering, modes of transport, water transport, railway transport, urban transport, history of transport, sea transport, professional transport education, river transport, pipe transportation.

The year of 2019 was a jubilee one for Russian transport public administration and transport education. Therefore publication of the textbook «History of transport of Russia», published at «Training Methodological Center for Railway Education» is largely a symbolic one.

It is particularly important for any young specialist to know the history of the industry and the profession that he chose as his deed of life. It is to underline that the history of science and technology is an inherent part of the educational process, and the knowledge there-of is mandatory for any professional researcher, engineer, or

technician, and this is the long tradition of the Russian science that finds its roots in 18th century. More than 100 years ago the outstanding Russian scientist and thinker Vladimir Vernadsky, who was also an outstanding historian of science and engineering knowledge, wrote that a historical study always gave the opportunity to correctly assess and address substantiated critics towards new achievements. «The history of science, he noted, is the tool to achieve the new», and the ideas of the past can help generate future ideas.

The publication of the textbook on the history of the industry related to national development which is the

* Information about the author:

Ilizarov, Simon S. – D.Sc. (Hist), head of the department of historiography and source study of S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia, sinsja@mail.ru.

Review received 10.10.2019, accepted 17.10.2019.

For the original Russian text please see p. 332.

transport system exactly in 2019, should be interpreted as a successful attempt to use retrospective view to suggest a vision of the core trend of development of the Russian single transport system, providing through the interaction of all the modes of transport the connectedness of the territory, increasing availability of transport services for citizens and economic entities, realization of transit potential, etc. This tentative is supplemented by the attention that along with a retrospective approach is paid to a promising vision of development of independent transport systems and of the transport system of the country. This approach has been sustainably and with the evident success implemented in the textbook prepared by the large team of highly professional authors headed by T. L. Pashkova.

If we refer directly to the text, then we shall start by saying few words about how the textbook is organized. The authors tried and finally successfully solved a particularly important didactic task to achieve reasonable convenience and clearness for those who will work with that educational project. Each section (and they are eight) includes training material itself, chronology of the most important events, glossary, test questions, test tasks and a list of recommended references; most chapters include additional information on the sectorial awards and badges, followed by relevant images. Such a feed of material significantly facilitates perception and allows to attain deeper understanding of the subject by the students mastering enlarged groups of transport specialties and fields of training.

We should note the following feature of the textbook. Evidently, there is a constantly monitored desire of the authors to provide readers with concept apparatus and terminology related not only to the history, but to systemic perception of the modern transport system as well. Hence, it is implemented in a balanced, phased, logically justified manner, as you move from a section to another.

The first section is dedicated to general issues of maturing and development of national transport, while it serves as a kind of introduction to understanding the singularity of the transport system, integration of modes of transport. For example, a reader gets acquainted with the concepts of «transport», «modes of transport» and «history of transport».

Then there are six sections, which are related to the history of modes of transport, comprising urban, civil aviation, road industry and road transport (including automotive construction issues), railway, sea and river transport demonstrating the evolution process of existing modes, but focusing on culmination points of growth. The summarizing and final section of the course is based on the already mastered material and gives deep insightful understanding of development prospects of transport in 21st century both for its modes and for transport as for a holistic system.

Here we can see the obvious innovation of a textbook, since earlier, at least in such a systemic form, the history of transport of the country was not set out. A mode-based approach previously focused on a specific mode of transport, while mentioning other modes of transport in a rather «obligatory» or imposed, rather than in a targeted manner. The systemic presentation of the genesis of the Russian transport naturally results in practical purpose of a textbook for students of all transport specialties.

As the merit of the textbook we can note that the authors overcome the constraints of presenting the events themselves and their chronology only, and the dense narrative story if followed by the historical portraits of prominent statesmen who glorified themselves playing an important role in the development of transport. Besides,

this humanistic element could be strengthened, as setting out the history of transport often focuses either on the technical side (appearance of new vehicles, inventions, technology), or operational aspects (transportation processes, their scope, directions, organization features, etc.). The textbook proposed balanced approach that links both sides of development of transport. It seems that this is the best way to present so sophisticated matter.

The main feature of professional transport education in Russia has always been associated with a alienable connection with the tasks of the industry, clear focus on achievement of public goals, consideration of the interests of employers, and ensuring continuous learning at all levels. The textbook purposefully and continuously shows development of transport education in connection with evolution (and, for certain periods with the technical revolution) of the transport industry.

It is characteristic that the authors of the textbook noted especially the development of pipeline transport that plays a key role for the country's economics. Development of trunk gas and oil pipelines serves as a definite important factor in the growth of foreign trade and Russia's integration into the world economy. Everyone has heard about the gas projects «Yamal–Europe», «Nord Stream», «Blue Stream», «Turkish stream». Among the most famous oil pipelines one can quote «Druzhba» [Friendship], Baltic pipeline system 2 (BTS-2), pipeline system Eastern Siberia – Pacific (VSTO), Caspian Pipeline Consortium (CPC). Many of these projects have already been implemented. It is quite difficult to overestimate the value of pipe transport for Russia. This is the cheapest way of delivery and it guarantees energy independence of Russia. Therefore, as the authors of the textbook correctly noted, its developments must draw special attention.

In conclusion, on the last pages of the textbook the authors published data about the main transport universities of the country, recalled the leaders of the Russian transport system starting from times of Russian Empire to the present day, naming their official posts and years of service.

Word, or text, are most important for a textbook or manual. Besides, modern techniques of structuring and presenting of the contents (the very sense of the text) presupposes expressive visual images and design. In that context the design of the textbook, and particularly the illustrations of the artist E. A. Vedina, deserve special attention.

In general, despite comparatively condensed textual space (less than 24 conventional printer's sheets) the authors have managed to present a huge array of facts on the history of Russian transport, while good structure, laconic form, and chosen style of narration made the textbook consistent while not overloaded with information. That form is rather attractive for both the students, and the readers for whom the Russian history, and particularly the history of transport are of interest. The contents of the textbook is quite sufficient for the reader receives sufficiently full and systemic vision of the history of originations, maturing and development of Russian transport and transport education. The textbook will be a good incentive to search for additional information and data regarding the topics which have attracted readers' interest and will also become a starting point for own research.

As Russian transport is amidst most rapidly developing economic and technical sectors subject to changes at a daily pace then it is advisable, without postponing it for indefinite future, to consider a publication of a new edition of the textbook entitled History of Russian Transport, which invites the students to move into the future through acquiring deep knowledge about the past. ●

АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

*Selected abstracts of D.Sc. and Ph.D.
theses submitted at Russian transport
universities.*

For the English text please see p. 338.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-337-338>

Воробьев В. Г. Модели и методы оперативного восстановления и обеспечения доступности данных автоматизированных информационных систем / Автореф. дис... док. техн. наук. — СПб.: ПГУПС, 2019. — 34 с.

Решена научная проблема разработки и развития научно-методического аппарата оперативного восстановления и обеспечения доступности данных на основе векторного представления многоразрядных двоичных чисел и численных методов их сжатия. Целью исследования являлось обеспечение требуемых характеристик оперативности процессов восстановления и доступности информации. Было достигнуто повышение коэффициента сжатия без потерь для информации произвольного формата представления, за счёт чего снижены возможные затраты на средства хранения информации в автоматизированных информационных системах (АИС). Сокращено время разработки оптимальных планов функционирования систем обеспечения доступности информации (СОДИ) на 25 %.

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Работа выполнена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

Киселев М. Д. Автоматическое управление скоростью грузового поезда при использовании распределённой тяги / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: РУТ, 2019. — 24 с.

Изложены новые научно-обоснованные технические решения по совершенствованию системы автоматического управления скоростью движения локомотивов грузового поезда с распределённой тягой, внедрение которых вносит

значительный вклад в развитие и повышение эффективности и безопасности железнодорожного транспорта.

Сформирована система критериев оценки качества управления скоростью движения грузовых тяжёловесных поездов при использовании распределённой тяги.

Выбрана методика решения задачи параметрического синтеза САУ грузового поезда с распределённой тягой, которую следует выполнять с использованием многомассовой дискретной модели поезда.

Разработана методика оценки чувствительности САУ к отклонению параметров системы.

Специальность 05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт), 05.22.07 — Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация. Работа выполнена в Российском университете транспорта.

Корниенко Е. В. Особенности напряжённо-деформированного состояния бесстыкового пути при учёте воздействия поездов / Автореф. дис... канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. — 23 с.

На основании решения задачи определения условий устойчивости бесстыкового пути при знакопеременном действии продольных сил в рельсовых плетях при суточных колебаниях температуры с учётом воздействия поездов раскрыт механизм и причины роста остаточных стрел изгиба рельсов в плане.

Из проведённых в работе исследований следует общий вывод о том, что наименьшая вероятность возникновения опасных для движения поездов отступлений в напряжённо-деформированном состоянии бесстыкового пути обеспечивается применением рельсовых плетей длиной до перегона с сезонным перезакреплением их 400-метровых концевых участков.

Специальность 05.22.06 — Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог. Работа выполнена в Ростовском государственном университете путей сообщения.



ABSTRACTS of D.Sc. and Ph.D. THESES

*Selected abstracts of D.Sc. and Ph.D. theses
submitted at Russian transport universities
For the original Russian text please see p. 337.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-337-338>

Kiselev, M. D. Automatic control of speed of a cargo train using distributed traction. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Avtomaticheskoe upravlenie skorostyu gruzovogo poezda pri ispolzovanii raspdelennoi tyagi. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, RUT publ., 2019, 24 p.

New scientifically based technical solutions for improving the system for automatically controlling speed of a locomotive of a cargo train with distributed traction are introduced, making a significant contribution to development and improvement of efficiency and safety of railway transport.

A system of criteria for assessing quality of controlling speed of movement of heavy cargo trains using distributed traction is formed.

A system has been developed for automatic control of speed of movement of a cargo long-train with distributed traction. To ensure the required level of control quality and traffic safety, SAC is supplemented with a reference model of the train as of a control object.

A method was chosen for solving the problem of parametric synthesis of SAC of a cargo train with distributed traction, which should be performed using a multi-mass discrete train model.

A method has been developed for assessing sensitivity of SAC to deviation of system parameters.

Specialty 05.13.06 – Automation and control of technological processes and production (transport), 05.22.07 – Rolling stock of railways, traction of trains and electrification. The work was performed at Russian University of Transport.

Kornienko, E. V. Features of the stress-strain state of a continuous jointless track when taking into account the effects of trains. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya besstykovogo puti pri uchete vozdeistviya

poezdov. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Rostov-on-Don, PSTU publ., 2019, 23 p.

Based on solution of the problem of determining stability conditions of a continuous jointless track under the alternating action of longitudinal forces in rails at daily temperature fluctuations, taking into account the effects of trains, the mechanism and causes of growth of residual rail switches bending in the plan are revealed.

The studies allow to draw general conclusion that the smallest probability of occurrence of deviations dangerous for movement of trains in the stress-strain state of a continuous jointless track is ensured by the use of rails up to a haul with seasonal re-fastening of their 400-meter end sections.

Specialty 05.22.06 – Railway track, research and design of railways. The work was performed at Rostov State Transport University.

Vorobyev, V. G. Models and methods of operational recovery and ensuring availability of data from automated information systems. Abstract of D.Sc. (Eng) thesis [Modeli i metody operativnogo vosstanovleniya i obespecheniya dostupnosti dannykh avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem. Avtoref. dis... dok. tekhn. nauk]. St. Petersburg, PSTU publ., 2019, 34 p.

The scientific problem of development of scientific and methodological apparatus for rapid recovery and availability of data based on vector representation of multi-bit binary numbers and numerical methods for their compression has been solved. The objective of the study was to provide required characteristics of efficiency of recovery processes and availability of information. The results include an increase in lossless compression coefficient for information of an arbitrary presentation format, thereby reducing possible costs of information storage means in automated information systems (AIS). Time for developing optimal plans for functioning of information accessibility systems (IAS) was reduced by 25 %.

Specialty 05.13.18 – Mathematical modelling, numerical methods and program complexes. The work was performed at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

*English text of Russian editions
please see p. 340.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-339-340>

Антипин Д. Я., Воробьев В. И., Измеров О. В. и др. Системный анализ конструкций тяговых приводов и поиск новых технических решений. — Брянск: БГТУ, 2019. — 267 с. — ISBN 978-5-907111-67-7.

Архангельский Г. Г., Балабанов Н. И., Гушин Л. В. и др. Лифты, платформы подъёмные для инвалидов, эскалаторы: Учебник. — М.: Изд-во АСВ, 2019. — 680 с. — ISBN 978-5-4323-0300-4

Бокарев С. А., Каралетов Э. С., Чижов С. В., Яшнов А. Н. Содержание и реконструкция мостов и водопропускных труб на железных дорогах: Учебник. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — 574 с. — ISBN 978-5-907055-82-7.

Графкина М. В. Охрана труда. Автомобильный транспорт: Учебник. — М.: Академия, 2019. — 190 с. — ISBN 978-5-4468-8554-1.

Грязнов М. В. и др. Определение стоимости регулярных перевозок пассажиров автобусами и трамваями. [Электронный ресурс]: Учеб. пособие. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2019. — ISBN 978-5-9967-1543-5.

Данилов Е. Б. Вагоны метрополитена моделей 81-765/766/767: Учеб. пособие по изучению пневматического оборудования. — М.: Маска, 2019. — 133 с. — ISBN 978-5-6042571-1-1.

Жулькин М. Н., Донченко А. В., Шапшал С. А. Автоматизированная система управления тяговыми ресурсами ОАО «РЖД» (АСУТ): Учеб. пособие. — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. — 79 с. — ISBN 978-5-88814-853-2.

Зедгенизов А. В. Оценка качества организации дорожного движения на основе транспортного спроса: Монография. — Иркутск: Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019. — 194 с. — ISBN 978-5-8038-1417-7.

Капырина В. И., Коротин П. С., Маньков В. А., Трошко И. В. Транспортная логистика, технологические процессы погрузочно-разгрузочных и складских работ на железнодорожном транспорте: Учебник. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — 380 с. — ISBN 978-5-907055-52-0.

Клепикова М. В. Правовое обеспечение профессиональной деятельности на железнодорожном транспорте и в других отраслях: Учебник. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — 446 с. — ISBN 978-5-907055-45-2.

Козлов В. В., Литвинцев В. Я., Макоско А. А. и др. Комплексное освоение территории Российской Федерации на основе транспортных пространственно-логистических коридоров. Актуальные проблемы реализации мегапроекта «Единая Евразия: ТЕПР-ИЕТС»: Монография / Отв. ред. В. В. Козлов,

А. А. Макоско. — М.: Наука, 2019. — 463 с. — ISBN 978-5-907036-52-9.

Комаров И. М., Антонов А. Е. Расследование преступлений на объектах железнодорожного транспорта: Монография. — М.: Юрлитинформ, 2019. — 178 с. — ISBN 978-5-4396-1902-3.

Левин Д. Ю., Шапкин И. Н. Технология достижения высоких результатов в грузовой и местной работе: Учеб. пособие. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — 421 с. — ISBN 978-5-907055-67-4.

Мышко Ф. Г., Олимпиев А. Ю., Шагиева Р. В. и др. Транспортная инфраструктура и обеспечение безопасности её объектов: Монография / Отв. ред. Ф. Г. Мышко. — М.: Издательский дом ГУУ, 2019. — 164 с. — ISBN 978-5-215-03204-6.

Набоких В. А. Датчики автомобильных электронных систем управления и диагностического оборудования: Учеб. пособие. — М.: Инфра-М: Форум, 2019. — 238 с. — ISBN 978-5-00091-596-7.

Никишов С. И. Цифровая трансформация логистики: Монография. — М.: Издательский дом Дело, 2019. — 109 с. — ISBN 978-5-7749-1516-3.

Нутович В. Е. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки оформления коммерческих актов: Учеб. пособие. — М.: Техполиграфцентр, 2019. — 119 с. — ISBN 978-5-94385-164-3.

Песков В. И. Конструкция автомобильных трансмиссий: Учеб. пособие. — М.: Форум, Инфра-М, 2019. — 143 с. — ISBN 978-5-00091-578-3.

Савенко А. Е. Судовые электроприводы: Учебное пособие. — Керчь: Керченский гос. морской технологический ун-т, 2019. — 219 с. — ISBN 978-5-00062-359-6.

Соловьёва О. Б. Обучение устному профессионально-ориентированному общению студентов морских инженерных специальностей: Монография. — Н. Новгород: Изд-во «ВГУВТ», 2019. — 151 с.

Текушин Д. В., Власова О. С., Клименти Н. Ю. Пожарная безопасность подземных сооружений: Учеб. пособие. — Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2019. — 261 с. — ISBN 978-5-9948-3223-3.

Тихомиров П. В., Камынин В. В., Сиваков В. В. и др. Прогнозирование городских логистических систем пассажирских перевозок на основе искусственных нейронных сетей: Монография. — Брянск: Новый проект, 2019. — 158 с. — ISBN 978-5-6042562-3-7.

Шалягин Д. В., Горелик А. В., Боровков Ю. Г. Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте: Учебник / Под ред. Д. В. Шалягина. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — ISBN 978-5-907055-53-7.

Шведов В. Е., Ксенофонтова Т. Ю. Межрегиональное взаимодействие в транспортно-логистической сети: Монография. — Ульяновск: Зебра, 2019. — 137 с. — ISBN 978-5-6042564-9-7.

Шмытинский В. В., Глушко В. П. Многоканальная связь на железнодорожном транспорте: техника и технологии наземного транспорта, системы обеспечения движения поездов: Учеб. пособие. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — 462. — ISBN 978-5-907055-61-2.

Подготовила Н. ОЛЕЙНИК





NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

For the original list of editions published in Russian please see p. 339.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-339-340>

Antipin, D. Ya., Vorobyov, V. I., Izmerov, O. V. [et al.]. System analysis of design of traction drives and search for new technical solutions [*Sistemnyi analiz konstruktivnykh tyagovykh privodov i poisk novykh tekhnicheskikh reshenii*]. Bryansk, BSTU, 2019, 267 p. ISBN 978-5-907111-67-7.

Arkhangelsky, G. G., Balabanov, N. I., Gushchin, L. V. [et al.]. Elevators, lifting platforms for the disabled, escalators: Textbook [*Lifty, platformy pod'emnye dlya invalidov, escalatory: Uchebnik*]. Moscow, ASB Publishing House, 2019, 680 p. ISBN 978-5-4323-0300-4.

Bokarev, S. A., Karapetov, E. S., Chizhov, S. V., Yashnov, A. N. Maintenance and reconstruction of bridges and culverts on railways: Textbook [*Soderzhanie i rekonstruktsiya mostov i vodoprovodnykh trub na zheleznykh dorogakh: Uchebnik*]. Moscow, TMC for railway education, 2019, 574 p. ISBN 978-5-907055-82-7.

Danilov, E. B. Metro cars of models 81-765/766/767: Manual for the study of pneumatic equipment [*Vagony metropolitena modeli 81-765/766/767: Ucheb. posobie po izucheniyu pnevmaticheskogo oborudovaniya*]. Moscow, Maska publ., 2019, 133 p. ISBN 978-5-6042571-1-1.

Grafkina, M. V. Labor protection. Road Transport: Textbook [*Okhrana truda. Avtomobilnyi transport: Uchebnik*]. Moscow, Academia publ., 2019, 190 p. ISBN 978-5-4468-8554-1.

Gryaznov, M. V. [et al.]. Determination of the cost of regular passenger transportation by buses and trams [*Opreделение stoimosti regul'yarnykh perevozok passazhirov avtobusami i tramvayami*]. [Electronic resource]: Study guide. Magnitogorsk, Nosov MSTU, 2019. ISBN 978-5-9967-1543-5.

Kapryina, V. I., Korotin, P. S., Mankov, V. A., Troshko, I. V. Transport logistics, technological processes of loading and unloading and storage operations in railway transport: Textbook [*Transportnaya logistika, tekhnologicheskie protsessy pogruzochno-razgruzochnykh i sklad'skikh rabot na zheleznodorozhnom transporte: Uchebnik*]. Moscow, TMC for railway education, 2019, 380 p. ISBN 978-5-907055-52-0.

Klepikova, M. V. Legal support of professional activities in the railway transport and in other industries: Textbook [*Pravovoe obespechenie professionalnoi deyatel'nosti na zheleznodorozhnom transporte i v grugikh otraslyakh: Uchebnik*]. Moscow, TMC for railway education, 2019, 446 p. ISBN 978-5-907055-45-2.

Komarov, I. M., Antonov, A. E. Investigation of crimes at railway facilities: Monograph [*Rassledovanie prestuplenii na ob'ektakh zheleznodorozhnogo transporta: Monografiya*]. Moscow, Yurilitinform publ., 2019, 178 p. ISBN 978-5-4396-1902-3.

Kozlov, V. V., Litvinsev, V. Ya., Makosko, A. A. [et al.]. Integrated development of the Russian Federation on the basis of transport and logistics corridors. Actual problems of implementation of the megaproject «United Eurasia: TEPR—IETS»: Monograph [*Kompleksnoe osvoenie territorii Rossiiskoi Federatsii na osnove transportnykh prostranstvenno-logisticheskikh koridorov. Aktualnye problemy realizatsii megaproekta «Edinaya Evraziya: TEPR—IETS»: Monografiya*]. Ed. by V. V. Kozlov, A. A. Makosko. Moscow, Nauka publ., 2019, 463 p. ISBN 978-5-907036-52-9.

Levin, D. Yu., Shapkin, I. N. Technology for achieving high results in freight and local work: Study guide [*Tekhnologiya dostizheniya vysokikh rezul'tatov v gruzovoi i mestnoi rabote: Ucheb. posobie*]. Moscow, TMC for railway education, 2019, 421 p. ISBN 978-5-907055-67-4.

Myshko, F. G., Olimpiev, A. Yu., Shagieva, R. V. [et al.]. Transport infrastructure and ensuring safety of its facilities: Monograph [*Transportnaya infrastruktura i obespechenie bezopasnosti ee ob'ektov: Monografiya*]. Moscow, GUU Publishing House, 2019, 164 p. ISBN 978-5-215-03204-6.

Nabokikh, V. A. Sensors of automotive electronic control systems and diagnostic equipment: Study guide [*Datchiki avtomobilnykh elektronnykh sistem upravleniya i diagnosticheskogo oborudovaniya: Uchebnoe posobie*]. Moscow, Infra-M, Forum publ., 2019, 238 p. ISBN 978-5-00091-596-7.

Nikishov, S. I. Digital transformation of logistics: Monograph [*Tsifrovaya transformatsiya logistiki: Monografiya*]. Moscow, Publishing House Delo, 2019, 109 p. ISBN 978-5-7749-1516-3.

Nutovich, V. E. Methods and algorithms of intellectual support for execution of commercial acts: Study guide [*Metody i algoritmy intellektualnoi podderzhki oformleniya kommercheskikh aktov: Ucheb. posobie*]. Moscow, Tekhpoltgrastsentr publ., 2019, 119 p. ISBN 978-5-94385-164-3.

Peskov, V. I. Design of automobile transmissions: Study guide [*Konstruktivnyy avtomobilnykh transmissii: Ucheb. posobie*]. Moscow, Forum, Infra-M publ., 2019, 143 p. ISBN 978-5-00091-578-3.

Savenko, A. E. Ship electric drives: Study guide [*Sudovie elektropriivody: Uchebnoe posobie*]. Kerch, Kerch State Marine Technological University, 2019, 219 p. ISBN 978-5-00062-359-6.

Shalyagin, D. V., Gorelik, A. V., Borovkov, Yu. G. Automation, telemechanics and communication in railway transport: Textbook [*Avtomatika, telemekhanika i svyaz na zheleznodorozhnom transporte: Uchebnik*]. Ed. by D. V. Shalyagin. Moscow, TMC for railway education, 2019. ISBN 978-5-907055-53-7.

Shmytinsky, V. V., Glushko, V. P. Multichannel communication in railway transport: land transport equipment and technologies, train traffic support systems: Study guide [*Mnogokanalnaya svyaz na zheleznodorozhnom transporte: tekhnika i tekhnologii nazemnogo transporta, sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov: Ucheb. posobie*]. Moscow, TMC for railway education, 2019, 462 p. ISBN 978-5-907055-61-2.

Shvedov, V. E., Ksenofontova, T. Yu. Interregional interaction in the transport and logistics network: Monograph [*Mezhregionalnoe vzaimodeistvie v transportno-logisticheskoi seti: Monografiya*]. Ulyanovsk, Zebra publ., 2019, 137 p. ISBN 978-5-6042564-9-7.

Solovyova, O. B. Teaching oral professionally-oriented communication of students of marine engineering specialties: Monograph [*Obuchenie ustnomu professionalno-orientirovannomu obshcheniyu studentov morskikh inzhenernykh spetsialnostei*]. Nizhny Novgorod, Publishing House VGUVT, 2019, 151 p.

Tekushin, D. V., Vlasova, O. S., Klimenti, N. Yu. Fire safety of underground structures: Study guide [*Pozharnaya bezopasnost podzemnykh sooruzhenii: Ucheb. posobie*]. Volgograd, Volgograd State Technical University, 2019, 261 p. ISBN 978-5-9948-3223-3.

Tikhomirov, P. V., Kamynin, V. V., Sivakov, V. V. [et al.]. Forecasting urban logistics systems of passenger transportation based on artificial neural networks: Monograph [*Prognozirovanie gorod'skikh logisticheskikh sistem passazhir'skikh perevozok na osnove iskusstvennykh neironnykh setei: Monografiya*]. Bryansk, New project publ., 2019, 158 p. ISBN 978-5-6042562-3-7.

Zedgenizov, A. V. Estimation of quality of traffic management based on transport demand: Monograph [*Otsenka kachestva organizatsii dorozhnogo dvizheniya na osnove transportnogo sprosa: Monografiya*]. Irkutsk, Publishing House of Irkutsk National Research Technical University, 2019, 194 p. ISBN 978-5-8038-1417-7.

Zhulkin, M. N., Donchenko, A. V., Shapshal, S. A. Automated traction resources management system of JSC Russian Railways (ASUT): Study guide [*Automatizirovannaya sistema upravleniya tyagovymi resursami OAO «RZD» (ASUT): Ucheb. posobie*]. Rostov-on-Don, RGUPS publ., 2019, 79 p. ISBN 978-5-88814-853-2.

Compiled by N. OLEYNIK

АНЕКДОТ

НА ОБОЧИНЕ



Рис. Александр Шмидт / Pic. Alexander Schmidt.

Верная дорога. The right way.

- – Изобретение автомобиля – это огромный прогресс! С тех пор люди стали передвигаться намного быстрее!

– Да-да, особенно на переходах через улицу...

- Если тебе сигналият из машины, а ты не узнал водителя, то лучше просто уйди с проезжей части.

- Голос из GPS-навигатора: – Через 200 метров остановите, я выйду.

Смех сквозь мысли

- «Никакой транспорт не будет попутным, если не знаешь, куда идти».

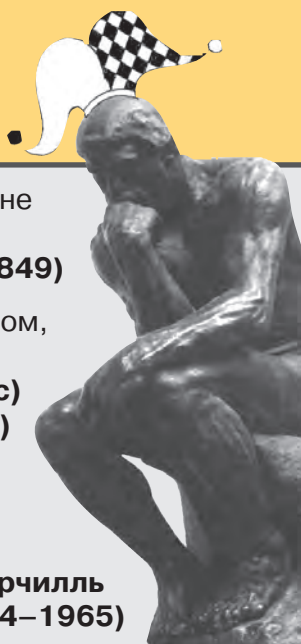
Эдгар Аллан По (1809–1849)

- «Секрет продвижения вперёд заключается в том, чтобы начать двигаться».

Марк Твен (Сэмюэл Лэнгхорн Клеменс) (1835–1910)

- «Много людей спотыкаются о великие открытия, но большинство из них просто перешагивают и идут дальше».

Сэр Уинстон Леонард Спенсер-Черчилль (1874–1965)





**World of Transport and
Transportation**

Vol. 17, Issue 5, 2019

Editor-in-Chief **Boris Lyovin**

For your letters:

Mir Transporta,
9, str. 9, Obraztsova ul.,
Moscow, 127994, Russia.
Tel/fax +7(495)684 2877
e-mail: mirtr@mail.ru
wtjournal@gmail.com

Почтовый адрес редакции:

127994, Москва,
ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Тел/факс (495)684 2877
e-mail: mirtr@mail.ru
wtjournal@gmail.com



ISSN 1992-3252



9 771992 325778 >