

# ТРАНСПОРТ МИР

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ  
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

4 2019  
(83)

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 автомобильного 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

*Олег КРАСНОВ*

Методика определения интегрального распределения сил, действующих на путь. . . . . 6

*Борис ЛЁВИН, Виктор ЦВЕТКОВ, Юрий ДЗЮБА*

Субсидиарное управление на железной дороге . . . . . 22

*Анатолий ЗАЙЦЕВ, Яна СОКОЛОВА, Татьяна ПАНТИНА*

Инновационное развитие транспортной системы с применением технологии магнитной левитации . . . . . 36

### НАУКА И ТЕХНИКА

*Михаил БОЯРШИНОВ, Никита КУЗНЕЦОВ*

Температурный режим системы выпуска автомобиля при пониженных температурах. . . . . 48

*Таисия ШЕПИТЬКО, Игорь АРТЮШЕНКО, Павел ДОЛГОВ*

Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне . . . . . 68

*Андрей ШАТОХИН*

Виртуальная сортировка: совершенствование организации пропуска и переработки порожних вагонопотоков. . . . . 80

*Иван СТАРШОВ, Валерий КОБЗЕВ, Евгений СЫЧЁВ*

Совершенствование методики расчёта параметров сортировочных горок. . . . . 90

*Сергей КОВАЛЁВ, Андрей СУХАНОВ*

Интеллектуализация контроля вагонов в железнодорожном сортировочном парке . . . . . 98

### ЭКОНОМИКА

*Оксана ПОКРОВСКАЯ*

Цифровизация, автоматизация, идентификация и маркировка логистических объектов для решения задач клиентоориентированности . . . . . 112

*Георгий ГОГРИЧИАНИ, Антон ЛЯШЕНКО*

Стратегическое развитие поставок нефтегрузов из России в Палестину . . . . . 136

*Умидилла ИБРАГИМОВ, Махмуджан ТОХИРОВ*

Формирование единого и внешне интегрированного транспортного пространства в Центральной Азии . . . . . 148

*Людмила БУЯНОВА, Ольга МУДРОВА*

Логистика малотоннажного СПГ . . . . . 166

## 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

## ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Максим КУДРЯШОВ, Радион АЙРИЕВ, Георгий ОВНАНЯН*  
Кластерный анализ маршрутов новой модели управления наземным городским пассажирским транспортом общего пользования ..... 182
- Дмитрий МОРОЗ, Данила ДОЛЕНКО, Александр ПРОКОПЕНКОВ*  
Анализ методов определения оптимального количества автомобилей-такси в мегаполисах ..... 196
- Виктор ШАРОВ, Алмас ТЛЕУХАНОВ*  
Динамические приоритеты пропуска грузовых поездов в коммерческих целях ..... 208
- Надежда ФИЛИППОВА, Владимир ВЛАСОВ, Владимир БЕЛЯЕВ*  
Навигационный контроль доставки грузов в условиях севера России ..... 218
- Валерий БУРЧЕНКОВ*  
Принятие решений по результатам автоматического диагностирования деталей и узлов подвижного состава. .... 232
- Максим ЖЕЛЕЗНОВ, Олег КАРАСЁВ, Алексей БЕЛОШИЦКИЙ, Егор ШИТОВ*  
Инновационная экосистема железнодорожного транспорта: практика ведущих компаний. .... 244

## БЕЗОПАСНОСТЬ

- Анатолий САФОНОВ, Вячеслав ДЖАКСБАЕВ*  
Моделирование деятельности лётных экипажей вертолётов в аварийных ситуациях. .... 260
- Владимир БАСКОВ, Дарья КРАСНИКОВА, Екатерина ИСАЕВА*  
Влияние поведенческого фактора водителя на образование транспортного затора ..... 272

## КОЛЕСО ИСТОРИИ

- Николай ГРИГОРЬЕВ*  
Борис Семёнович Якоби ..... 284
- Пресс-архив. Управление персоналом 110 лет назад. .... 301

## КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

- Авторефераты диссертаций ..... 310
- Новые книги о транспорте ..... 314
- Экспресс-информация ..... 46, 79, 282

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](mailto:Info@bukivedi.com)

Ознакомиться с содержанием вышедших номеров можно на сайте научной электронной библиотеки [elibrary.ru](http://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.**

# T World of Transport and Transportation

•THEORY  
•HISTORY  
•ENGINEERING  
OF THE FUTURE

Vol. 17<sup>2019</sup>  
Iss. 4

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

**Nickolay 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)

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

**Tran Duc 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

*Oleg G. KRASNOV*

Technique to Determine Integral Distribution of Forces Acting  
on the Railway Track ..... 14

*Boris A. LYOVIN, Victor Ya. TSVETKOV, Yury V. DZYUBA*

Subsidiarity-Based Management and Control Systems for Railway ..... 29

*Anatoly A. ZAITSEV, Yana V. SOKOLOVA, Tatyana A. PANTINA*

Innovative Development of Transport System using  
Magnetic Levitation Technology ..... 41

### SCIENCE AND ENGINEERING

*Mikhail G. BOYARSHINOV, Nikita I. KUZNETSOV*

Thermal Regime of Automobile Exhaust System at Low Temperature ..... 58

*Taisiya V. SHEPITKO, Igor A. ARTYUSHENKO, Pavel G. DOLGOV*

Base Soil Reinforcement with Vertical Crushed Stone Columns  
in Cryolithozone. .... 74

*Andrey A. SHATOKHIN*

Virtual Sorting: Improving Organization of Moving  
and Processing of Empty Car Flows ..... 85

*Ivan P. STARSHOV, Valery A. KOBZEV,*

*Evgeny I. SYCHYOV*

Improving the Methodology for Calculating  
the Parameters of Hump Yards ..... 94

*Sergey M. KOVALYOV, Andrey V. SUKHANOV*

Implementation of Intelligent Monitoring for the Marshalling Yard ..... 105

### ECONOMICS

*Oksana D. POKROVSKAYA*

Digitalization, Informatization, Identification and Labeling of Logistics  
Facilities for the Purposes of Enhanced Customer Focusing ..... 125

*Georgy V. GOGRICIANI, Anton N. LYASHENKO*

Strategic Development of Oil Shipments from Russia to Palestine ..... 142

*Umidilla N. IBRAGIMOV, Mahmudjon M. TOKHIROV*

Development of Single and Externally  
Integrated Transport Area in Central Asia ..... 158

*Lyudmila N. BUYANOVA, Olga M. MUDROVA*

Logistics of Low-Tonnage LNG ..... 174

## 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. ZYLYOV**,  
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.

## ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL

- Maxim A. KUDRYASHOV, Radion S. AYRIEV, Georgiy M. OVNANYAN*  
Cluster Analysis of the Routes of the New Management Model  
for Surface Urban Passenger Mass Transit ..... 189  
*Dmitry G. MOROZ, Danila V. DOLENKO, Alexander V. PROKOPENKOV*  
Analysis of Methods for Determining the Optimal Number  
of Taxi Cars in Megacities ..... 202  
*Victor A. SHAROV, Almas A. TLEUKHANOV*  
Commercially Focused Dynamic Priorities in the Organisation  
of the Transit of Cargo Trains ..... 213  
*Nadezhda A. FILIPPOVA, Vladimir M. VLASOV, Vladimir M. BELYAEV*  
Navigation Control of Cargo Transportation in the North of Russia ..... 225  
*Valery V. BURCHENKOV*  
Decision Making Based on the Results of Automatic Diagnostics  
of Parts and Assemblies of Rolling Stock ..... 238  
*Maxim M. ZHELEZNOV, Oleg I. KARASYOV,*  
*Alexey V. BELOSHITSKY, Egor A. SHITOV*  
Innovative Railway Transport Ecosystem: Practice of Leading Companies ... 252

## SAFETY AND SECURITY

- Anatoliy A. SAFONOV, Vyacheslav A. DZHAKSBAEV*  
Simulation of Activities of Helicopter Flight Crews  
in Emergency Situations ..... 266  
*Vladimir N. BASKOV, Daria A. KRASNIKOVA, Ekaterina I. ISAEVA*  
Effect of Driver Behaviour on Traffic Jams ..... 277

## HISTORY WHEEL

- Nikolai D. GRIGORIEV*  
Boris S. Jacobi ..... 293  
News from the Archives.  
Human Resources Management: How It Was Organized 110 Years Ago .. 305

## BIBLIO-DIRECTIONS

- Abstracts of Ph.D. theses ..... 312  
New Books on Transport and Transportation ..... 315  
Express Information. .... 46, 79, 282

Published quarterly since 2003. Bimonthly since 2013.  
83 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](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.



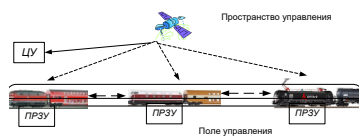


## ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ 6

Разные составы – разное воздействие на путь.  
Как вычислить интегральное распределение вертикальных и боковых сил?

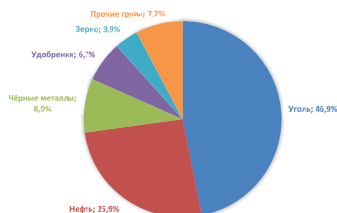
## ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 22

Субсидиарность – не только принцип, но и основа для практических решений.



## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТА 36

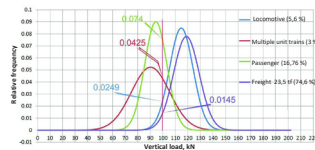
Стратегия транспорта должна включать развитие магнитолевитационных систем.



## ВОПРОСЫ ТЕОРИИ • THEORY

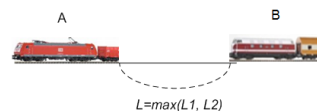
## RAILWAY TRACK 14

Train sets' impact on the track varies depending on different types of rolling stock.  
How can we calculate integral distribution of vertical and lateral forces?



## ENGINEERING SYSTEMS 29

Subsidiarity could not be reduced to a doctrine or a principle but should be implemented as a basis for decision-making and control models.



## NEW TECHNOLOGY AND THE DEVELOPMENT OF TRANSPORT AND TRANSPORTATION 41

Strategy of transport development should comprise advances in magnetic levitation systems.





## Методика определения интегрального распределения сил, действующих на путь



*Краснов Олег Геннадьевич — Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия\*.*

**Олег КРАСНОВ**

Необходимым условием внедрения тяжеловесного движения на железных дорогах мира является комплексная оценка его эффективности, включающая исследование влияния повышенных осевых нагрузок на деградацию элементов верхнего строения пути, деформационные параметры балластного слоя и нижнего строения пути и мероприятий по соответствующему усилению железнодорожной инфраструктуры. Необходимо достаточно точно учитывать силовые факторы, воздействующие на путь со стороны разных типов подвижного состава с различной осевой нагрузкой. Распределение силовых факторов для конкретного участка железнодорожного пути является многофакторным процессом, количественные параметры которого зависят от структуры поездопотока, типа подвижного состава и его доли в суточном пакете поездов, проходящем по данному участку, установленной скорости движения, профиля пути (прямая, кривая), технического состояния подвижного состава и элементов верхнего строения пути.

Целью работы явилась разработка методики определения интегрального закона распределения

вертикальных и боковых сил, действующих на путь от колёс разного типа подвижного состава в зависимости от его доли в суточном пакете поездопотока. Использовались методы математической статистики.

В процессе экспериментальных исследований воздействий разного типа подвижного состава определены статистические распределения вертикальных и боковых сил. Гистограммы вертикальных и боковых сил аппроксимированы теоретическими законами. Для подтверждения справедливости выбранных функций аппроксимации использовался критерий согласования Колмогорова–Смирнова. Для смешанного движения на железных дорогах разработана методика, позволяющая учитывать вклад доли каждого типа подвижного состава в силовое воздействие на путь при расчёте суммарного воздействия. Методика базируется на реальных, экспериментально установленных распределениях с учётом сезонности (зима, лето) вертикальных и боковых сил, скорости движения по рассматриваемому участку пути и может использоваться на участках, где внедряется тяжеловесное движение.

Ключевые слова: железная дорога, тяжеловесное движение, подвижной состав, повышенные осевые нагрузки, вертикальные и боковые силы, закон распределения, воздействие, путь.

\*Информация об авторе:

**Краснов Олег Геннадьевич** – кандидат технических наук, заведующий отделом пути и специального подвижного состава акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, [vnikti@ptl-kolomna.ru](mailto:vnikti@ptl-kolomna.ru).

Статья поступила в редакцию 25.04.2019, актуализирована 29.07.2019, принята к публикации 12.08.2019.

For the English text of the article please see p. 14.

Работа выполнена по проекту РФФИ 17-20-01-088/17.

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение тяжеловесного движения уже многие годы находится в центре внимания железных дорог мира в качестве одного из инструментов повышения эффективности грузовых железнодорожных перевозок. Действует неправительственная международная ассоциация тяжеловесного движения<sup>1</sup>, одной из задач которой является проведение научных исследований, призванных способствовать решению технологических проблем, связанных с развитием подвижного состава и инфраструктуры.

Во многих странах проводятся исследования, связанные с различными аспектами внедрения тяжеловесного движения. В частности, в работе [1] выполнены исследования динамического отклика железнодорожного пути от продольных сил, возникающих в тяжеловесных поездах в режимах торможения, и влияния вертикальных сил на продольные нагрузки в рельсах.

В [2] исследовано вертикальное смещение шпал, влияние давлений «вывешенных» шпал на балласт в зависимости от их положения при движении тяжеловесных поездов. Величины давлений на балласт и ускорений шпал определены в зависимости от их вертикального положения для случаев укладки георешётки и без неё. В работе [3] на 3D-модели тяжеловесного поезда исследовалось динамическое взаимодействие подвижного состава и пути с учётом продольных сил в поезде. Разработан метод повышения эффективности вычислений для сложных систем «тяжеловесный поезд—путь», определены основные принципы повышения точности расчётов. В работе [4] разработаны технические требования для элементов верхнего строения пути для условий эксплуатации тяжеловесного движения в пустыне Саудовской Аравии. Учитывались максимальные температуры, широкий диапазон перепада температур, ультрафиолетовое излучение, существенное перемещение песков от воздействия ветра.

В исследованиях [5] приведена методика расчёта срока службы элементов верхнего строения пути рассмотренной кон-

струкции для тяжеловесного движения на основании учёта деградации и суммарных деформаций пути на углевозной железной дороге в ЮАР. Прогнозируемый ресурс был рассчитан при эксплуатации подвижного состава с нагрузкой 26 т/ось на период 40 лет с суммарным пропущенным тоннажем 4000 млн тонн брутто и коэффициентом безопасности от 2,4 до 6,0.

В исследовании, представленном в [6], разработан метод диагностики воздействия железнодорожного подвижного состава на путь на основе измерения вертикального и горизонтально-поперечного ускорения рельсов. Представлен сравнительный анализ статистических параметров напряжений в рельсах и ускорений при прохождении маневровых локомотивов и полувагонов, который показал удовлетворительные результаты по определению давлений от колёс на рельсы.

В работе [7] представлены исследования проблемы моделирования случайного распределения неровностей на поверхности катания головки рельса. Описывается двухслойная модель, позволяющая рассматривать механические свойства конструктивных элементов пути и анализировать взаимодействие между рельсами и шпалами. Динамический отклик пути от прохождения поезда представлен для линейной и детерминистической модели.

Таким образом за рубежом при внедрении тяжеловесного движения проводятся обширные исследования по воздействию подвижного состава на путь.

В России для освоения прогнозных грузопотоков и снижения транспортных издержек Генеральной схемой развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период до 2020 и 2025 годов [8] предусматривается развитие на грузонапряжённых направлениях тяжеловесного движения. Одновременно в соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [9] поставлена задача доведения технического и технологического уровня инфраструктуры, сферы её содержания и ремонта до лучших мировых стандартов. Организация тяжеловесного движения путём использования вагонов с повышенной осевой нагрузкой формирует технологическую эффективность, которая выражается в вы-

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]: <https://ihha.net/>.





свобождении пропускной способности направлений сети и, как следствие, даёт возможность осуществления дополнительных перевозок массовых грузов.

Однако процесс внедрения подвижного состава с увеличением осевой нагрузки требует проведения дополнительных исследований для оценки влияния повышенных осевых нагрузок на деградацию элементов верхнего строения пути, деформационные параметры балластного слоя и нижнего строения пути. При формировании комплексной оценки эффективности тяжеловесного движения необходимо учитывать требуемые мероприятия по усилению железнодорожной инфраструктуры, что можно сделать при достаточно точном учёте силовых факторов, воздействующих на путь со стороны разных типов подвижного состава и их осевых нагрузок.

Распределение силовых факторов для конкретного участка железнодорожного пути является многофакторным процессом, количественные параметры которого зависят от структуры поездопотока, типа подвижного состава и его доли в суточном пакете поездов, проходящем по данному участку, установленной скорости движения, профиля пути (прямая, кривая), технического состояния подвижного состава и элементов верхнего строения пути.

Целью работы является разработка алгоритма определения интегрального закона распределения вертикальных и боковых сил от разного подвижного состава для произвольного участка.

Для теоретических разработок использовались *методы* математической статистики и теории вероятностей [10, 11]. В отличие от Методики [12], где воздействие определяется расчётным путём, для получения количественных параметров интегрального распределения вертикальных и боковых сил предложено использовать результаты экспериментальных исследований по воздействию разных типов подвижного состава на путь, в том числе от грузовых поездов, сформированных из вагонов с осевыми нагрузками 23,3, 25, 27 тс, пассажирских, высокоскоростных поездов, моторвагонного и других видов подвижного состава, проведённых учёными ВНИКТИ и ВНИИЖТ и представленных в трудах [13–18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИЛ

Принимаются следующие допущения:

- суточный пакет поездов, а также уровень их технического состояния принимаются одинаковыми в течение длительного срока;
- климатические условия распределяются на две составляющие — зима и лето. Соответственно, они определяют разницу силового воздействия из-за изменения жёсткости пути.

С учётом принятых допущений интегральное распределение вертикальных сил может быть определено в следующей последовательности.

На основании значительного количества экспериментальных исследований по воздействию грузовых, пассажирских, высокоскоростных поездов, моторвагонного подвижного состава на железнодорожный путь установлено, что по критерию согласования Колмогорова—Смирнова распределение от вертикальных сил, полученное от воздействия поездов, сформированных из однородных вагонов с близкими осевыми нагрузками, локомотивов, моторвагонного подвижного состава, достаточно хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения.

Плотность распределения вероятностей вертикальных сил определяется по нормальному закону:

$$f(F_i) = \frac{1}{\sigma_{F_i} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_i - \bar{m}_{F_i})^2}{2\sigma_{F_i}^2}},$$

где  $F_i$  — текущее значение вертикальной силы;  
 $\bar{m}_{F_i}$  — математическое ожидание ансамбля вертикальных сил;

$\sigma_{F_i}$  — среднеквадратическое отклонение ансамбля вертикальных сил.

Распределение вертикальных сил (при учёте вертикальных сил ударного характера) от грузовых поездов, сформированных из разнородных вагонов с разными осевыми нагрузками (порожние, малонагружённые и полнонагружённые), более точно описывается логарифмическим нормальным законом.

Плотность распределения вероятностей случайной величины, логарифм которой определяется по нормальному закону, описывается соотношением:



$$f(F_i) = \frac{1}{\sigma_{F_i} F_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\ln(F_i - \bar{m}_{F_i})}{2\sigma_{F_i}^2} \right\},$$

где  $F_i$  — текущее значение вертикальной силы;  
 $\sigma_{F_i}$  — среднее квадратическое отклонение вертикальных сил;

$\bar{m}_{F_i}$  — математическое ожидание вертикальных сил.

При наличии в составе поездов гружёных и порожних вагонов распределение представляет суперпозицию законов распределения вероятностей вертикальных или боковых сил, определённых по экспериментальным статистическим данным со своими математическими ожиданиями и среднее квадратическими отклонениями.

Выражение для интегральной частоты вертикальной силы  $F_i$  от разных типов подвижного состава  $k_1, k_2, \dots, k_j$ , участвующих в формировании закона распределения частот для сил  $F_i$ , можно записать в виде:

$$F_1 \rightarrow P_1^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_1}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_1}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_1}^{k_j};$$

$$F_2 \rightarrow P_2^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_2}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_2}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_2}^{k_j};$$

$$F_i \rightarrow P_i^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_i}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_i}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_i}^{k_j},$$

где  $P_1^\Sigma, P_2^\Sigma, \dots, P_i^\Sigma$  — интегральные частоты вертикальных сил  $F_1, F_2, \dots, F_i$  от суточного пакета поездов;

$P_{F_i}^{k_1}, P_{F_i}^{k_2}, \dots, P_{F_i}^{k_j}$  — частоты вертикальных

сил  $F_i$  от конкретного типа подвижного состава  $k_1, k_2, \dots, k_j$  (статистические характеристики частот для вертикальных сил должны быть экспериментально установлены отдельно для каждого типа подвижного состава);

$k_j$  — тип подвижного состава, курсирующий на данном участке ( $k_1$  — локомотивы);

$k_2$  — грузовые поезда из полногружёных вагонов с нагрузкой до 23,5 тс/ось на тележках 18–100;

$k_3$  — грузовые поезда из малогружёных вагонов на тележках 18–100;

$k_4$  — грузовые поезда из инновационных вагонов с осевой нагрузкой 25 тс/ось;

$k_5$  — грузовые поезда инновационных вагонов с нагрузкой 27 тс/ось;

$k_6$  — пассажирские поезда;

$k_7$  — скоростные пассажирские поезда («Невский экспресс» и др.);

$k_8$  — высокоскоростные поезда («Сапсан»);

$k_9$  — моторвагонный подвижной состав;

$\gamma_{k_1}, \gamma_{k_2}, \dots, \gamma_{k_j}$  — доля  $k_j$  подвижного состава,

курсирующего в суточном пакете поездов,  $\gamma_{k_1} + \gamma_{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} = 1$ ;

$F_1, F_2, \dots, F_i$  — вертикальные силы в законе статистического распределения вертикальных сил с шагом  $\Delta F_i$ .

Для определения интегрального закона распределения необходимо учитывать фактически установленные скорости движения и климатические условия эксплуатации.

Для случая, когда установленные скорости подвижного состава занимают промежуточное положение между скоростями  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$ , для которых определены статистические параметры законов распределения, требуется выполнить дополнительный расчёт  $\bar{m}_{F_\phi}$  и  $\bar{\sigma}_{F_\phi}$  для фактически установленной скорости  $V_\phi$ .

Если допустить, что значения математического ожидания и среднее квадратическое отклонения линейно изменяются с повышением скорости, то для фактически установленной скорости движения  $V_\phi$  величина математического ожидания определится как:

$$\bar{m}_{F_\phi} = m_{F_{\min}} + \Delta \bar{m}_F \cdot \frac{V_\phi - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

где  $\bar{m}_{F_\phi}$  — математическое ожидание вертикальных сил для фактически установленной скорости  $V_\phi$  на рассматриваемом участке;

$\Delta \bar{m}_F = \bar{m}_{F_{\max}} - \bar{m}_{F_{\min}}$  — изменение значения

математического ожидания вертикальных сил при повышении скорости с  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ .

Величина среднее квадратического отклонения определяется аналогично:

$$\bar{\sigma}_{F_\phi} = \sigma_{F_{\min}} + \Delta \bar{\sigma}_F \cdot \frac{V_\phi - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

где  $\bar{\sigma}_{F_\phi}$  — среднее квадратическое отклонение вертикальных сил для фактически установленной скорости  $V_\phi$  на рассматриваемом участке;

$\Delta \bar{\sigma}_F = \bar{\sigma}_{F_{\max}} - \bar{\sigma}_{F_{\min}}$  — изменение значения

среднее квадратического отклонения вертикальных сил при повышении скорости с  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ .

Для уточнённых значений  $\bar{m}_{F_\phi}, \bar{\sigma}_{F_\phi}$ , характерных для установленной скорости движения поездов, строятся законы распределения вертикальных сил для каждого типа подвижного состава, участвующего в суточном пакете поездов, и определяется интегральный закон распределения вертикальных сил для фактической скорости  $V_\phi$ .





Для учёта климатических условий с учётом продолжительности летнего и зимнего периодов, принимая период эксплуатации участка железнодорожного пути для летних условий за  $l$ , а для эксплуатации в зимних условиях за  $z$ , определяются интегральные распределения для летнего и зимнего периодов эксплуатации участка:

$$P_{i,l}^v \rightarrow f(F_i);$$

$$P_{i,zv}^v \rightarrow f(F_i).$$

Тогда для конкретного значения вертикальной силы  $F_i$  интегральная частота определяется как  $F_i \rightarrow P_{i,l+z}^v = \alpha P_{i,l}^v + \beta P_{i,z}^v$ , где  $P_{i,l+z}^v$  — интегральная частота для всех типов подвижного состава, проходящего по рассматриваемому участку в течение года, с учётом установленной скорости движения и климатических условий «зима—лето».

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БОКОВЫХ СИЛ

Для определения интегрального закона распределения боковых сил будем использовать методические подходы, которые были применены для определения интегрального закона распределения для вертикальных сил.

Характер нагружения рельсов железнодорожного пути в кривых участках пути имеет особенности, которые определяются радиусами кривых, скоростями движения и величинами возвышений наружного рельса над внутренним, поэтому при определении интегрального закона распределения необходимо учитывать указанные особенности.

Интегральная частота от разных типов подвижного состава  $k_j$ , например, для боковой силы  $H_{b0}$  с учётом количества  $j$  типов подвижного состава, которые оказывают влияние на формирование интегральной частоты боковой силы, определяется как:

$$H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^v = \sum_{j=1}^{k_j} \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b0}}^{k_j}$$

или в развёрнутом виде:

$$H_{b1} \rightarrow P_{H_{b1}}^v = \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b1}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b1}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b1}}^{k_j};$$

$$H_{b2} \rightarrow P_{H_{b2}}^v = \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b2}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b2}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b2}}^{k_j};$$

$$H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^v = \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b0}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b0}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b0}}^{k_j},$$

где  $\gamma_{k_j}^{k_j}$  — доля типов подвижного состава  $k_j$ , участвующих в суточном пакете поездов;

$k_j$  — тип подвижного состава;

$H_{b1}, H_{b2}, \dots, H_{b0}$  — значения боковых сил;

$P_{H_{b0}}^{k_1} \dots P_{H_{b0}}^{k_j}$  — частоты боковых сил от  $k_j$  подвижного состава;

$P_{H_{b0}}^v$  — интегральная частота для боковой

силы  $H_{b0}$ , сформированная от разных типов подвижного состава  $k_j$ , участвующих в формировании боковой силы  $H_{b0}$ , с учётом их количества;

$P_{H_{b0}}^{H_{b0}}$  — частота воздействия на путь; опре-

деляется из плотностей распределения боковых сил по теоретическим законам распределения с учётом экспериментально установленных статистических параметров, доли каждого типа подвижного состава  $k_j$ , определяющего формирование боковой силы  $H_{b0}$ .

При попадании исходных данных в промежуточное положение между экспериментально установленными значениями параметров  $\bar{m}_{H_b}$  и  $\bar{\sigma}_{H_b}$  для скоростей  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$  частоты интегрального распределения боковой силы  $H_{b0}$  определяются методами линейной интерполяции (аналогично тому, как это делается для вертикальных сил при определении интегрального закона распределения вертикальных сил). Здесь  $\bar{m}_{H_b}$  и  $\bar{\sigma}_{H_b}$  — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение боковых сил, определённых экспериментально для кривых конкретного радиуса, установленной скорости, для наружного и внутреннего рельсов, возвышения наружного рельса над внутренним, для летних и зимних условий эксплуатации.

При этом особенно важно увязать плотность распределения боковых сил по наружному и внутреннему рельсам со скоростью движения и возвышением. В развёрнутом виде выражение для определения интегральных частот для соответствующих им боковых сил может быть записано в виде:

$$H_{b1} \rightarrow P_{H_{b1}}^v;$$

$$H_{b2} \rightarrow P_{H_{b2}}^v;$$

$$H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^v.$$

Далее строятся интегральные плотности распределения для боковых сил от суточного пакета поездов, проходящих по данному участку.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И БОКОВЫХ СИЛ

На основании установленных экспериментальных распределений вертикальных и боковых сил от типов подвижного состава, их статистических параметров разработана методика определения интегрального закона их распределения в зависимости от структуры поездопотока, установленной скорости движения, профиля пути, климатических условий.

В качестве примера рассчитаем интегральный закон распределения вертикальных сил на прямом участке перегона Голутвин–Подлипки Московской железной дороги, 2-й главный путь. Известно, что на участке установлена скорость движения  $V_{уст} = 80$  км/ч.

По данным технического отдела Голутвинской дистанции пути: путь – 1-го класса, группа – особогрузонапряжённая, код группы – О, грузонапряжённость по перегону 106,8 млн т брутто, количество пассажирских поездов – 46, грузовых – 78, моторвагонный подвижной состав 11.

Рассчитаем долю по типам подвижного состава  $\gamma^{k_i}$  пропорционально количеству колёсных пар.

Количество колёсных пар определялось исходя из следующих соображений – вес грузовых поездов 3600...4000 тс при весе гружёных грузовых вагонов 94 тс.

Грузовой поезд весом 4000 тс в среднем состоит из 42 вагонов, тогда для четырёхосных вагонов количество колёсных пар в одном поезде составит 170 шт., а для 78 грузовых поездов – 13260 шт.

Суммарное количество локомотивов определялось суммированием от грузовых и пассажирских поездов  $\Sigma_{л} = 78 + 46 = 124$ . Для расчётов рассматриваем двухсекционные электровазсы с двумя двухосными тележками в каждой секции и количеством колёсных пар в локомотиве, равном 8, тогда суммарное количество определится как  $8 \cdot 124 = 992$  колёсных пар.

Количество вагонов в пассажирских поездах принимаем равным 16 единицам, тогда суммарное количество колёсных пар пассажирских поездов:  $46 \cdot 16 \cdot 4 = 2944$  к.п.

Количество колёс моторвагонного подвижного состава:  $4 \cdot 11 \cdot 12 = 528$  к.п.

Суммарное количество колёсных пар, проходящих по рассматриваемому участку за сутки:

$$\Sigma k_j = 13260 + 992 + 2944 + 528 = 17724.$$

При этом набор элементов множества  $k_j$  следующий:

$$k_1 = 992, k_2 = 13260, k_3 = 0, k_4 = 0, k_5 = 0, k_6 = 2944, k_7 = 0, k_8 = 0, k_9 = 528.$$

Доля каждого типа подвижного состава в общем поездопотоке составляет:

- доля локомотивов:

$$\gamma_{11}^{k_1} = \frac{k_1}{k_1 + k_2 + k_3 + k_6 + k_9} = \frac{992}{992 + 13260 + 2944 + 528} = \frac{992}{17724} = 0,056;$$

- доля грузовых вагонов:

$$\gamma_{12}^{k_2} = \frac{13260}{17724} = 0,747;$$

- доля пассажирских вагонов:

$$\gamma_{16}^{k_6} = \frac{2944}{17724} = 0,167;$$

- доля моторвагонного подвижного состава:

$$\gamma_{19}^{k_9} = \frac{528}{17724} = 0,03.$$

Для построения функции распределения и плотности вероятности вертикальных сил на данном участке пути определяем функции плотности распределения для каждого типа подвижного состава для летних и зимних условий эксплуатации:

$$P_i^{\Sigma} = \gamma^{k_1} \cdot P_{F_i}^{k_1} + \gamma^{k_2} \cdot P_{F_i}^{k_2} + \gamma^{k_6} \cdot P_{F_i}^{k_6} + \gamma^{k_9} \cdot P_{F_i}^{k_9}.$$

Для построения функции распределения вертикальных сил на данном участке определим функции плотности распределения с учётом доли каждого типа подвижного состава для летних и зимних климатических условий.

Для построения интегральной функции необходимо для каждой точки по оси абсцисс взять сечение и просуммировать значения изображённых на рис. 1 функций с учётом коэффициентов  $k$ , отображающих долю подвижного состава в общем поездопотоке на этом участке.

Пример суммирования для вертикальной силы  $F_i = 100$  кН показан на рис. 1.

Через точку  $F_i = 100$  кН проведём вертикальную линию, и в точках пересечения с графиками распределений вертикальных сил для разного подвижного состава определим частоты появления силы  $F_i = 100$  кН с учётом доли воздействия на путь разного подвижного состава. Получив исходные данные по каждому



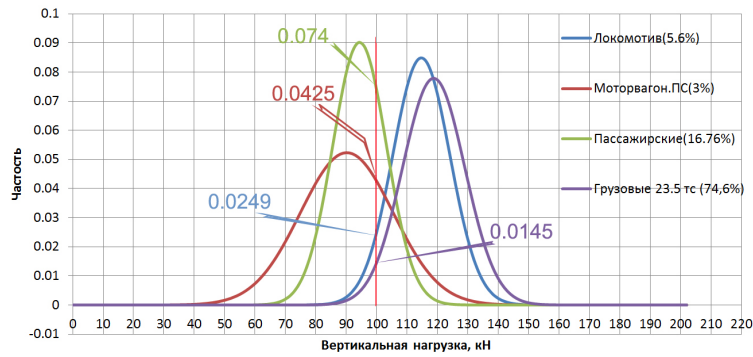


Рис. 1. Исходные данные для расчёта интегральной частоты для вертикальной силы  $F_i = 100$  кН (летний период).

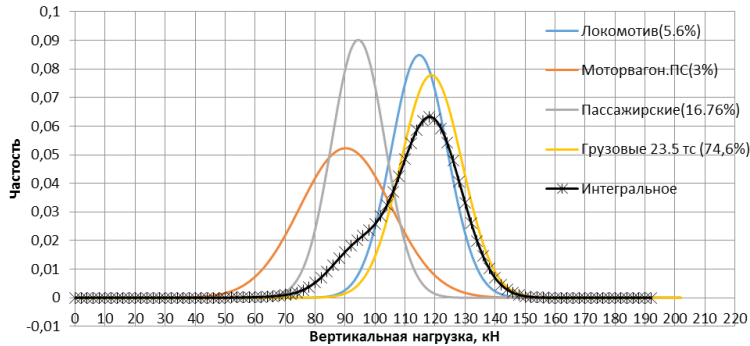


Рис. 2. Интегральный закон распределения вертикальных сил, действующих на рельсы от суточного пакета поездов с учётом летнего и зимнего периодов эксплуатации.

типу подвижного состава, определим величину интегральной частоты для силы  $F_i$  как:  
 $P_{\text{л}}^{100} = 0,056 \cdot 0,0249 + 0,747 \cdot 0,0145 + 0,03 \cdot 0,0425 + 0,167 \cdot 0,074 = 0,0262$ .

Аналогичные операции выполняются для каждой вертикальной силы  $F_i$  с выбранным шагом (в данной работе шаг принят 10 кН). Для автоматизации данного процесса разработана специальная программа. В итоге проведения расчёта получится набор интегральных частот для последовательных вертикальных сил, которые используются для построения интегрального закона распределения для летнего периода.

По аналогичному алгоритму определяем интегральный закон распределения плотности вероятности вертикальных сил для зимнего периода.

В итоге получится набор значений для построения интегральной функции для летнего и зимнего периода. В связи с различием в уровнях силового воздействия в системе «колесо–рельс» в летний и зимний периоды из-за разной жёсткости пути введены коэффициенты времени года. Для средней полосы принято, что в летних условиях путь работает  $0,6 T_r$ , в зимних  $0,4 T_r$ , где  $T_r$  – годового периода.

Для полученных наборов значений необходимо выполнить суммирование в соответствии с коэффициентом времени года (для летнего периода – 0,6; для зимнего – 0,4).

Суммарный  $P^{\Sigma} = 0,6 \cdot P_{\text{л}} + 0,4 \cdot P_{\text{з}}$ , например, для  $F_i = 100$  кН:

$$P^{\Sigma} = 0,6 \cdot P_{\text{л}}^{100} + 0,4 \cdot P_{\text{з}}^{100} \cdot 0,6 = 0,0262 + 0,4 \cdot 0,025011 = 0,0257244.$$

В результате расчётов получен интегральный закон распределения вертикальных сил на перегоне, который показан на рис. 2.

Анализ построенного интегрального закона распределения показал:

– полученная плотность распределения вертикальных сил позволит проводить расчёты на прочность элементов верхнего строения пути от доли типов подвижного состава участвующего в поездопотоке, в том числе на контактно-усталостную долговечность рельсов с учётом доли грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками;

– просматривается подобие итогового распределения к распределению от подвижного состава, доля которого наибольшая в поездопотоке. Для рассмотренного случая это распределение от грузовых вагонов;



— учёт пассажирских поездов и моторвагонного подвижного состава вносит изменения в форму распределения от грузовых вагонов, повышая значения частот для вертикальных сил этих типов подвижного состава.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Разработанная методика позволяет определять суммарное воздействие на рельсы и верхнее строение пути с учётом доли каждого типа подвижного состава, установленной скорости движения, климатических условий эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для внедрения на железных дорогах технологии тяжеловесного движения с целью более точного учёта силового воздействия на путь со стороны разных типов подвижного состава, в том числе грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками, разработана методика определения интегральных законов распределения вертикальных и боковых сил.

2. Методика позволяет учитывать воздействие от разного типа подвижного состава с учётом конструкции ходовых частей и величины осевых нагрузок, скорости движения, жёсткости подрельсового основания от сезонности (лето, зима), поперечного профиля пути, долю каждого типа подвижного состава в суммарном воздействии на путь.

3. Определённые по представленной методике интегральные распределения вертикальных и боковых сил позволят проводить расчёты на прочность элементов верхнего строения пути в вероятностном аспекте от доли типов подвижного состава, участвующего в движении на конкретном перегоне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Czyczuła W., Chudyba Ł. Dynamic response of rail track in longitudinal direction // *Transportation Overview [Przegląd Komunikacyjny]*. — No. 7. — July 2018. — pp. 1–9. — DOI: 10.35117/A\_ENG\_18\_07\_01.
2. Askarinejad H., Barati P., Dhanasekar M., Gallage C. Field studies on sleeper deflection and ballast pressure in heavy haul track // *Australian Journal of Structural Engineering*. — Vol. 19. — Iss. 2. — March 2018. — pp. 1–9. — DOI: 10.1080/13287982.2018.1444335.
3. Pengfei Liu, Wanming Zhai, Kaiyun Wang. Establishment and verification of three-dimensional dynamic model for heavy-haul train-track coupled system // *Vehicle System Dynamics (International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility)*. — Vol. 54. — Iss. 11. — August 2016. — pp. 1511–1537. — DOI: 10.1080/00423114.2016.1213862.
4. Rhodes D. Technical Standards for Heavy Haul Track Components in the Middle East // 9<sup>th</sup> International Heavy Haul Conference. — 2009. — pp. 993–997. —

[Электронный ресурс]: <http://railknowledgebank.com/Presto/content/GetDoc.axd?ctID=MTk4MTRjNDU0NzQ0My00OTBmLTllYWU0ZWZjM2U0TE0ZDY3&rlD=MjYyOA==&pID=NzIx&attchmnt=VHJlZQ==&uSesDM=False&rlIdx=MjE5MQ==&rCFU=>. Доступ 29.07.2019.

5. Gräbe H., Shaw F. J. Design life prediction of a heavy haul track foundation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. — 2010. — Vol. 224. — Iss. 5. — pp. 337–344. — DOI: 10.1243/09544097JRR371.

6. Gerlici J., Nozhenko O., Cherniak G., Gorbunov M., Domin R., Lack T. The development of diagnostics methodological principles of the railway rolling stock on the basis of the analysis of dynamic vibration processes of the rail. — *MATEC Web of Conferences* 157, 03007. — January 2018. — DOI: 10.1051/mateconf/201815703007.

7. Koziol P., Kudla D. Vertical vibrations of rail track generated by random irregularities of rail head rolling surface. — *Journal of Physics: Conference Series*. — *Modern Practice in Stress and Vibration Analysis (MPSVA)* 2018. — 1106 012007. — DOI: 10.1088/1742-6596/1106/1/012007.

8. Об актуализации основных параметров генеральной схемы развития сети железных дорог РЖД до 2020 и 2025 гг. в региональном разрезе. — Заседание НТС ОАО «РЖД» от 16.03.2016 г. [Электронный ресурс]: [http://www.rzd.ru/best/public/ru?STRUCTURE\\_ID=886&layer\\_id=5176&refererLayerId=5175&id=354](http://www.rzd.ru/best/public/ru?STRUCTURE_ID=886&layer_id=5176&refererLayerId=5175&id=354). Доступ 12.08.2019.

9. Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. [Электронный ресурс]: <https://www.mintrans.ru/documents/1/1010>. Доступ 29.07.2019.

10. Виленкин С. Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. — М.: Энергия, 1979. — 210 с.

11. Андерсен Т. Статистический анализ временных рядов. — М.: Мир, 1976. — 767 с.

12. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надёжности: ЦПТ-52. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 г. № 2706р. [Электронный ресурс]: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=713998&dst=4294967295&date=18.10.2019>. Доступ 29.07.2019.

13. Коссов В. С., Лунин А. А. Исследования продольной динамики и воздействия на путь соединённых поездов массой 12600 т // *Тяжёлое машиностроение*. — 2016. — № 9. — С. 21–26.

14. Коссов В. С. Результаты экспериментальных и теоретических исследований воздействия подвижного состава на путь в перспективных условиях эксплуатации // *Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД»*. — 2013. — № 5. — С. 27–36.

15. Коссов В. С., Лунин А. А., Краснов О. Г., Спиров А. В. Оценка воздействия на путь грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5, 25 тс // *Железнодорожный транспорт*. — 2018. — № 3. — С. 63–68.

16. Коссов В. С., Лунин А. А., Краснов О. Г., Спиров А. В. Воздействие на путь грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками // *Путь и путевое хозяйство*. — 2018. — № 3. — С. 19–23.

17. Третьяков В. В., Петропавловская И. Б., Певзнер В. О., Громова Т. И. и др. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой // *Вестник ВНИИЖТ*. — 2016. — № 4. — С. 233–238.

18. Степов В. В. Эксплуатация вагонов с повышенной осевой нагрузкой на участке Ковдор–Мурманск // *Железнодорожный транспорт*. — 2016. — № 10. — С. 19–22.





# Technique to Determine Integral Distribution of Forces Acting on the Railway Track



*Krasnov Oleg G., Research, Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC VNIKT), Kolomna, Russia\*.*

**Oleg G. KRASNOV**

## ABSTRACT

A comprehensive assessment of the effectiveness of heavy-haul traffic is a prerequisite for its implementation in world railway sector. The assessment should include the study of the effect of increased axial loads on degradation of the elements of the track's superstructure, deformation parameters of the ballast layer and the track's substructure, and of measures intended to reinforce the railway infrastructure accordingly. It is necessary to consider rather accurately the force factors acting on the track and generated by different types of rolling stock with various axial loads. The distribution of force factors for a specific section of a railway track is a multifactorial process, the quantitative parameters of which depend on the structure of the train traffic flow, the type of rolling stock and its share in the total daily train traffic passing through this section, speed limits set for the section, track profile (straight line, curve), technical conditions of rolling stock and elements of the track superstructure.

The objective of the work was to develop a technique for determining the integral law of

distribution of vertical and lateral forces affecting the track and caused by wheels of different types of rolling stock, depending on the share of the operation of the respective types of rolling stock in the daily train traffic flow. Methods of mathematical statistics were used.

In the process of experimental studies of the effects of various types of rolling stock, the statistical distributions of vertical and lateral forces have been determined. The histograms of vertical and lateral forces have been approximated by theoretical laws. Kolmogorov–Smirnov fit criterion has been used to confirm goodness of chosen approximation functions. A technique has been developed for mixed freight and passenger railway traffic that allows to consider the contribution of the share of each type of rolling stock in the force impact on the track when calculating the total impact. The technique is based on real, experimentally established distributions of vertical and lateral forces, traffic speed at the considered section of the track with regard to seasonality (winter, summer), and can be used for the sections where heavyhaul traffic is being implemented.

**Keywords:** railway, heavy-haul traffic, rolling stock, high axle loading, vertical and lateral forces, distribution law, impact, track.

\*About the author:

**Krasnov Oleg G.** – Ph.D. (Eng.), head of the Track and special rolling stock department of the JSC Research, Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC VNIKT), Kolomna, Russia, [vnkti@ptl-kolomna.ru](mailto:vnkti@ptl-kolomna.ru).

Article received 25.04.2019, revised 29.07.2019, accepted 12.08.2019.

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

**The study has been made within the project of the Russian Foundation for Basic Research RFBR17-20-01-088/17.**

**Introduction.** The implementation of heavy-haul traffic has for many years been the pole of attention of world's railways as a tool to improve the efficiency of rail freight transportation. The activities of the non-governmental International Heavy Haul Association<sup>1</sup> include the objective to conduct research aimed at solving technological problems associated with development of rolling stock and infrastructure.

Research related to various aspects of introduction of heavy traffic is conducted in many countries. Particularly, the [1] studied the dynamic response of a railway track to longitudinal forces arising in heavy-haul trains in braking modes and the influence of vertical forces on longitudinal loads in rails.

The [2] studied the sleeper deflection (vertical displacement), influence of pressures of unsupported sleepers on ballast depending on their position during movement of heavy-haul trains. The pressure on ballast and acceleration of sleepers were determined depending on their vertical position for the cases when geogrids were used and the cases when they were not used. The [3] used the 3D model of a heavy-haul train to study the dynamic interaction of rolling stock and track with the account for longitudinal forces in the train. A technique to increase the efficiency of calculations for complex systems «heavy-haul train—track» has been developed, and the basic principles for increasing accuracy of calculations have been determined. The [4] contains technical specifications developed for elements of the track superstructure for operating conditions of heavy-haul traffic in the desert of Saudi Arabia, considering maximum temperatures, a wide range of temperature fluctuations, ultraviolet radiation, and significant movement of sand due to wind impact.

The study [5] develops the methodology for calculating the service life of elements of the track superstructure of a given design for heavy-haul traffic considering degradation and total track deformations on a coal railway in the Republic of South Africa. The predicted life resource is calculated during operation of rolling stock with a load of 26 ton/axle for a period of 40 years with a total processed tonnage of 4000

million tons gross and a safety factor varying from 2,4 to 6,0.

The research, presented in [6], developed a method for monitoring workloads of the existing rolling stock on the track structure that is based on measuring accelerations of the rails in the vertical and horizontal transverse directions. The comparative analysis of the statistical parameters of the stress of the rails and of acceleration during passing of the shunting locomotive and gondola cars showed satisfactory results in determining the pressure from wheels on rails.

The work [7] presents study of the problem of modelling of stochastically distributed rail imperfections on the surface of the rail head. The two-layer model described in this paper allows to consider mechanical properties of construction elements of rail track and to analyze interactions between rails and sleepers. The response of the rail track to the passing train was shown for linear and deterministic models.

Thus, the implementation of heavy-haul traffic is preceded by extensive studies on the effects of rolling stock on the track.

In Russia, the General Scheme for Development of Railways Network of JSC Russian Railways for the period up to 2020 and 2025 [8] provides for development of heavy-haul transportation at heavy traffic sections of the network to master forecast cargo flows and to reduce transport costs. At the same time, in accordance with the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030 [9], the task was set to ensure the compliance of technical and technological condition of the infrastructure, as well as of its maintenance, with the best world standards. The organization of heavy-haul traffic by using cars with increased axial load contributes to technological efficiency by increasing throughput of the given network sections, and results in grown capacity to transport additional volume of bulk cargo.

However, the process of introducing rolling stock with an increased axial load requires additional studies to assess the effect of increased axial loads on degradation of the elements of the track superstructure, deformation parameters of the ballast layer and of the substructure. While

<sup>1</sup> [Electronic resource]: <https://ihha.net/>.



developing the comprehensive assessment of the effectiveness of heavy-haul traffic, it is necessary to consider measures, necessary to reinforce the railway infrastructure, which in turn requires accurately considering force factors acting on the track and generated by different types of rolling stock with diversified axial loads.

The distribution of force factors for a specific section of a railway track is a multifactorial process, the quantitative parameters of which depend on the structure of the train traffic flow, the type of rolling stock and its share in the total daily train traffic passing through the section, speed limits set for the section, track profile (straight line, curve), technical conditions of rolling stock and elements of the track superstructure.

The study's *objective* is to develop an algorithm for determining the law of integral distribution of vertical and lateral forces generated by various types of rolling stocks at a random section of rail track.

Theoretical foundations were based on the *methods* of mathematical statistics and probability theory [10, 11]. Differently to the approach contained in the Methodology [12], where the impact is determined by calculation, to obtain quantitative parameters of the integral distribution of vertical and lateral forces, it is proposed to use the results of experimental studies on the impact of various types of rolling stock on the track, comprising effects of cargo trains formed with cars with axle loads of 23, 3, 25, 27 tf (tonne-force), of passenger, rapid trains, multiple unit trains, etc., obtained by the researchers of VNIKTI and of VNIIZhT [Russian Railway Research Institute] and presented in the works [13–18].

## Results

### Algorithm of determining integral law of distribution of vertical forces

The following assumptions are made:

- The daily set of trains as well as their technical condition are assumed to be similar for a long time;
- Climatic conditions are divided among two components, namely winter and summer periods, determining accordingly difference in force action due to changed rigidity of track.

Under the assumptions made, integral distribution of vertical forces can be determined in the following sequence.

Following multiple experimental researches on the impact of freight, passenger, high-speed, multiple unit trains on the track it was established that according to the Kolmogorov–Smirnov test (goodness of fit criterion), the distribution of vertical forces generated due to the action of the trains formed with uniform cars with axial loads with close values, locomotive engines, and multiple unit trains is quite correctly approximated by the normal (Gaussian) distribution law.

Vertical force distribution probability density is defined by the normal law:

$$f(F_i) = \frac{1}{\sigma_{F_i} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_i - \bar{m}_{F_i})^2}{2\sigma_{F_i}^2}},$$

where  $F_i$  is current value of vertical force;

$\bar{m}_{F_i}$  is expected value (mathematical

expectation) of the set of vertical forces;

$\sigma_{F_i}$  is root-mean-square deviation (RMSD,

or root-mean-square error, RMSE) of the set of vertical forces.

The density of distribution of vertical forces appearing due to the action of freight trains formed with different cars with various axial load (empty, low-loaded and full-loaded cars), considering also the vertical impact forces, can be more exactly described by the log-normal distribution law.

Distribution density of probability of random variable, whose logarithm is distributed by the normal law, is described by the following ratio:

$$f(F_i) = \frac{1}{\sigma_{F_i} F_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\ln^2 \left( \frac{F_i - \bar{m}_{F_i}}{2\sigma_{F_i}^2} \right)}{2\sigma_{F_i}^2} \right\},$$

where  $F_i$  is current value of vertical force;

$\sigma_{F_i}$  is root-mean-square deviation of

vertical forces;

$\bar{m}_{F_i}$  is expected value of vertical forces.

If there are *loaded and empty cars* in the trains, the distribution is a *superposition of the laws of distribution of probability of vertical and lateral forces determined with experimental*



statistical data, with relevant expected values and root-mean-square deviations.

Expression for integral relative frequency of vertical force  $F_i$  generated due to different types of rolling stock  $k_1, k_2, \dots, k_j$  which participate in forming the frequency distribution law for forces  $F_i$  can be written as follows:

$$F_1 \rightarrow P_1^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_1}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_1}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_1}^{k_j};$$

$$F_2 \rightarrow P_2^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_2}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_2}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_2}^{k_j};$$

$$F_i \rightarrow P_i^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_i}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_i}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_i}^{k_j},$$

where  $P_1^\Sigma, P_2^\Sigma, \dots, P_i^\Sigma$  are respective integral relative frequencies of vertical forces  $F_1, F_2, \dots, F_i$  generated by the daily set of trains;

$P_{F_1}^{k_1}, P_{F_1}^{k_2}, \dots, P_{F_i}^{k_j}$  are relative frequencies of

vertical forces  $F_i$  generated due to different types of rolling stock  $k_1, k_2, \dots, k_j$  (statistical features of relative frequencies of vertical forces should be experimentally identified separately for each type of rolling stock);

$k_j$  is the type of rolling stock running on this section ( $k_1$  is intended for locomotive engines);

$k_2$  designates freight trains with full-loaded cars under load of up to 23,5 tf/axle with bogies of type 18–100<sup>2</sup>;

$k_3$  designates freight trains with low-loaded cars with bogies of type 18–100;

$k_4$  designates freight trains with innovative cars with axial load of 25 tf/axle;

$k_5$  designates freight trains with innovative cars with axial load of 27 tf/axle;

$k_6$  designates passenger trains;

$k_7$  designates rapid passenger trains (*Nevsky express train*, etc.);

$k_8$  designates trains with higher speed (*Sapsan [peregrin falcon] train*);

$k_9$  designates multiple unit trains;

$\gamma_{k_1}, \gamma_{k_2}, \dots, \gamma_{k_j}$  are shares of rolling stock of  $k_j$

type running within the daily set of trains,  $\gamma_{k_1} + \gamma_{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} = 1$ ;

$F_1, F_2, \dots, F_i$  are vertical forces in the statistic partition of vertical forces with increment of  $\Delta F_i$ .

To define an integral distribution law, allowance should be made for authorized

running speed and climatic operation conditions.

In case if the authorized train speed (velocity) is within the intermediate interval between the velocity  $V_{\min}$  and the velocity  $V_{\max}$  for which the statistic parameters of distribution laws are defined, it is necessary to additionally calculate  $\bar{m}_{F_a}$  and  $\bar{\sigma}_{F_a}$  for currently authorized speed  $V_a$ .

If we assume that the expected values and root-mean-square deviation values vary linearly depending on increase in speed, then the expected value of actual speed  $V_a$  will be defined as follows:

$$\bar{m}_{F_a} = m_{F_{\min}} + \Delta \bar{m}_F \cdot \frac{V_a - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

where  $\bar{m}_{F_a}$  is expected value of vertical forces for actual authorized speed  $V_a$  at the relevant section;

$\Delta \bar{m}_F = \bar{m}_{F_{\max}} - \bar{m}_{F_{\min}}$  is change in the expected value of vertical forces depending on increase in velocity from  $V_{\min}$  to  $V_{\max}$ .

The root-mean-square deviation value is defined similarly:

$$\bar{\sigma}_{F_a} = \sigma_{F_{\min}} + \Delta \bar{\sigma}_F \cdot \frac{V_a - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

where  $\bar{\sigma}_{F_a}$  is root-mean-square deviation of vertical forces for actual authorized speed  $V_a$  at the relevant section;

$\Delta \bar{\sigma}_F = \bar{\sigma}_{F_{\max}} - \bar{\sigma}_{F_{\min}}$  is change in the root-mean-square deviation of vertical forces depending on increase in speed from  $V_{\min}$  to  $V_{\max}$ .

Considering the revised values  $\bar{m}_{F_a}, \bar{\sigma}_{F_a}$  typical of the authorized speed of trains, the vertical force distribution laws are developed for each type of rolling stock involved in the daily train traffic, and vertical force integral distribution law is developed for actual speed  $V_a$ .

Integral distributions for summer and winter operating periods of a section are defined to consider the climatic conditions and the duration of summer and winter periods. Operating period of track section in

<sup>2</sup> Model of bogies frequently used in Russia and other countries. See, e.g., <http://ukbv.ru/en/kontragentam/documentation/tracs/1932-18-100.html> — Ed. note.



summer is taken as  $s$  and operating period in winter is taken as  $w$ :

$$P_{is}^{\Sigma} \rightarrow f(F_i), \quad P_{iw}^{\Sigma} \rightarrow f(F_i).$$

Then for a specific value of vertical force  $F_i$  the integral relative frequency is defined as  $F_i \rightarrow P_{is+w}^{\Sigma} = \alpha P_{is}^{\Sigma} + \beta P_{iw}^{\Sigma}$ ,

where  $P_{is+w}^{\Sigma}$  is integral relative frequency for all types of rolling stock running on the relevant section during the year considering the authorized speed and climatic «winter–summer» conditions.

### Algorithm of integral distribution of lateral forces

To define the lateral force distribution law, we shall apply methodological approaches which have been used for defining the vertical force distribution law.

Rail loading (stress) condition for curved sections of rail track is defined by radius of curves, speed and values of canting of outer rail (its superelevation over the inner one), and those features should be considered when defining the distribution law.

Integral relative frequency for different types of rolling stock  $k_j$ , for example, for lateral force  $H_{b0}$  considering the quantity  $j$  of types of rolling stock which impact the integral relative frequency of lateral force is defined as:

$$H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^{\Sigma} = \sum_{j=1}^{k_j} \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b0}}^{k_j},$$

or, in expanded form as:

$$\begin{aligned} H_{b1} \rightarrow P_{H_{b1}}^{\Sigma} &= \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b1}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b1}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b1}}^{k_j}; \\ H_{b2} \rightarrow P_{H_{b2}}^{\Sigma} &= \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b2}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b2}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b2}}^{k_j}; \\ H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^{\Sigma} &= \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b0}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b0}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b0}}^{k_j}, \end{aligned}$$

where  $\gamma_j^{k_j}$  is share of types of rolling stock of  $k_j$  type involved in the daily train traffic;

$k_j$  is type of rolling stock;

$H_{b1}, H_{b2}, \dots, H_{b0}$  are values of lateral forces;

$P_{H_{b1}}^{k_1}, \dots, P_{H_{b0}}^{k_j}$  are relative frequencies of lateral

forces generated by rolling stock of  $k_j$  type;

$P_{H_{b0}}^{\Sigma}$  is integral relative frequency of lateral

force  $H_{b0}$  generated by different types of rolling stock of  $k_j$  type generating the lateral force  $H_{b0}$  with the account for their quantity;

$P_j^{H_{b0}}$  is track impact relative frequency; it is defined from the lateral force distribution

density by theoretical distribution laws using the experimentally deduced statistic parameters and basing on a share of each type of  $k_j$  rolling stock generating a lateral force  $H_{b0}$ .

When the input data get in the intermediate position in between the experimentally deduced parameters  $\bar{m}_{H_b}$  and  $\bar{\sigma}_{H_b}$  for speed  $V_{\min}$  and speed  $V_{\max}$ , integral distribution relative frequencies of lateral force  $H_{b0}$  are defined by the linear interpolation method (similarly to the case of vertical forces when defining the integral distribution of vertical forces). Here  $\bar{m}_{H_b}$  and  $\bar{\sigma}_{H_b}$  are expected values and root-mean-square deviations of lateral forces experimentally deduced for the curves with specific radius, authorized speed, outer and inner rails, superelevation of the outer rail, summer and winter operating conditions.

Besides, it is very important to correlate density of distribution of lateral forces throughout the outer and inner rails with the speed and superelevation.

Expression for integral relative frequencies of lateral forces can be written in expanded form as follows:

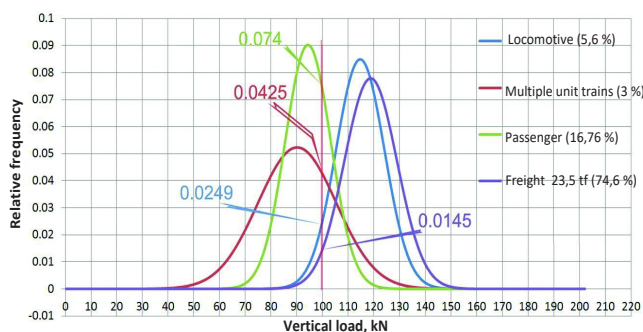
$$\begin{aligned} H_{b1} &\rightarrow P_{H_{b1}}^{\Sigma}; \\ H_{b2} &\rightarrow P_{H_{b2}}^{\Sigma}; \\ H_{b0} &\rightarrow P_{H_{b0}}^{\Sigma}. \end{aligned}$$

Then the integral densities of distribution of lateral forces generated by the daily set of trains running through this section shall be defined.

### Technique to determine integral distribution of vertical and lateral forces

Based on the experimentally defined distributions of vertical and lateral forces generated by different types of rolling stock, their statistic parameters, a technique has been developed to determine an integral vertical and lateral forces distribution depending on the structure of train flow, actual speed, railway track profile and climatic conditions.

Let us by way of illustration determine an integral distribution of vertical forces within the straight station-to-station block section between Golutvin and Podlipki stations of Moscow railway [a branch of Russian Railways] for the 2<sup>nd</sup> main track. It is known



**Pic. 1. Input data for calculation of integral relative frequency of vertical force  $F_v = 100$  kN (summer period).**

that at that block section the authorized speed is  $V_a = 80$  km/h.

According to the data of the technical unit of Golutvin track maintenance division, the track is of the class I, the block section belongs to the group of extremely heavy loaded sections (group code is O [EHL]), workload is of 106,8 mln t gross, daily number of passenger trains is 46, number of freight trains is 78, number of multiple unit trains is 11.

Let's calculate the shares of types of rolling stock  $\gamma^{k_i}$  in proportion to the amount of wheelsets.

The total number of wheelsets has been defined following the assumptions that the weight of goods trains was of 3600...4000 tf, and the weight of loaded freight cars was of 94 tf.

The freight train weighing 4000 tf contains on average 42 cars, so the four-axle rail cars of the train have 170 wheelsets, and 78 freight trains will have 13260 wheelsets.

The total number of locomotives has been calculated by summing the numbers of freight and passenger trains  $\Sigma_l = 78 + 46 = 124$ . For calculation we refer to twin-unit electric locomotives with two two-axle bogies per each unit and 8 wheelsets per locomotive. Subsequently the sum of wheelsets will be calculated as  $8 \cdot 124 = 992$ .

The number of cars in the passenger trains is assumed to be 16. Subsequently the sum of wheelsets of passenger trains will be calculated as  $46 \cdot 16 \cdot 4 = 2944$ .

The number of wheelsets of multiple unit trains is  $4 \cdot 11 \cdot 12 = 528$ .

So, the total number of wheelsets running through the considered block section per day is as follows:

$$\Sigma k_j = 13260 + 992 + 2944 + 528 = 17724.$$

The  $k_j$  set of elements is as follows:

$$k_1 = 992, k_2 = 13260, k_3 = 0, k_4 = 0, k_5 = 0, k_6 = 2944, k_7 = 0, k_8 = 0, k_9 = 528.$$

The share of each type of the rolling stock in the total train flow is as follows:

- share of locomotives:

$$\gamma_{11}^{k_1} = \frac{k_1}{k_1 + k_2 + k_3 + k_6 + k_9} = \frac{992}{992 + 13260 + 2944 + 528} = \frac{992}{17724} = 0,056;$$

- share of freight trains:

$$\gamma_{12}^{k_2} = \frac{13260}{17724} = 0,747;$$

- share of passenger trains:

$$\gamma_{16}^{k_6} = \frac{2944}{17724} = 0,167;$$

- share of multiple unit trains:

$$\gamma_{19}^{k_9} = \frac{528}{17724} = 0,03.$$

To build probability distribution and probability density function for vertical forces at this block section we determine the density distribution function for each type of rolling stock for summer and winter operating conditions:

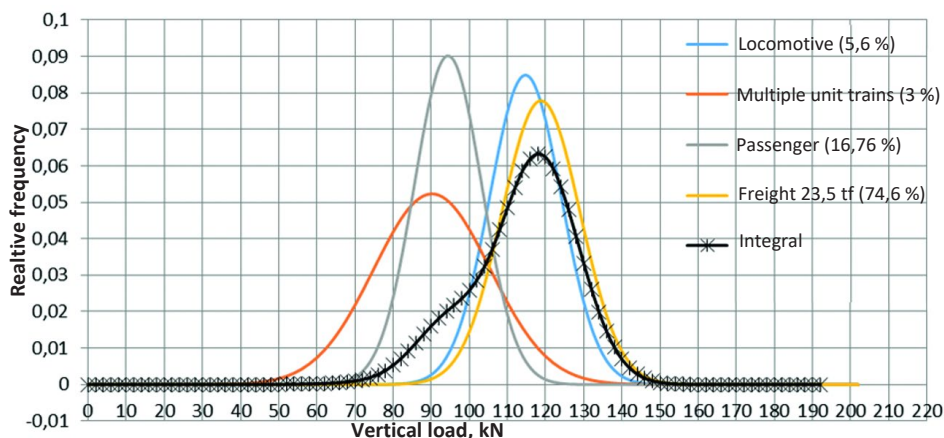
$$P_i^{\Sigma} = \gamma^{k_1} \cdot P_{F_i}^{k_1} + \gamma^{k_2} \cdot P_{F_i}^{k_2} + \gamma^{k_6} \cdot P_{F_i}^{k_6} + \gamma^{k_9} \cdot P_{F_i}^{k_9}.$$

To build vertical forces distribution function at this block section we determine the distribution density functions considering the share of each type of rolling stock for summer and winter conditions.

To build integral function it is necessary to take a cross-section for each point along X-axis and to sum the values of functions shown in Pic. 1 regarding the coefficients  $k$  representing a share of respective type of rolling stock in the total train flow through this section.

Summation example for vertical forces  $F_i = 100$  kN is shown in Pic. 1.





**Pic. 2. Integral distribution of vertical forces acting on the rails due to daily set of trains with due account for summer and winter operating periods.**

Let's draw a vertical line through point  $F_i = 100$  kN and define the relative frequency of force  $F_i = 100$  kN at the points of its intersection with graphs of distribution of vertical forces for different types of rolling stock with due account for a share of the impact of different types of rolling stocks on the track. After obtaining initial data for each type of rolling stock, we shall determine the value of integral relative frequency for the force  $F_i$  as follows:

$$P_s^{100} = 0,056 \cdot 0,0249 + 0,747 \cdot 0,0145 + 0,03 \cdot 0,0425 + 0,167 \cdot 0,074 = 0,0262.$$

Similar operations shall be done for each vertical force  $F_i$  with a selected increment (this study uses a 10 kN interval). A special software has been developed for automation of this process. Finally, the calculation results will show a set of integral relative frequencies for sequential vertical forces, which are used for building integral distribution law for the summer period.

Following the same algorithm, we can define integral vertical forces distribution probability for the winter period.

Finally, we will get a set of values for building an integral function for both summer and winter periods. As there is a difference in force impact within the «wheel–rail» system during summer and winter periods due to different stiffness of the track, we shall introduce season coefficients. It is assumed for the middle climate area [in Russia] that during the summer the track is operated for  $0,6 T_y$ , and during the winter it is operated for  $0,4 T_y$ , where  $T_y$  is the annual (year) period.

Consequently, previously obtained sets of values shall be summed up in compliance with season coefficients (for the summer it is equal to 0,6; for the winter it is equal to 0,4).

Total  $P^\Sigma = 0,6 \cdot P_s + 0,4 \cdot P_w$ ; so, e.g. for  $F_i = 100$  kN:  $P^\Sigma = 0,6 \cdot P_s^{100} + 0,4 \cdot P_w^{100} \cdot 0,6 = 0,0262 + 0,4 \cdot 0,025011 = 0,0257244$ .

The calculations result in integral distribution of vertical forces at the block section which is shown in Pic. 2.

Analysis of the obtained integral law of distribution has shown:

- obtained density of distribution of vertical forces will allow to calculate the stiffness of the elements of the elements of the track depending on the share of different types of rolling stock passing within the trains, as well as the contact fatigue wear of the rails with regard to the share of freight wagons with increased axial load;
- a similarity of final distribution with distribution calculated for the rolling stock with greatest share in the traffic can be detected (in the considered case it is a distribution for freight wagons);
- the inclusion of passenger trains and multiple unit trains into calculations results in changes in the form of distribution calculated for freight wagons, increasing the values of relative frequency for vertical forces caused by those types of rolling stock).

### Brief conclusions

The developed technique allows to identify the total impact on the rails and the track considering shares of each type of rolling stock, authorised speed, climatic conditions.



## Conclusions

1. A technique to determine the integral laws of distribution of vertical and lateral forces has been developed, that can be used for implementation of heavy-haul traffic and intended to more accurately consider the force impact of different types of rolling stock, including freight wagons with increased axial load, on the track.

2. The technique allows to consider impact of different types of rolling stock with regard to the design of running parts, magnitude of axial loads, speed, stiffness of the substructure due to seasonality (summer, winter), transverse railway track profile, share of each type of rolling stock in the total impact on the track.

3. Integral distributions of vertical and lateral forces calculated with the suggested technique will allow to calculate stiffness of the elements of the track superstructure under probability aspect considering share of different types of rolling stock passing by a given railway section.

## REFERENCES

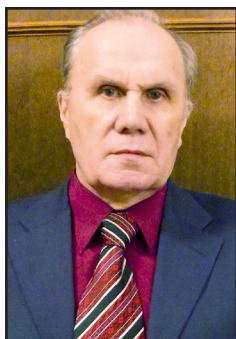
1. Czyżula, W., Chudyba, E. Dynamic response of rail track in longitudinal direction. *Transportation Overview* [Przegląd Komunikacyjny], Iss. 7, July 2018, pp. 1–9. DOI: 10.35117/A\_ENG\_18\_07\_01.
2. Askarinejad, H., Barati, P., Dhanasekar, M., Gallage, C. Field studies on sleeper deflection and ballast pressure in heavy haul track. *Australian Journal of Structural Engineering*, Vol. 19, Iss. 2, March 2018, pp. 1–9. DOI: 10.1080/13287982.2018.1444335.
3. Pengfei Liu, Wanming Zhai, Kaiyun Wang. Establishment and verification of three-dimensional dynamic model for heavy-haul train–track coupled system. *Vehicle System Dynamics (International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility)*, Vol. 54, Iss. 11, August 2016, pp. 1511–1537. DOI: 10.1080/00423114.2016.1213862.
4. Rhodes, D. Technical Standards for Heavy Haul Track Components in the Middle East. *9<sup>th</sup> International Heavy Haul Conference*, 2009, pp. 993–997. [Electronic resource]: <http://railknowledgebank.com/Presto/content/GetDoc.axd?ctID=MTk4MTRjNDU0NWQ0My00OTBmLTllYWU0ZWJmM2U0OTE0ZDY3&rID=MjYyOA==&pID=NzIx&attchmnt=VHJlZQ==&uesDM=False&rIdx=MjE5MQ==&rCFU=>. Last accessed 29.07.2019.
5. Gräbe, H., Shaw, F. J. Design life prediction of a heavy haul track foundation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2010, Vol. 224, Iss. 5, pp. 337–344. DOI: 10.1243/09544097JRR1371.
6. Gerlici, J., Nozhenko, O., Cherniak, G., Gorbunov, M., Domin, R., Lack, T. The development of diagnostics methodological principles of the railway rolling stock on the basis of the analysis of dynamic vibration processes of the rail. *MATEC Web of Conferences* 157, 03007, January 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201815703007.
7. Kozioł, P., Kudła, D. Vertical vibrations of rail track generated by random irregularities of rail head rolling surface. *Journal of Physics: Conference Series: Modern Practice in Stress and Vibration Analysis (MPSVA)* 2018, 1106012007. DOI: 10.1088/1742–6596/1106/1/012007.
8. On updating the main parameters of the general scheme for development of Russian Railways network until 2020 and 2025 in a regional context. Meeting of Science and Technical Council of JSC Russian Railways dated March 16, 2016 [Ob aktualizatsii osnovnykh parametrov generalnoi skhemy razvitiya seti zheleznnykh dorog RZD do 2020 i 2025 gg. v regionalnom razreze. Zasedanie NTS OAO RZD ot 16.03.2016]. [Electronic resource]: [http://www.rzd.ru/best/public/ru?STRUCTURE\\_ID=886&layer\\_id=5176&refererLayerId=5175&id=354](http://www.rzd.ru/best/public/ru?STRUCTURE_ID=886&layer_id=5176&refererLayerId=5175&id=354). Last accessed 12.08.2019.
9. Strategies for development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii do 2030 g. Urv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiiskoi Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r]. [Electronic resource]: <https://www.mintrans.ru/documents/1/1010>. Last accessed 29.07.2019.
10. Vilenkin, S. Ya. Statistical processing of research results of random functions [Statisticheskaya obrabotka rezultatov issledovaniya sluchainykh funktsiy]. Moscow, Energiya publ., 1979, 210 p.
11. Anderson, T. W. Statistical analysis of time series Edition in Russian. Moscow, Mir publ., 1976, 767 p.
12. Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring its reliability: TSPT–52. Approved by the order of JSC Russian Railways dated December 22, 2017 No. 2706r [Metodika otsenki vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti: CPT–52. Urv. Rasporyazheniem OAO RZD ot 22.12.2017 No. 2706r]. [Electronic resource]: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=713998&dst=4294967295&date=18.10.2019>. Last accessed 29.07.2019.
13. Kossov, V. S., Lunin, A. A. Study of longitudinal dynamics and impact on the track of connected trains with a mass of 12600 t [Issledovaniya prodolnoi dinamiki i vozdeistviya na put' soedinennykh poezdov massoi 12600 t]. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2016, Iss. 9, pp. 21–26.
14. Kossov, V. S. Results of experimental and theoretical studies of the impact of rolling stock on the track in promising operating conditions [Rezultaty eksperimentalnykh i teoreticheskikh issledovaniy vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' v perspektivnykh usloviyakh ekspluatatsii]. *Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways*, 2013, Iss. 5, pp. 27–36.
15. Kossov, V. S., Lunin, A. A., Krasnov, O. G., Spirov, A. V. Assessment of the impact on the track of cargo cars with axial loads of 23,5, 25 tf [Otsenka vozdeistviya na put' gruzovykh vagonov s osevmi nagruzkami 23,5, 25 ts]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2018, Iss. 3, pp. 63–68.
16. Kossov, V. S., Lunin, A. A., Krasnov, O. G., Spirov, A. V. Impact of cargo cars with increased axial loads on the track [Vozdeistvie na put' gruzovykh vagonov s povyshennymi osevmi nagruzkami]. *Put' i putevye khozyaistvo*, 2018, Iss. 3, pp. 19–23.
17. Tretyakov, V. V., Petropavlovskaya, I. B., Pevzner, V. O., Gromova, T. I. [et al]. Impact on the track of cars with increased axial load [Vozdeistvie na put' vagonov s povyshennoi osevoi nagruzkoi]. *Vestnik VNIIZhT*, 2016, Iss. 4 pp. 233–238.
18. Stepov, V. V. Operation of cars with increased axial load at Kovdor–Murmansk section [Ekspluatatsiya vagonov s povyshennoi osevoi nagruzkoi na uchastke Kovdor–Murmansk]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2016, Iss. 10, pp. 19–22.



# Субсидиарное управление на железной дороге



Борис ЛЁВИН



Виктор ЦВЕТКОВ



Юрий ДЗЮБА

*Лёвин Борис Алексеевич — Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

*Цветков Виктор Яковлевич — Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия.*

*Дзюба Юрий Владимирович — Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия\*.*

В связи с ростом скоростей железнодорожного транспорта и переходом к беспилотному управлению транспортом возрастает роль технологий оперативного управления без излишнего участия в нём со стороны центрального аппарата компаний.

Целью работы явилось исследование субсидиарного управления как новой технологии управления подвижными объектами, определение границ его эффективности.

Особенность субсидиарного управления в том, что оно эффективно не всегда, а только при определённых условиях, поэтому для его применения необходим анализ условий функционирования транспортных средств. Субсидиарное управление

является альтернативой иерархическому управлению, которое эффективнее в простых условиях.

Раскрывается сущность субсидиарности в социальной и технической областях.

Приводятся результаты исследования применения и применимости субсидиарного управления на железной дороге, анализируются его основные факторы. Проводится сравнение сигнально-блокового управления и субсидиарного управления, показаны особенности определения размеров блоков. Описаны дополнительные факторы субсидиарного управления — комплементарность, астатизм. Продемонстрирована связь субсидиарного управления и концепции цифровой железной дороги.

**Ключевые слова:** транспорт, управление, железная дорога, цифровая железная дорога, субсидиарное управление, цифровая экономика, блоковое управление.

\*Информация об авторах:

**Лёвин Борис Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, президент Российского университета транспорта, Москва, Россия, tu@miit.ru.

**Цветков Виктор Яковлевич** — доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя центра стратегического анализа и развития АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия, cvj2@mail.ru.

**Дзюба Юрий Владимирович** — руководитель центра стратегического анализа и развития АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия, u.dzuba@vniias.ru.

Статья поступила в редакцию 23.04.2019, актуализирована 30.07.2019, принята к публикации 07.08.2019.

For the English text of the article please see p. 29.

## ВВЕДЕНИЕ. КОНЦЕПЦИЯ СУБСИДИАРНОСТИ

Идеи субсидиарности первоначально зародились в социальной сфере, но в настоящее время появилась возможность их реализации и в технических областях деятельности. Сущность идеи субсидиарности в технической сфере и в сфере управления состоит в переносе принятия оперативных решений с верхнего уровня на операционный уровень [1], в том числе в отношении управления филиалами [2; 3]. На транспорте повышение скоростей движения на железной дороге, управление беспилотными транспортными средствами [4; 5] делают актуальными методы оперативного управления подвижными объектами, к которым и относится субсидиарное управление.

Эффективность субсидиарного управления проявляется на примере управления транспортом мегаполиса [6; 7]. Практически невозможно составить чёткий график перевозок в условиях плотного движения и многочисленных пробок. Поэтому де-факто управление транспортом мегаполиса является многоцелевым [7; 8] и осуществляется субсидиарно.

*Цель работы* заключается в исследовании технологии субсидиарности и нахождении границ эффективности её применения в сфере транспорта.

*Методы исследования* включают системный, сравнительный и управленческий анализ.

Начальной целью идеи субсидиарности было разрешение противоречий между авторитарной личностью и обществом. Принцип субсидиарности в социальной сфере восходит к работам греческих философов Платона и Аристотеля. В католическом учении принцип субсидиарности был зафиксирован Папой Римским Львом XIII (1891 год) [9] и стал частью официальной доктрины католической церкви. С политической и гражданской точек зрения принцип субсидиарности направлен на исключение авторитарной власти, что подразумевает автономию личности и поддержание чувства собственного достоинства. Все институты общества, от семьи до международных органов, должны служить человеку, а источником политической власти является народ. Субсидиарность обязывает госу-

дарство и общество к созданию условий для полноценного развития личности, в том числе, за счёт обеспечения социально-экономических прав человека. Субсидиарность можно таким образом рассматривать как принцип, как свойство и как состояние.

Применение принципа субсидиарности в технической и информационной сферах позволяет выделить особый вид управления — *субсидиарное управление*. Удвоение в условиях современного общества каждые 2–3 года объёмов информации, используемой в управлении [10], усиливает недостатки, присущие иерархическим системам, и требует поиска новых подходов к организации управления. Одним из таких решений и стало субсидиарное управление, означающее перераспределение функций управления между центральными и периферийными органами. С развитием информационного общества субсидиарное управление стали применять на транспорте (бессветофорное движение), в кибернетике (робототехника), в технологии Интернета вещей и в киберфизических системах.

В то же время применение субсидиарного управления эффективно не всегда, а только в определённых условиях.

## ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУБСИДИАРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Обычное управление движением называют сигнально-блоковым. Оно осуществляется по сигналам, которые разрешают или запрещают движение на участках пути (рис. 1) [11].

Управление движением осуществляет центр управления (ЦУ) путём организации сигналов с помощью коммуникационного пространства. Коммуникационное пространство (связь) выполняет важнейшие функции поддержки такого управления. Поскольку другого пространства управления не было, то основным методом управления на железнодорожном транспорте было сигнально-блоковое.

Появление субсидиарного управления стало возможным благодаря внедрению спутниковых и наземных навигационных систем. Вторым фактором стало возникновение и использование бортовых информационных и аналитических устройств.



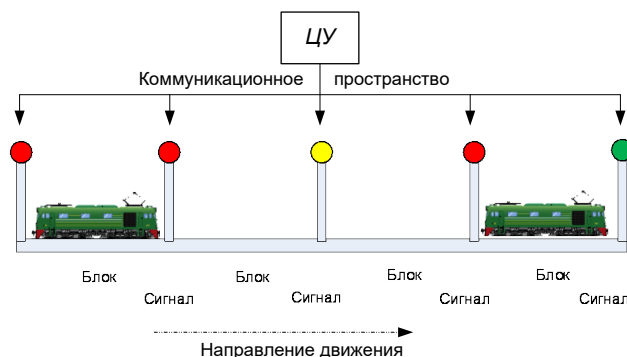


Рис. 1. Сигнально-блоковое движение.

Субсидиарное управление имеет свою специфику. Это определяется рядом принципов [12] и факторов. Важными элементами являются «пространство управления», «поле управления», «ситуация управления», «пространство решений задач управления (ПРЗУ)» (рис. 2).

Центр управления сохраняется, но в большей степени выполняет контрольные функции и вмешивается в случае чрезвычайных ситуаций. Принципиальным является появление нового средства коммуникации между подвижными объектами. Это либо глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), либо позиционные системы наземной мобильной связи. В обоих случаях, в сравнении со схемой на рис. 1, в субсидиарном управлении появляется возможность самостоятельного позиционирования (координирования) подвижного объекта бортовыми устройствами.

Пространство управления представляет собой физическое и параметрическое пространства, которые служат источниками информации о ситуации, позиции и состоянии управляемого объекта. Основой организации такого пространства служат

спутниковые технологии и мобильные технологии позиционирования.

Поле управления есть часть реального информационного пространства, в котором возможно физическое управление объектом.

Ситуация управления есть часть поля управления и параметрическая модель информационной ситуации, в которой находится объект управления.

Информационная ситуация характеризует объект управления и все важные факторы, которые влияют на его состояние. По существу, субсидиарное управление является ситуативным (действующим «по ситуации») и относится к школе «управления при непредвиденных обстоятельствах» [13].

Пространство решения задач управления есть параметрическое информационное пространство, которое содержит опыт ранее принятых управленческих решений и служит ресурсом для принятия решений в различных вновь возникающих ситуациях. Его особенность в том, что оно находится (рис. 2) на бортовых устройствах движущихся средств. Нетрудно заметить, что рис. 2 является обобщением схемы цифровой железной дороги [14]. Задача

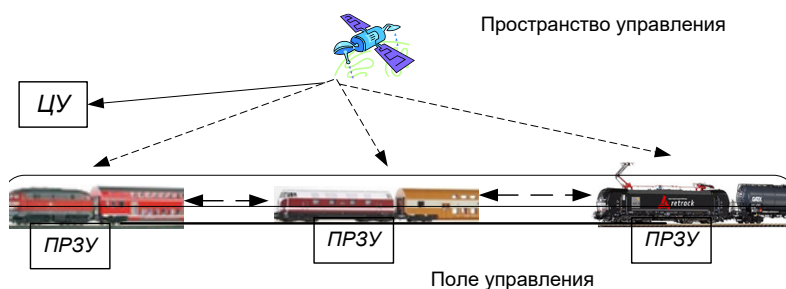


Рис. 2. Субсидиарное управление на железной дороге.



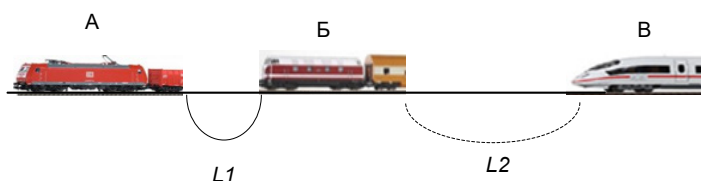


Рис. 3. Технология подвижных блоков.

ПРЗУ каждого бортового устройства заключается в том, чтобы оперативно найти готовый стереотип решения для текущей ситуации, либо разработать новый алгоритм, который затем использовать как опыт.

Другими важными факторами субсидиарного управления, помимо ситуативности, являются информационность, комплементарность, адаптивность, системность, устойчивость.

### СИТУАТИВНОСТЬ

Ситуативность означает управление по складывающейся ситуации движения. Субсидиарное управление допускает возможность появления непредусмотренных помех движению. Поэтому при наличии общего плана действий (графика движения) и главной цели текущая цель определяется ситуацией, например, препятствиями на дороге, торможением впереди идущего состава и др.

Ситуативность проявляется в том, что для достижения главной поставленной цели необходимо реализовывать вспомогательные задачи. Каждая вспомогательная задача имеет свою цель, поэтому субсидиарное управление является не только ситуативным, но и многоцелевым.

В настоящее время субсидиарное управление реализуется при бессветофорном движении и разрабатывается для применения на цифровой железной дороге. На практике применяют технологию подвижных сигнальных блоков (Moving block signaling) [11]. По существу, эти блоки и задают ситуативность, что поясняется на рис. 3. Ситуативность состоит в том, что расстояние между поездами вычисляется на основе ситуационных факторов движения и влияет на характеристики движения следующего поезда.

На рис. 3 показаны три последовательно идущих поезда А, Б, В и интервалы между ними  $L_1$ ,  $L_2$ , которые и задают по-

движные блоки. В технологии подвижных блоков (рис. 3) каждый подвижный объект (например, Б) содержит бортовую информационно-вычислительную систему [8] и осуществляет информационное взаимодействие с другими объектами (например, с впереди идущим объектом А и следующим после объектом В).

В зависимости от скорости и массы поезда рассчитывают расстояние между поездами, которое называют «длина блока» ( $L_1$ ,  $L_2$ ).

Размерность блока  $L$  не является фиксированной, а рассчитывается на основе суммы компонент  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ :

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$$

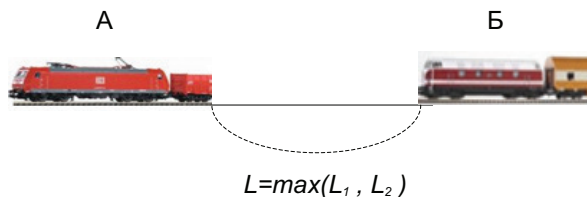
Параметр  $l_1$  (инерционный или физический) является основным. Он рассчитывается на основе безопасного тормозного пути, регулируется по скорости, нагрузке, условиям движения и иным данным. Параметр  $l_2$  (временной) определяется общей временной задержкой принятия решений. Чем выше быстродействие системы и оперативней алгоритмы расчёта, тем меньше влияние этого параметра. Параметр  $l_3$  (навигационный) определяется реальной погрешностью определения местоположения на основе применяемой технологии ГНСС и используемого режима. Кроме того, при использовании мобильной локации он определяется точностью этой технологии. Параметр  $l_4$  (управленческий) определяется задержкой управленческого сигнала с момента получения информации о состоянии объекта [1].

Линейный размер блока изменяется в реальном времени в зависимости от ситуации. Очевидно, что длина блока для разных транспортных средств существенно различается. Чем выше скорость и больше масса поезда, тем крупнее должен быть блок. На рис. 3 условно показано, что один блок меньше другого:  $L_1 < L_2$ .

Верхняя граница подвижного блока (рис. 3) для объекта (Б) определяется либо



**Рис. 4. Расчёт блока безопасности движения при субсидиарном управлении.**



положением хвоста предшествующего поезда (А), либо другими препятствиями, независимыми от связи с бортовыми датчиками. Это могут быть объекты на трассе, фиксируемые с помощью видео-, инфракрасных изображений, акустических сигналов, данных от радиорелейных станций.

В общем случае говорят о дальнем обзоре или «слепом» обзоре. «Слепой» обзор означает обзор пути, невидимого из кабины машиниста в отсутствие оптической видимости, но фиксируемого с помощью технических средств. Дальний цифровой обзор предупреждает о непредвиденных препятствиях на пути и является всепогодным.

При бессветофорном железнодорожном движении на принципе субсидиарного управления появляется особенность, которая отсутствует при обычном сигнальном движении (рис. 1). Водитель (машинист) должен контролировать не только впереди идущий транспорт, но и объект, следующий за управляемым им, во избежание наезда позади идущего транспорта.

Для субсидиарного управления движением поездов это выражается в том, что длина блока безопасности, рассчитываемая бортовым компьютером, должна учитывать впереди и позади идущие поезда. Это показано на рис. 4.

На рис. 4 показано, что длина блока между поездами выбирается как максимальная из двух блоков  $L_1$ ,  $L_2$  (рис. 3).

Использование субсидиарного управления увеличивает эффективность и пропускную способность. Исключается дополнительная работа по установке меток и сигнальных устройств. Такая схема движения реализована на МЦК (Московское центральное кольцо). Использование подвижных блок-участков даёт увеличение эффективности движения с возможностью его интегрального регулирования [15]. Интегральное регулирование осуществляется с учётом временного интервала попутного следования, а не фиксированного

расстояния между поездами. Таким образом, в случае высокой скорости сохраняется большая дистанция между поездами, а в случае низкой она уменьшается.

## **ДРУГИЕ ФАКТОРЫ СУБСИДИАРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ**

**Адаптивность.** Адаптивность субсидиарного управления вытекает из необходимости изменения условий движения согласно текущей ситуации и гибкому графику движения. Она обусловлена необходимостью структурной перестройки схемы движения и локальной цели управления. Структурная перестройка информационной модели управления облегчается при наличии элементарных составляющих, из которых можно формировать или с использованием которых перестраивать модель управления. В информационном управлении такими составляющими являются информационные единицы [16], которые также являются аналогом элементов сложной системы. Информационные единицы есть основа любой информационной конструкции, включая модель управления транспортом. Адаптивная модель включает виртуальное блоковое управление и допускает использование систем с переменной структурой, требующей элементарной основы, из которой она создаётся. Такой основой и являются информационные единицы. Иными словами, адаптивность требует включения в субсидиарное управление некоего механизма, обеспечивающего адаптацию к меняющимся условиям и ситуациям.

**Информационность.** Информационность тесно связана с цифровой экономикой и по существу является одной из форм её реализации. Поиск «проблемного пространства» и «пространства решений» включает сбор информации и её обработку. Информационное субсидиарное управление применяет информационные модели и информационные техно-

логии для анализа и управления движением. Необходимо различать информационный менеджмент и информационное управление [17]. Информационное управление имеет корни в техническом управлении. Менеджмент больше связан с организационным управлением. Субсидиарное управление является техническим и связано с информационным управлением. Информационность связана с использованием бортовых вычислительных устройств и неких ресурсов для хранения информации о ситуациях.

**Комплементарность.** При наличии сложных схем управления движением или множества управляемых могут возникать противоречия, своего рода паразитические циклы при реализации управленческих решений. Однако управление эффективно только тогда, когда такие противоречия в управленческой схеме минимизированы, что становится возможным при наличии комплементарности технологий управления [18]. Отсюда следует, что её обеспечение в технологических и информационных средствах управления является важным фактором subsidiарного управления в целом. Это новый фактор, характерный именно для subsidiарного управления транспортом, который требует проведения дополнительного (комплементарного) анализа для обеспечения согласованности действий.

**Системность.** Subsidiарное управление использует сочетание методов, основанных на ранее полученном опыте, и ситуационные, как следствие, управление легче осуществлять и анализировать, когда оно представляет собой целостную систему. Это приводит к необходимости применять системный подход [19, 20] для организации subsidiарного управления. Системный подход подразумевает использование элементов как составляющих системы, и в subsidiарном управлении такими элементами являются упомянутые выше информационные единицы.

**Устойчивость.** Subsidiарное управление должно быть устойчивым при наличии помех движению. Это приводит к понятию астатического управления, основанного на выдерживании параметров движения при наличии помех внешней среды. Оно заметно при движении морских судов

[21–23], не применяется при сигнально-блоковом движении железнодорожного транспорта, но слабо проявляется и при бессветофорном движении, то есть, при subsidiарном управлении. Эта теория может быть перенесена в область subsidiарного управления на железнодорожном транспорте. Она включает разработку алгоритмического обеспечения, основанного на применении оптимизационных методов теории управления и идеологии автоматизированного компьютерного проектирования. В отличие от известных методов синтеза законов управления, улучшающих отдельные динамические характеристики, многоцелевой подход поддерживает состояние объекта управления комплексно. В частности, важно, чтобы объект управления обладал свойством астатизма по регулируемому ключевому параметру, которое состоит в возможности сводить ошибку параметров движения к нулю при наличии внешнего воздействия. Моделирование таких систем является нетривиальной задачей, постановка и решение которой с привлечением современных математических и компьютерных методов существенно зависит от типа объекта, его параметров и назначения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование subsidiарного управления на железнодорожном транспорте даёт возможность организовать гибкий и более плотный график движения поездов. Subsidiарное управление включает многоцелевое управление рядом объектов и использует общий механизм и правила, что делает возможным реализацию такого движения на интеллектуальном транспорте и в киберфизических системах. Subsidiарное управление является альтернативой иерархическому управлению [24] с жёстким графиком движения. Оно допускает гибкое планирование при достижении стратегической цели.

Анализ subsidiарного управления контекстно выявляет два важных фактора: модель информационной ситуации и модели информационных единиц. Всё subsidiарное управление строится на создании и использовании модели информационной ситуации. Информационные единицы



служат основой адаптивности, системности и устойчивости управления. Субсидиарное управление особенно эффективно при ситуационном управлении [25, 26] в условиях динамического изменения условий движения, влияния факторов внешней среды и высокой интенсивности движения (характерных для мегаполиса). Однако применение этого подхода на железнодорожном транспорте требует специальных математических методов анализа условий движения, которые в обычном управлении транспортом не используют.

Сущность субсидиарного и астатического управления состоит в минимизации участия человека в управлении. Эффект субсидиарного управления состоит в повышении оперативности принятия решений. Можно рассматривать субсидиарные системы управления как реактивные, то есть оперативно реагирующие на изменение ситуации движения. Преимущество таких систем в том, что их можно применять и при автоматизированном, и при интеллектуальном управлении транспортом. Это позволяет накапливать опыт автоматизированного управления для переноса его в интеллектуальное управление транспортом и в транспортные киберфизические системы [27].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков В. Я. Применение принципа субсидиарности в информационной экономике // Финансовый бизнес. — 2012. — № 6. — С. 40–43.
2. Manolopoulos D. The concept of autonomy in the subsidiary management research: A conceptual investigation // Journal of Transnational Management. — 2006. — Т. 11. — № 4. — С. 45–62. — DOI: 10.1300/J482v11n04\_04.
3. Paterson S. L., Brock D. M. The development of subsidiary-management research: review and theoretical analysis // International Business Review. — 2002. — Т. 11. — № 2. — С. 139–163. — DOI: 10.1016/S0969-5931(01)00053-1.
4. Murthy S. N. [et al]. Methodology for implementation of unmanned vehicle control on FPGA using system generator // 2008 7<sup>th</sup> International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems. — IEEE, 2008. — С. 1–6. — DOI: 10.1109/iccdcs.2008.4542645.
5. Cummings M. L. [et al]. The impact of human – automation collaboration in decentralized multiple unmanned vehicle control // Proceedings of the IEEE. — 2011. — Т. 100. — № 3. — С. 660–671. — DOI: 10.1109/jproc.2011.2174104.
6. Liu Y. [et al]. Metropolis parking problems and management planning solutions for traffic operation effectiveness // Mathematical Problems in Engineering Vol. 2012, Article ID678952, 6 p. [Электронный ресурс]: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/678952>. Доступ 07.08.2019.

7. Fadare S. O., Ayantoyinbo B. B. A study of the effects of road traffic congestion on freight movement in Lagos metropolis // European Journal of Social Sciences. — 2010. — Т. 16. — № 3. — С. 429–437. [Электронный ресурс]: [https://www.researchgate.net/publication/287900193\\_A\\_study\\_of\\_the\\_effects\\_of\\_road\\_traffic\\_congestion\\_on\\_freight\\_movement\\_in\\_lagos\\_metropolis](https://www.researchgate.net/publication/287900193_A_study_of_the_effects_of_road_traffic_congestion_on_freight_movement_in_lagos_metropolis) Доступ 07.08.2019.
8. Tsvetkov V. Ya. Multipurpose Management // European Journal of Economic Studies. — 2012. — № 2. — pp. 140–143.
9. Leo X. Rerum Novarum. 1891 // Catholic Social Thought: The Documentary Heritage. — 1931. [Электронный ресурс]: [http://w2.vatican.va/content/leo-xiii/en/encyclicals/documents/hf\\_l-xiii\\_enc\\_15051891\\_rerum-novarum.html](http://w2.vatican.va/content/leo-xiii/en/encyclicals/documents/hf_l-xiii_enc_15051891_rerum-novarum.html). Доступ 07.08.2019.
10. Ожерельева Т. А. Закон Ципфа в информационном поле // Славянский форум. — 2017. — № 2. — С. 62–67.
11. Щенников А. Н. Применение виртуальных блоков в управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. — 2019. — № 1. — С. 17–26.
12. Козлов А. В. Принципы субсидиарности // Славянский форум. — 2018. — № 2. — С. 28–35.
13. Цветков В. Я. Развитие технологий управления // Государственный советник. — 2015. — № 4. — С. 5–10.
14. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Цифровая железная дорога: принципы и технологии // Мир транспорта. — 2018. — № 3. — С. 50–61.
15. Цветков В. Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. — 2013. — № 5. — С. 6–9.
16. Романов И. А. Применение информационных единиц в управлении // Перспективы науки и образования. — 2014. — № 3. — С. 20–25.
17. Замышляев А. М. Информационное управление в транспортной сфере // Наука и технологии железных дорог. — 2017. — 4(4). — С. 11–24.
18. Щенников А. Н. Комплементарность при обработке информации // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2019. — № 1. — С. 24–30.
19. Кудж С. А. Системный подход // Славянский форум. — 2014. — № 1. — С. 252–257.
20. Козлов А. В. Системный анализ субсидиарных систем // Славянский форум. — 2019. — № 1. — С. 116–122.
21. Веремей Е. И., Корчанов В. М., Коровкин М. В., Погожев С. В. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов. — СПб.: СПбГУ, 2002. — 370 с.
22. Лукомский Ю. А., Корчанов В. М. Управление морскими подвижными объектами. — СПб.: Элмор, 1996. — 320 с.
23. Сотникова М. В. Многоцелевые законы цифрового управления подвижными объектами / Дис... док. ф.-м. н. — СПб.: СПбГУ, 2007. — 371 с.
24. Угольников Г. А. Иерархическое управление устойчивым развитием — М.: Физматлит, 2010. — 336 с.
25. Дышленко С. Г. Ситуационный анализ в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. — 2018. — № 1. — С. 26–33.
26. Коваленков Н. И. Ситуационное управление в сфере железнодорожного транспорта // Государственный советник. — 2015. — № 2. — С. 42–46.
27. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. — 2018. — № 2. — С. 138–145. ●

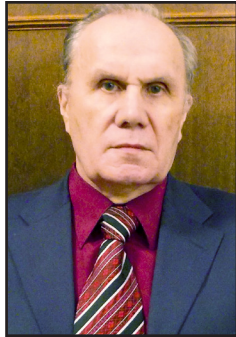




# Subsidiarity-Based Management and Control Systems for Railways



**Boris A. LYOVIN**



**Victor Ya. TSVETKOV**



**Yuriy V. DZYUBA**

*Lyovin, Boris A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

*Tsvetkov, Victor Ya., Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow, Russia.*

*Dzyuba, Yuriy V., Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow, Russia.*

## ABSTRACT

The increase in railway speeds and the transition to unmanned transport control result in the growth of the role of operational management technologies exempt from excessive control of corporate headquarters.

The objective of the work is to study the subsidiarity-based control as a new technology of controlling moving objects, and to identify borders of its efficiency.

A subsidiarity-based control's feature is that its efficiency may be revealed under certain conditions only and not always. Therefore, the application of subsidiarity-based control requires an analysis of operating conditions of vehicles. Subsidiarity-based control is an

alternative to hierarchical control which is more efficient under simpler conditions.

The paper reveals the essence of subsidiarity in the social and engineering field, and results of the study on application and applicability of subsidiarity-based control for the railways, its core factors are analyzed. Comparison of signal block and subsidiarity-based control systems is made, followed by description of particularities of identification of the size of blocks within subsidiarity-based control system. Additional factors of subsidiarity-based control, comprising complementarity and astatism, are described. The relationship between subsidiarity-based management and control and implementation of digital railway concept is shown.

**Keywords:** transport, management, railway, digital railway, subsidiarity, subsidiarity-based management, subsidiarity-based control, digital economy, block control.

Information about the authors\*:

**Lyovin, Boris A.** – D.Sc. (Eng), Professor, President of the Russian University of Transport, Moscow, Russia, [tu@miit.ru](mailto:tu@miit.ru).

**Tsvetkov, Victor Ya.** – D.Sc. (Eng), Professor, Deputy Head of the Center for Strategic Analysis and Development of JSC Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (NIIAS), Moscow, Russia, [cvj2@mail.ru](mailto:cvj2@mail.ru).

**Dzyuba, Yuriy V.** – Head of the Center for Strategic Analysis and Development of JSC Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (NIIAS), Moscow, Russia, [u.dzuba@vnias.ru](mailto:u.dzuba@vnias.ru).

Article received 23.04.2019, revised 30.07.2019, accepted 07.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 22.

### Introduction. The concept of subsidiarity

The ideas of subsidiarity were originally born in the social sphere, but now there is an opportunity for their implementation in the engineering sphere as well. The essence of the idea of subsidiarity in the management and engineering focuses on the transfer of decision making from the upper level to the operational level [1], particularly regarding subsidiary management [2; 3]. In the transportation field the increase in speed of railway rolling stock and the need to control the unmanned vehicles [4; 5] requires methods of operational control of moving objects, comprising subsidiarity-based control.

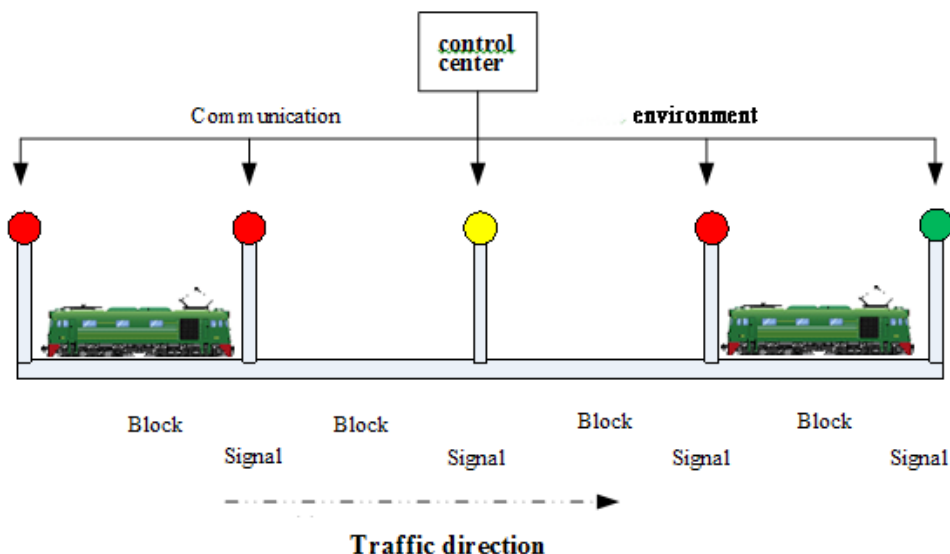
The efficiency of subsidiarity-based management is evident at the example of transport management in a megalopolis [6; 7]. It is practically impossible to draw up a detailed transportation timetable under the conditions of heavy traffic and numerous traffic jams. Therefore, the management of mass transit in a megalopolis is de facto a multi-purpose one [7; 8] and is carried out using the principle of subsidiarity.

**Objective.** The objective of the work is to study the technology of subsidiarity and to find the borders of the efficiency of its application in the transportation field.

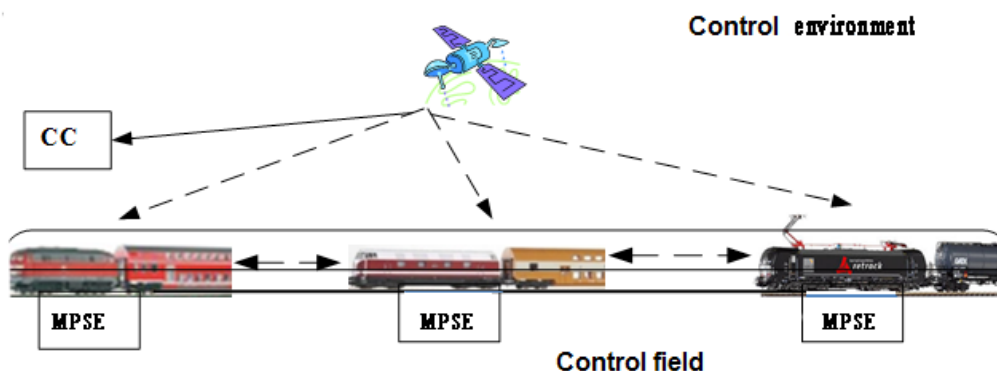
**Methods.** The research methods comprise system, comparative and management analysis.

The initial purpose of the idea of subsidiarity was to resolve the contradictions between an authoritarian personality and the society. The principle of subsidiarity in the social sphere dates back to the time of the Greek philosophers Plato and Aristotle. In the Catholic doctrine, the principle of subsidiarity was established by Pope Leo XIII (1891) [9] and became part of the official doctrine of the Catholic Church. From a political and civil points of view, the principle of subsidiarity is aimed at excluding authoritarian power and implies personal autonomy and self-esteem. All institutions of society, from the family to international bodies, should serve the person. Subsidiarity implies that the source of political power is the people, and so obliges the state and society to create conditions for the full development of the personality, including the provision of socio-economic human rights. So the subsidiarity can be considered a principle, as an attribute, and as a condition.

Application of the principle of subsidiarity in the engineering and information fields allows to distinguish a special type of management and control, i.e. subsidiarity-based management and control. In modern society, twofold increase of the volume of data used in management occurring every 2 or 3 years [10], aggravates the weaknesses inherent in hierarchical systems, and requires the search for new approaches to



Pic. 1. Signal-block traffic.



*Pic. 2. Subsidiarity-based railway control system.*

the organization of management. The subsidiarity-based management is one of the required solutions, implementing the redistribution of powers and management functions between central and peripheral control bodies.

With the development of the information society, subsidiarity-based control systems began to be used in transportation («no traffic lights» traffic), in cybernetics (robotics), in the Internet of Things technology and in cyber-physical systems. At the same time, the application of subsidiary management is not always efficient, but only under certain conditions.

#### **Results.**

##### **Core factors of subsidiarity-based control**

Conventional traffic control is called signal-block control. It is implemented through signals that allow or prohibit movement (Pic. 1) [11].

Traffic control is carried out by the control center (CC) by organization of signals by means of communication environment. Communication environment (communications) performs the most important functions of supporting such control. Since there was no other control environment, the signal-block control was the main railway traffic control system.

The emergence of subsidiarity-based management was made possible by the advent of satellite and ground-based navigation systems. The emergence and use of on-board information and analytical devices built the second factor.

Subsidiarity-based management has its own specifics. This is defined by a set of principles [12] and factors of subsidiarity-based management, the most important of which comprise «control environment», «control field», «situation to be managed», «management problem solution environment (MPSE)» (Pic. 2).

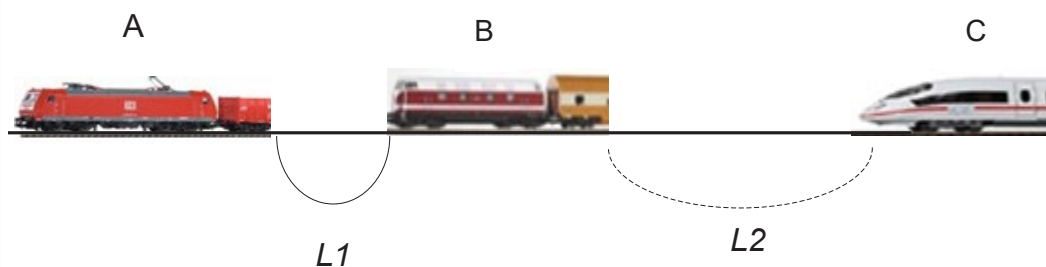
Under subsidiarity-based management, the control center remains, but it mainly performs monitoring functions and intervenes in emergency situations. The fundamental importance belongs to the emergence of a new means of communication between vehicles. This is either Global Navigation Satellite System (GNSS) or positional ground-based mobile communication systems. In both cases, in subsidiarity-based management, it becomes possible to independently position (coordinate) a vehicle with on-board devices (Pic. 2 can be compared to the Pic. 1).

Control environment is a physical and parametric spaces, which serve as a source of information about the situation, position and condition of the controlled object. The organization of the control environment is based on satellite and mobile positioning technologies.

Control field is a portion of a real information environment in which physical control of the object is possible.

Situation to be managed is a part of the control field and a parametric model of the information situation in which the controlled object is located.





**Pic. 3. Moving block signaling technology.**

The information situation characterizes the controlled object and all the important factors that affect its condition. Basically, subsidiarity-based management is situational (guided by situation) and refers to the school of «management under unforeseen circumstances» [13].

Management problem solution environment (MPSE) is a parametric information environment that contains expertise of previously made management decisions and serves as a resource for making decisions in various new situations. Its feature is that it is located within on-board devices of moving vehicles (Pic. 2). It is easy to see that Pic. 2 is a generalization of the digital railway scheme [14]. The objective of the MPSE of each on-board device is to quickly find a ready-made solution stereotype for the current situation, or to develop a new algorithm that can then be used as a cumulated expertise.

Other important factors of subsidiarity-based management, besides situational factor, are informativeness, complementarity, consistency, adaptivity, sustainability (stability).

### **Situational factor**

Situational factor means controlling with due regard to the current traffic situation. Subsidiarity-based control admits a possibility of appearance of unforeseen obstacles. Therefore, once there is a general action plan and a main objective, the current goal is determined by the situation, involving, e.g., obstacles on the track, braking of a train in front, etc.

Situational factor leads to the need to solve auxiliary problems in order to achieve the main goal. Each auxiliary problem has its own purpose, so subsidiarity-based

management is situation-oriented and multi-purpose.

At present, subsidiarity-based management is implemented in «no traffic lights» traffic and is being developed for the digital railway. In practices, the technology of Moving block signaling is used [11]. As a matter of fact, these blocks determine the situational factor, as it is explained in Pic. 3. The situational factor is that the distance between trains is calculated based on situational traffic factors and affects the movement features of the next train.

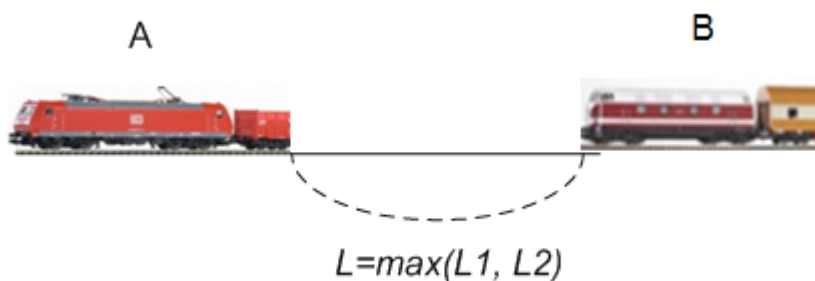
Pic. 3 shows three sequentially running trains A, B, C and the intervals  $L_1$ ,  $L_2$  between them, which define the moving blocks. In the Moving block signaling technology (Pic. 3) each mobile object (e.g., B) has an on-board information computation system [8] and performs information interaction with other objects (for instance, with the object A in front and the next object C).

Depending on the speed and mass of the train, the distances between trains are calculated, which are called «block length» ( $L_1$ ,  $L_2$ ). Block dimension  $L$  is not fixed but is calculated using components  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ :

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4.$$

Parameter  $l_1$  (inertial or physical) is the primary parameter. It is calculated on the basis of safe stopping distance and adjusted according to speed, load, traffic and other conditions. Parameter  $l_2$  (time parameter) is determined by the total time of delay of decision making. The higher the system performance and the faster the calculation algorithm are, the less is the impact of this parameter. Parameter  $l_3$  (navigation) is determined by the actual location error based on the Global navigation satellite system (GNSS) technology used and





**Pic. 4. Calculation of safety block for subsidiary-based organization of railway traffic.**

the mode used. Besides, when using a mobile location, it is determined by the accuracy of this technology. Parameter  $l_4$  (a control parameter) is determined by delay of control signal from the moment of receiving information on object status [1].

The linear size of the block varies in real time depending on the situation. Obviously, the length of the block varies considerably from vehicle to vehicle. The higher the speed and the larger the mass of the train are, the larger should be the block. Pic. 3 conditionally shows that a block is less than the other:  $L_1 < L_2$ .

The utmost limit of the moving block (Pic. 3) for object (B) is determined either by the rear end of the preceding train (A) or by other obstacles which are independent of communication with the onboard sensors. There can be objects on the track, captured using video, infrared images, acoustic signals, data from radio relay stations.

In general, it is said to be a long-range view or a «blind» view. «Blind» view means viewing of tracks not visible from the driver's cabin in the absence of optical visibility but recorded using technical means. Long-range digital monitoring warns of unforeseen obstacles on the track and is all-weather.

The subsidiarity-based organization of railway traffic with no traffic lights has a feature non-existing within regular signal-based traffic (Pic. 1). A driver must monitor not only the position of vehicles in front, but also a vehicle behind to avoid rear-end collision. It is expressed through the fact that the length of the safety block calculated by the onboard computer must take into account the trains going both in front and behind. This is shown in Pic. 4.

Pic. 4 shows that the length of the block between trains is selected as the largest of the two blocks:  $L_1, L_2$  (Pic. 3).

Use of subsidiarity-based control increases efficiency and traffic capacity excluding additional work on installation of tags and signaling devices. Such traffic model is implemented at Moscow Central Circle Line. Using of moving blocks increases the traffic efficiency and provides opportunity to use integral traffic control [15]. Integral control is carried out with account of the time interval between the trains running in the same direction and not of a fixed distance between them. Thus, in case of a higher speed, a larger distance between trains is maintained and it can be decreased in the case of lower speed.

#### **Other factors of subsidiarity-based control**

*Adaptivity.* Adaptivity of subsidiarity-based management and control responses to the need to change traffic conditions in accordance with the current situation and a flexible traffic schedule. It is determined by the need for structural adjustment of the traffic chart and the local control goal. Structural adjustment of the management information model is facilitated by the presence of elementary components from which the control model can be formed or rebuilt. In information management, such components are information units [16], which are also analogous to elements of a complex system. Information units are the basis of any information structure including a transport management model. The adaptive model includes virtual block management and allows the use of systems with a variable structure. The variable structure requires an elementary

basis from which the structure is created, which comprises the mentioned information units. Adaptivity demands inclusion of a certain mechanism into the subsidiary management which ensures adaptation to changing conditions and situations.

**Informativeness.** Informativeness is associated with the digital economy and as a matter of fact, is a form of its implementation. Searching for «problem environment» and «solution environment» involves acquisition and processing of information. The information subsidiarity-based management uses information models and information technologies to analyze and manage traffic. It is necessary to differentiate information management and information control [17]. Information control finds its roots in technical control. Management is more related to organization management. Subsidiarity-based control is a technical (engineering) one and is linked to information control. Informativeness is related to the use of on-board computing devices and certain resources for storing information data on different situations.

**Complementarity.** In the presence of complex traffic control models or a considerable amount of controlled objects, contradictions and so called parasitic cycles may occur during the implementation of management decisions. Management is effective only when contradictions in the management model are minimized. This is possible if management technologies are complementary [18]. Hence, an important factor in subsidiary management is ensuring complementarity for technological and information management tools. Complementarity is a new factor that appears with subsidiarity-based traffic control, and hence requires additional (complementary) analysis to ensure coherence.

**Consistency.** Subsidiarity-based management uses expertise-based methods in combination with situational methods. Management is easier to implement and analyze when it is an integrated system. This leads to the need to apply a system approach [19, 20] for the organization of subsidiarity-based management. A system approach involves the use of elements as components of a system, which are information units.

**Stability (sustainability).** Subsidiarity-based management must be sustainable in the

presence of traffic interference. This involves the concept of astatic control, which is based on maintaining traffic parameters face to interference caused by external environment. It is vividly demonstrated regarding maritime navigation ships [21–23], and on the contrary is not used in the railway traffic based on signal-blocks. It is slightly manifested in the «no traffic lights» road traffic, that is, within subsidiarity-based control system. This theory can be transferred to the field of subsidiarity-based railway management. It includes the development of algorithmic support based on the application of optimization methods of control theory and the ideology of computer-aided design. In contrast to the known methods of synthesis of control laws that improve separate dynamic features, the multi-purpose approach supports the state of the controlled object in the most comprehensive way. It is particularly important that the controlled object has the property of astatism regarding controllable key parameter, that is the ability to reduce the error of traffic parameters to zero in the presence of external influence. Modeling of such systems is a non-trivial problem, as its formulation and solution with the use of modern mathematical and computer methods substantially depends on the type of object, its parameters and purpose.

### Conclusion

The use of subsidiarity-based management for railway transportation makes it possible to organize a flexible and denser train schedule. Subsidiarity-based management includes multi-purpose control of a series of objects, uses a common mechanism and rules, making it possible to implement such traffic organization model for intelligent transportation and cyber-physical systems. Subsidiarity-based control system is an alternative to hierarchical control [24] with a rigid timetable. It allows flexible planning to achieve a strategic goal. The analysis of subsidiarity-based management contextually reveals two important factors: a model of information situation and a model of information units. The entire subsidiarity-based management and control model is based on the creation and use of a model of the information situation. Information units serve as the basis for control adaptability, consistency

and sustainability. Subsidiarity-based control is especially efficient for situational control [25, 26] under the conditions of dynamically changing traffic conditions, influence of external factors and high traffic intensity. These are just the traffic conditions of the megalopolis. However, the application of this approach for railway transport requires special mathematical methods for analyzing traffic conditions that are not used in conventional transportation management and control. The essence of subsidiarity-based and astatic management is to minimize human involvement in management. The effect of subsidiarity-based management is to increase the speed of decision-making. It is possible to consider subsidiarity-based management and control systems as reactive ones, that is quickly responding to changing traffic situation. The advantage of such systems is that they can be used within automated and intelligent traffic control system. This enables accumulation of experience of automated control for further transferring it to intelligent transportation and transport cyber-physical systems [27].

# REFERENCES

1. Tsvetkov, V. Ya. Application of the principle of subsidiarity in the information economy [*Primenenie printsipa subsidiarnosti v informatsionnoj ekonomike*]. *Finansovij biznes*, 2012, Iss. 6, pp. 40–43.
2. Manolopoulos, D. The concept of Autonomy in the Subsidiary Management Research: A Conceptual Investigation. *Journal of Transnational Management*, 2006, Vol. 11, Iss. 4, pp. 45–62. DOI: 10.1300/J482v11n04\_04.
3. Paterson, S. L., Brock, D. M. The development of subsidiary-management research: review and theoretical analysis. *International Business Review*, 2002, Vol. 11, Iss. 2, pp. 139–163. – DOI: 10.1016/S0969-5931(01)00053-1.
4. Murthy, S. N. [*et al*]. Methodology for implementation of unmanned vehicle control on FPGA using system generator. 7<sup>th</sup> International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems, IEEE, 2008, pp. 1–6. DOI: 10.1109/iccdcs.2008.4542645.
5. Cummings, M. L. [*et al*]. The impact of human–automation collaboration in decentralized multiple unmanned vehicle control. *Proceedings of the IEEE*, 2011, Vol. 100, Iss. 3, pp. 660–671. DOI: 10.1109/jproc.2011.2174104.
6. Liu Y. [*et al*]. Metropolis parking problems and management planning solutions for traffic operation effectiveness. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2012, Article ID678952, 6 p. [Electronic resource]: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/678952>. Last accessed 07.08.2019.
7. Fadare, S. O., Ayantoyinbo, B. B. A study of the effects of road traffic congestion on freight movement in Lagos metropolis. *European Journal of Social Sciences*, 2010, Vol. 16, Iss. 3, pp. 429–437. [Electronic resource]: [https://www.researchgate.net/publication/287900193\\_A\\_study\\_of\\_the\\_effects\\_of\\_road\\_traffic\\_congestion\\_on\\_freight\\_movement\\_in\\_lagos\\_metropolis](https://www.researchgate.net/publication/287900193_A_study_of_the_effects_of_road_traffic_congestion_on_freight_movement_in_lagos_metropolis). Last accessed 07.08.2019.
8. Tsvetkov, V. Ya. Multipurpose Management. *European Journal of Economic Studies*, 2012, Iss. 2, pp. 140–143.
9. Leo X. Rerum Novarum. 1891. Catholic Social Thought: The Documentary Heritage, 1931. [Electronic resource]: [http://w2.vatican.va/content/leoxiii/en/encyclicals/documents/hf\\_l-xiii\\_enc\\_15051891\\_rerum-novarum.html](http://w2.vatican.va/content/leoxiii/en/encyclicals/documents/hf_l-xiii_enc_15051891_rerum-novarum.html). Last accessed 07.08.2019.
10. Ozherelieva, T. A. Zipf's law in information field [*Zakov Tspifa v informatsionnom pole*]. *Slavianskij Forum*, 2017, Iss. 2, pp. 62–67.
11. Shchennikov, A. N. Using virtual blocks in transport management [*Primenenie virtual'nykh blokov v upravlenii transportom*]. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog*, 2019, Iss. 1, pp. 17–26.
12. Kozlov, A. V. Principles of subsidiarity [*Printsipy subsidiarnosti*]. *Slavianskij Forum*, 2018, Iss. 2, pp. 28–35.
13. Tsvetkov, V. Ya. Development of management technologies [*Rasvitie tekhnologii upravlenija*]. *Gosudarstvennij sovetnik*, 2015, Iss. 4, pp. 5–10.
14. Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Digital railway: Principles and technologies [*Tsifrovaja zheleznaia doroga: printsipy i tekhnologii*]. *World of Transport and Transportation*, 2018, Iss. 3, pp. 50–61.
15. Tsvetkov, V. Ya. Integrated control of high-speed line [*Integralnoje upravlenie vysokoskostonnoj magistralju*]. *World of Transport and Transportation*, 2013, Iss. 5, pp. 6–9.
16. Romanov, I. A. The use of information units in management [*Primenenije informatsionnykh edinit v upravlenii*]. *Perspectives of science and education*, 2014, Iss. 3, pp. 20–25.
17. Zamyshlyayev, A. M. Information management in the transport sector [*Informatsionnoe uravlenie v transportnoi sfere*]. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog*, 2017, Iss. 4 (4), pp. 11–24.
18. Shchennikov, A. N. Logical complementarity in information processing [*Komplementarnost pri obrabotke informatsii*]. *ITSEM: Information technologies in science, education and management*, 2019, Iss. 1, pp. 24–30.
19. Kudj, S. A. Systematic approach [*Sistemnij podhod*]. *Slavianskij Forum*, 2014, Iss. 1, pp. 252–257.
20. Kozlov, A. V. System analysis of subsidiary systems [*Sistemnij analiz subsidiarnykh system*]. *Slavianskij Forum*, 2019, Iss. 1, pp. 116–122.
21. Veremey, E. I., Korchanov, V. M., Korovkin, M. V., Pogozhev, S. V. Computer simulation of ship navigation control systems [*Komputernoe modelirovanie system upravlenija dvizheniem morskikh podviznykh objektov*]. St. Petersburg, SPBU, 2002, 370 p.
22. Lukomskij, Yu. A., Korchanov, V. M. Marine moving objects navigation control [*Upravlenie morskimi podviznymi objektami*]. St. Petersburg, Elmor, 1996, 320 p.
23. Sotnikova, M. V. Multipurpose laws of digital control of moving objects [*Mnogotselevye zakony tsifrovogo upravlenija podviznymi objektami*]. *Doctoral Thesis in Physical and mathematical Sciences*, St. Petersburg, SPBU, 2007, 371 p.
24. Ugolnitsky, G. A. Hierarchical management of sustainable development [*Ierarhicheskoe upravlenie ustojchevym razvitiem*]. Moscow, Fizmatlit, 2010, 336 p.
25. Dyshlenko, S. G. Situational analysis in the transport network [*Situatsionnij analiz v transportnoj setji*]. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog*, 2018, Iss. 1, pp. 26–33.
26. Kovalenkov N. I. Situational management in the field of railway transport [*Situatsionnoe upravlenie v sfere zheleznodorozhnogo transporta*]. *Gosudarstvennij sovetnik*, 2015, Iss. 2, pp. 42–46.
27. Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Cybernetics and Physical Systems for Transport Management [*Kiberfizicheskije sistemy v upravlenii transportom*]. *World of Transport and Transportation*, 2018, Iss. 2, pp. 138–145.



# Инновационное развитие транспортной системы с применением технологии магнитной левитации



Анатолий ЗАЙЦЕВ



Яна СОКОЛОВА



Татьяна ПАНТИНА

**Зайцев Анатолий Александрович** — Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия.

**Соколова Яна Викторовна** — Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия.

**Пантина Татьяна Алексеевна** — Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия\*.

Цифровые трансформации в различных отраслях национальной экономики многих стран приводят к росту востребованности не только информационных, но и инновационных технологий в целом. Эти современные тенденции в полной мере проявляются в крупномасштабных технологических изменениях в сфере транспорта.

Вместе с тем, содержание отражающих тренд на инновации задач, приоритетность их постановки, а также механизмы реализации определяются в контексте социально-экономических систем и стратегий развития каждого государства, с учётом его геополитического положения, участия в региональных объединениях и организациях, множества других факторов, влияющих на характер принимаемых решений, формирование стратегического управления инновационным развитием транспортных систем.

В России проводимая сегодня государственная политика в сфере транспорта ориентирована на реализа-

цию транзитного потенциала, повышение эффективности транспортных услуг, уровня экономической связанности территории за счёт модернизации и расширения транспортной инфраструктуры. Решение таких задач, обеспечивающих в том числе повышение экономичности и безопасности транспорта, требует внедрения принципиально новых технологических решений, использующих последние достижения мировой науки и техники.

Целью статьи является предложение концептуального подхода к включению магнитной левитации в число технологий, способствующих стратегическому развитию транспортной системы России.

В условиях активно развивающейся цифровой экономики вывод на отечественный рынок качественно нового продукта, каковым являются магнитолевитационные транспортные системы (МЛТС), станет прорывным решением в развитии транспортной системы страны с учётом ряда решаемых ею ключевых задач.

**Ключевые слова:** транспорт, стратегическое управление, национальные проекты, магистральная инфраструктура, магнитолевитационный транспорт.

\*Информация об авторах:

**Зайцев Анатолий Александрович** — доктор экономических наук, профессор, руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия, [nozrgups@gmail.com](mailto:nozrgups@gmail.com).

**Соколова Яна Викторовна** — кандидат экономических наук, заместитель руководителя Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия, [nozrgups@gmail.com](mailto:nozrgups@gmail.com).

**Пантина Татьяна Алексеевна** — доктор экономических наук, профессор, проректор по научной работе Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова (ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова), Санкт-Петербург, Россия, [PantinaTA@gumrf.ru](mailto:PantinaTA@gumrf.ru).

Статья поступила в редакцию 06.06.2019, актуализирована 22.07.2019, принята к публикации 19.08.2019.

For the English text of the article please see p. 41.



## ВВЕДЕНИЕ

Состояние транспортной отрасли является одним из индикаторов, отражающих уровень экономического развития каждой страны.

В условиях цифровизации различных отраслей национальных экономик многих стран происходит стремительный рост числа принципиально новых разрабатываемых и внедряемых технологий. Эта тенденция характерна и для транспорта.

Вместе с тем, инновационное развитие каждой страны в силу специфики социально-экономических систем, сложившейся и планируемой конфигурации транспортной сети, географического положения, наличия ресурсов, степени включенности в глобальную транспортную систему развивается по собственной траектории, определяющей формирование и условия реализации соответствующих стратегий.

В России среди ключевых задач государственной политики в сфере транспорта — реализация транзитного потенциала России, повышение эффективности транспортных услуг и уровня экономической связанности территории, модернизация и расширение транспортной инфраструктуры.

При устойчивой тенденции динамичных изменений, происходящих в политической и социально-экономической среде, особое значение приобретает стратегическое управление инновационным развитием транспортных систем.

Целями статьи являются обзор и краткий анализ документов, определяющих государственную стратегию в сфере транспорта, формулирование на этой основе ряда предложений, в том числе о концептуальной важности включения магнитной левитации в число технологий, способствующих стратегическому развитию транспортной системы.

## ПЛАН МОДЕРНИЗАЦИИ И РАЗВИТИЯ МАГИСТРАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В РОССИИ

Указом Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 (далее — Указ) определены национальные цели и стратегические задачи развития страны до 2024 года [1]. Во исполнение Указа разработаны национальные проекты по 12 приоритетным направлениям социально-экономического развития.

«Утверждённый 30 сентября 2018 года Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года (далее — Комплексный план)», включающий две части: транспортную и энергетическую, «предусматривает развитие транспортных коридоров «Запад—Восток» и «Север—Юг» для перевозки грузов», железнодорожной, авиационной, автодорожной, морской и речной инфраструктуры в целях обеспечения экономической связанности территории страны [2].

Развитие транспортных коридоров «Запад—Восток» и «Север—Юг» будет осуществляться, в частности, посредством строительства и модернизации автомобильных дорог, связывающих Европу с Западным Китаем, предусмотрены масштабные мероприятия по развитию Северного морского пути, пропускной способности БАМа и Транссиба. В числе результатов развития транспортных коридоров указаны сокращение сроков транзитных контейнерных перевозок, повышение средней коммерческой скорости грузоперевозок на железнодорожном транспорте, мощности введённых в эксплуатацию мультимодальных транспортно-логистических центров, увеличение объёма экспорта услуг транспортного комплекса.

Для примера, в сфере железнодорожного транспорта предусмотрена реализация 104 проектов [3].

## ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПОТРЕБНОСТЯМ СТРАНЫ

Транспортная отрасль сегодня сталкивается с множеством задач, в числе которых необходимость развития инфраструктуры, привлечения частных инвестиций, недостаточный уровень зрелости компаний — участников рынка, что создаёт дополнительные сложности функционирования транспортной системы [4]. При этом Россия эксплуатирует железнодорожную инфраструктуру значительно интенсивнее многих стран: на 1 км путей в 2017 году пришлось 29 млн тонн грузов, тогда как данный показатель в Китае на четверть ниже, а в США меньше более чем в два раза. Согласно оценке, содержащейся в The Global Competitiveness Report, по протяжённости железнодорожных путей Россия





**Рис. 1. Структура экспортных грузов (январь–сентябрь 2018 г.).**

занимает третье место в мире (86 тыс. км), по качеству железнодорожной инфраструктуры — 23-е место [5].

Сегодня железнодорожная сеть не справляется с возрастающим потоком экспортных грузов. Погрузка на всей сети железных дорог России в направлении морских портов в период с января по сентябрь 2018 года возросла до 229 млн тонн (+6,1 % к уровню января–сентября 2017 года) [6].

В объёме экспорта отдельных товаров (рис. 1) доля сырьевых грузов составляет 92,3 %, на прочие грузы, в том числе и на готовую продукцию промышленного комплекса, приходится 7,7 % [6]. Фактически из номенклатуры перевозимых железнодорожных грузов исключены так называемые высокомаржинальные грузы, скоропортящаяся продукция, которые перевозятся автомобильным транспортом.

При этом объём экспорта углеводородов и, прежде всего, угля по железным дорогам возрастает. Железнодорожная сеть сегодня неспособна полностью обеспечить потребности бизнеса и государства по количественным и качественным показателям. Ввиду большого количества «узких» мест Транссиб не может взять дополнительную нагрузку.

Решение обозначенных проблем требует принятия комплекса мер по привлечению ресурсов, использования инновационного технологического потенциала, создания условий для стабильного сбалансированного развития транспортной системы.

В условиях нарастания сложности и неопределённости внешней среды, естественных возможностей рыночного механизма недостаточно для координирования инвести-

ционной деятельности, и возрастает важность государственной инвестиционной политики в России, которая должна развиваться и приобретать черты стратегического управления.

## **РОЛЬ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИЕЙ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ**

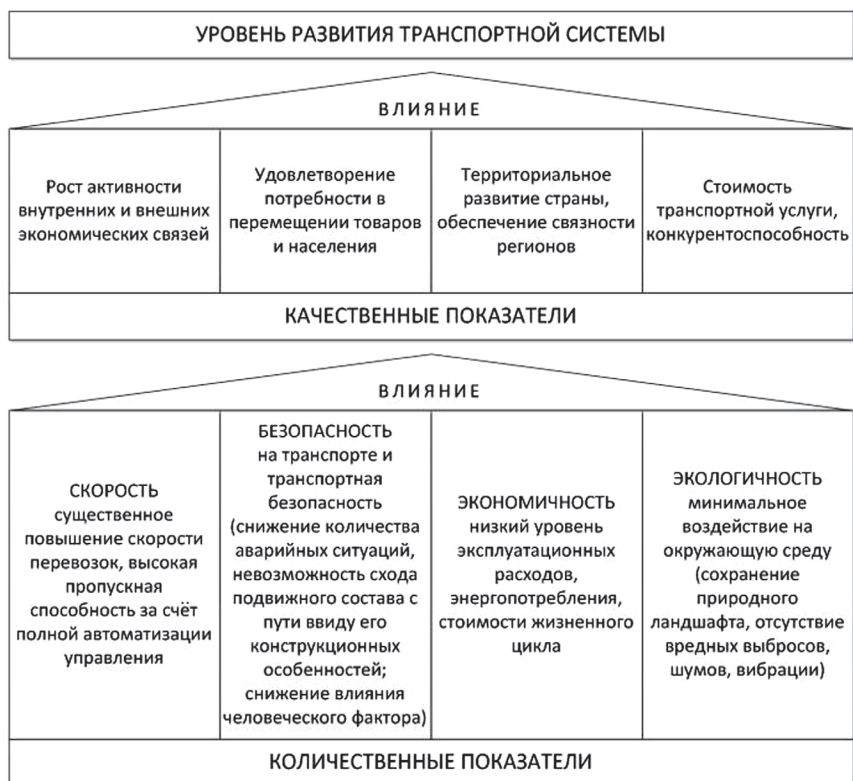
Особенностями стратегического управления являются способность учитывать прогнозы развития внутренней и внешней экономической ситуации в мире, степень их влияния на реализацию мероприятий программы развития, использование инновационных технологий в уникальной компоновке, гибкое своевременное реагирование на постоянные изменения, привлечение интеллектуальной элиты страны для выработки работоспособных методов и оптимального выбора объектов управления.

Учёные и практики в области транспортной логистики, технологии перевозочного процесса понимают реальную ситуацию и её последствия для страны и всесторонне обосновывают необходимость реализации масштабных проектов усиления магистральной инфраструктуры транспорта.

Российская Федерация должна найти возможность эффективного использования своей территории для создания межгосударственных транспортных коридоров «Запад–Восток» и «Север–Юг», нацеливаясь на технические, организационные и экономические показатели, соответствующие новому технологическому укладу.

## **МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ**

Магнитолевитационная технология непрерывно совершенствуется и имеет огромный потенциал, чтобы стать ядром новой транспортной революции, причём как с позиций ускорения перемещения, так и с позиций безопасности движения и экологической безопасности, что отражено в работах признанных мировых экспертов в этой области из США, Южной Кореи, Германии [10]. Эволюция высокоскоростного железнодорожного транспорта наглядно продемонстрировала достижение физического предела технологии «колесо–рельс», поэтому развитие транспортной системы с применением



**Рис. 2. Ключевые показатели инновационного развития транспортной системы с применением технологии магнитной левитации.**

инновационной технологии магнитной левитации становится мировым трендом [11].

Перспективы её использования на сегодняшний день раскрыты не полностью. Однако ключевые вопросы экономической эффективности, способности новой технологии удовлетворять потребности общества и экономики эффективнее существующих технологий доказаны и очевидны.

В своей работе «Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail» авторы – члены международного управляющего комитета приводят убедительные доводы и целый ряд сравнительных параметров энергоэффективности двух систем: магнитолевитационной и классической высокоскоростной «колесо–рельс» [12]. Преимущества магнитолевитационного транспорта объясняются отсутствием трения в системе движущихся элементов.

Несколько десятилетий в международных научных кругах обсуждается задача применения уникальных свойств сверхпроводников для повышения качественных характеристик магнитолевитационного транспорта [13; 14; 15]. Однако широкое применение их сдержи-

вается стоимостью, которая имеет тенденцию к снижению, но пока ещё не достигла уровня, приемлемого для применения в транспортной технологии.

Результаты 24-й Международной конференции Maglev 2018, прошедшей в Санкт-Петербурге на базе Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I в сентябре 2018 года, показывают, что увеличивается число стран, в которых разработаны и действуют стратегии и программы внедрения транспортных технологий на основе магнитной левитации, а также стран, в которых магнитолевитационные транспортные проекты либо внедрены, либо готовятся к внедрению. В Китае, Японии, Южной Корее, Германии, США и других странах растёт производство высокотехнологичных компонентов, интенсифицируется процесс подготовки специалистов для будущих программ реализации.

Результаты постоянно проводимых во всём мире исследований в ближайшем будущем позволят качественно улучшить технические и экономические показатели магнитолевитационной транспортной системы,



ключевые характеристики которой уже сегодня подтверждают её эффективность для инновационного развития транспортной системы (рис. 2).

Для инновационного развития транспортной системы необходимы решения руководства страны и отрасли, планомерная целенаправленная работа по тестированию и развитию инициативных достижений российских инженеров. Поддержка государства и бизнеса становится решающим фактором доведения запатентованных разработок до стадии применения в реальных экономических и технологических условиях в целях безопасного и быстрого перемещения большого количества людей и грузов на любые расстояния.

## ВЫВОДЫ

Стратегическое управление являет собой эффективное средство достижения целей инновационного развития, позволяющее обеспечить достижение планируемых результатов. В этой связи необходимо рассматривать МЛТС как технологию, носящую стратегический характер и заслуживающую развития как элемент реализации транспортной стратегии России.

Совокупность взаимоувязанных действий и мероприятий, направленных на обеспечение эффективного решения задачи создания МЛТС, обеспечит достижение стратегических целей инновационного развития транспортной отрасли.

Магнитолевитационная транспортная технология, несмотря на её уникальность и эффективность, подтверждённые исследованиями и результатами коммерческого использования в разных странах мира (Япония, Китай, Южная Корея), является инновационным продуктом, опыт внедрения которого в России отсутствует. Минимизировать риски реализации проекта на всех стадиях его осуществления в значительной степени способны инструменты стратегического управления и планирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 г.». [Электронный ресурс]: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027>. Доступ 06.06.2019.
2. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года. [Электронный ресурс]: <http://government.ru/docs/34297/>. Доступ 06.06.2019.

3. Правительству предложили план строительства инфраструктуры на 7 трлн руб. [Электронный ресурс]: <https://www.rbc.ru/economics/20/08/2018/5b76d9759a7947236cf787c2>. Доступ 06.06.2019.

4. Обзор российского транспортного сектора в 2017 году. [Электронный ресурс]: <https://home.kpmg.ru/ru/home/insights/2018/04/transport-survey-2017.html>. Доступ 06.06.2019.

5. Обзор отрасли грузоперевозок в России. 2018 год. [Электронный ресурс]: [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-freight-transportation-survey-2018/\\$FILE/ey-freight-transportation-survey-2018.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-freight-transportation-survey-2018/$FILE/ey-freight-transportation-survey-2018.pdf). Доступ 06.06.2019.

6. Булаева А. Погрузка экспортных грузов в порты в январе–сентябре выросла на 6,1 % // Гудок. [Электронный ресурс]: <http://www.gudok.ru/news/?ID=1438143>. Доступ 06.06.2019.

7. Методические указания по разработке национальных проектов (программ). Утв. Председателем Правительства РФ Д. А. Медведевым 4 июня 2018 года № 4072п-Пб. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/550517324>. Доступ 06.06.2019.

8. Интегральный проект солидарного развития на Евразийском континенте (научно-практическая концепция) // Доклад д.п.н. В. И. Якунина на заседании президиума РАН, Москва, 11 марта 2014 г. [Электронный ресурс]: <https://v-yakunin.livejournal.com/83781.html>. Доступ 06.06.2019.

9. Садчиков А. Экономист Иван Стариков: Есть замена нефти! Надо зарабатывать на транзите из Китая в Европу. [Электронный ресурс]: <http://www.gudok.ru/events/detail.php?ID=1358082>. Доступ 06.06.2019.

10. Wenk M., Kluehspies J., Blow L., Fritz E., Hekler M., Kircher R., Witt M. Practical investigation of future perspectives and limitations of maglev technologies. — *Transportation Systems and Technology*. — 2018. — Vol. 4 (3 suppl. 1). — pp. 85–104. — DOI: 10.17816/transsynt201843s185–104.

11. Зайцев А. А., Соколова Я. В. Магнитолевитационная транспортная система для грузовых перевозок // Тренды экономического развития транспортного комплекса России: форсайт, прогнозы и стратегии: труды национальной научно-практической конференции. — М.: РУТ (МИИТ), 2018. — С. 109–111.

12. Fritz E., Kluehspies J., Kircher R., Witt M. Energy consumption of track-based high-speed transportation systems: Maglev technologies in comparison with steel-wheel-rail. [Электронный ресурс]: [www.researchgate.net/publication/328733747\\_Energy\\_Consumption\\_of\\_Track-Based\\_High-Speed\\_Transportation\\_Systems\\_Maglev\\_Technologies\\_in\\_Comparison\\_with\\_Steel-Wheel-Rail](http://www.researchgate.net/publication/328733747_Energy_Consumption_of_Track-Based_High-Speed_Transportation_Systems_Maglev_Technologies_in_Comparison_with_Steel-Wheel-Rail). Доступ 06.06.2019.

13. Murakami M., Oyama T., Fujimoto H., Taguchi T., Gotah S., Shiohara Y., Koshizuka N., Tamaka S. Large levitation force due to flux pinning in Ybaco superconductors fabricated by melt-powder-melt-growth process. — *Japanese Journal of Applied Physic.* — 1990. — Vol. 29(2–11). — pp. 1991–1994. — DOI: 10.1143/jjap.29.11991.

14. Wang S., Wang J., Wang X., Ren Z., Zeng Y., Deng C., Jiang H., Zhu M., Lin G., Xu Z., Zhu D., Song H. The man-loading high-temperature superconducting maglev test vehicle. — *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2003. — 13(2). — pp. 2134–2137. — DOI: 10.1109/tasc.2003.813017.

15. Deng Z., Zhang W., Zheng J., Wang B., Ren Y., Zheng X., Zhang J. A High-temperature superconducting maglev — evacuated tube transport (HTS Maglev—ETT) test system. — *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2017. — 27(6). — pp. 1–8. — DOI: 10.1109/tasc.2017.2716842.





# Innovative Development of Transport System using Magnetic Levitation Technology



Anatoly A. ZAITSEV



Yana V. SOKOLOVA



Tatyana A. PANTINA

*Zaitsev, Anatoly A., Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia.  
Sokolova, Yana V., Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia.  
Pantina, Tatyana A., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia\*.*

## ABSTRACT

Digital transformations in various sectors of the national economy of many countries lead to an increase in demand for not only information, but also innovative technologies in general. Those current trends are fully manifested in large-scale technological changes in the field of transport.

At the same time, the contents of tasks reflecting the trend for innovation, the priority of their formulation, as well as implementation mechanisms are determined in the context of socio-economic systems and development strategies of each state, taking into account its geopolitical position, participation in regional associations and organizations, many other factors affecting the nature of decisions made, formation of the strategic management of the innovative development of transport systems.

In Russia, the current public policy in the field of transport is focused on realizing the transit potential, improving the

efficiency of transport services, and the level of economic connectivity of the territory through modernization and expansion of transport infrastructure. The solution of such problems, including, inter alia, increasing efficiency and safety of transport, requires introduction of fundamentally new technological solutions using the latest achievements of world science and technology.

The objective of the article is to propose a conceptual approach to inclusion of magnetic levitation in the set of technologies that contribute to strategic development of the transportation system in Russia.

In the context of an actively developing digital economy, the launch of a qualitatively new product on the domestic market, which is magnetic levitation transport systems (MLTS), will be a breakthrough solution in development of the country's transport system, taking into account a number of key tasks it solves.

Keywords: transport, strategic management, national projects, trunk infrastructure, magnetic levitation transport.

\*Information about the authors:

**Zaitsev, Anatoly A.** – D.Sc. (Economics), professor, head of the scientific and educational center for innovative development of passenger railway transportation of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, nozpgups@gmail.com.

**Sokolova, Yana V.** – Ph.D. (Eng), deputy head of the scientific and educational center for innovative development of passenger railway transportation of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, nozpgups@gmail.com.

**Pantina, Tatyana A.** – D.Sc. (Economics), professor, vice-rector for scientific work of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia, PantinaTA@gumrf.ru.

Article received 06.06.2019, revised 22.07.2019, accepted 19.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 36.

**Background.** The state of the transport industry is one of the indicators reflecting the level of economic development of each country.

In the context of digitalization of various sectors of the national economies of many countries, there is a rapid increase in the number of fundamentally new technologies being developed and introduced. This trend is also characteristic of transport.

At the same time, innovative development of each country due to the specifics of socio-economic systems, the existing and planned configuration of the transport network, geographical location, availability of resources, and the degree of inclusion in the global transport system is developing along its own path, which determines formation and conditions for implementation of the respective strategies.

The key tasks of the public policy in the field of transport in Russia comprise implementation of the transit potential of Russia, increasing the efficiency of transport services and the level of economic connectivity of the territory, modernization and enhancement of transport infrastructure.

With a steady trend of dynamic changes taking place in the political and socio-economic environments, strategic management of innovative development of transport systems is of great importance.

The *objectives* of the article are to overview and briefly analyze the documents, determining public strategy in the transport field, and to put forward some suggestions, particularly regarding importance of integration of magnetic levitation transport systems (MLTS) into the list of technologies contributing to the strategic development of the transportation system.

The authors use general scientific *methods*, contents and comparative analysis, evaluation approach.

## Results.

### Plan for modernization and development of mainline infrastructure in Russia

Decree of the President of the Russian Federation dated 05.07.2018 No. 204 (hereinafter referred to as the Decree) defines the national goals and strategic objectives of the country's development until 2024 [1]. Pursuant to the Decree, national projects have been developed in 12 priority areas of socio-economic development.

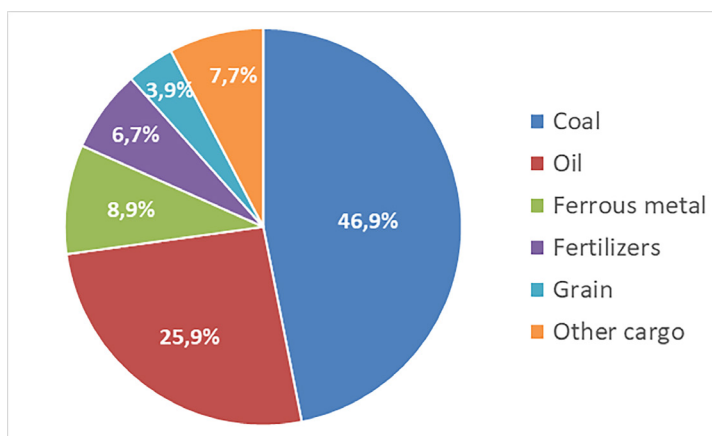
«The Comprehensive plan for modernization and expansion of mainline infrastructure for the period until 2024 (hereinafter referred to as the Comprehensive plan)», approved on September 30, 2018, which includes two parts: transport and energy power», «envisages development of West–East and North–South transport corridors for transportation of goods», railway, aviation, road, sea and river infrastructure in order to ensure economic connectivity of the country [2].

The development of the West–East and North–South transport corridors will be carried out, in particular, through construction and modernization of roads connecting Europe with Western China. Large-scale measures are envisaged to develop the Northern Sea Route, the capacity of Baikal-Amur Mainline and Trans-Siberian Railway. The expected results of development of transport corridors provide for a decrease in the transit time of container transportation, an increase in the average commercial speed of cargo transportation by rail, the grown capacity of multimodal transport and logistics centers put into operation, and an increase in the volume of export of transportation comprehensive services. For example, in the field of railway transport, 104 projects are envisaged [3].

### Assessment of railway transport capabilities' conformity to the country's needs

The national transport sector faces today many challenges, including the need to develop infrastructure, attract private investment, insufficient maturity of companies participating in the market, which creates additional difficulties for functioning of the transport system [4]. At the same time, Russia operates the railway infrastructure much more intensively than many other countries: 29 million tons of cargo were transported per 1 km of tracks in 2017, while this figure is a lower by quarter in China and twofold lower in the United States. According to the assessment made by The Global Competitiveness Report, Russia ranks third in the world (86 thousand km) in terms of railway length and 23<sup>rd</sup> in terms of quality of railway infrastructure [5].

Today, the railway network cannot cope with the increasing flow of export cargo. The loading on the entire railway network of Russia in the direction of seaports from January to September 2018 increased to 229 million tons (+6,1 %



**Pic. 1. Structure of export cargo (January–September 2018).**

compared to the level of January–September 2017) [6].

The share of raw materials in the volume of export of certain goods (Pic. 1) is of 92,3 %, while other goods, including finished products of the industrial complex, account for 7,7 % [6]. In fact, the so-called high-margin cargoes, perishable products that are transported by road are excluded from the range of railway cargo transported.

At the same time, the volume of exports of hydrocarbons and, above all, coal, by rail is increasing. The railway network today is unable to fully meet the needs of business and the state by quantitative and qualitative indicators. Due to the large number of bottlenecks, Trans-Siberian Railway cannot take the additional load.

The solution of those problems requires taking a set of measures to attract resources, use innovative technological capacity, and create conditions for a stable balanced development of the transport system.

Given the increasing complexity and uncertainty of the external environment, the natural capabilities of the market mechanism are not enough to coordinate investment activity, and under those conditions the importance of state investment policy in Russia, which should develop and acquire the features of strategic management, is growing.

#### **The role of strategic management of national projects**

The features of strategic management are the ability to take into account forecasts of development of the internal and external economic situation in the world, the degree of

their influence on implementation of the development program, use of innovative technologies in a unique layout, flexible timely response to constant changes, involvement of the country's intellectual elite in developing practicable methods and optimal choice of managed facilities.

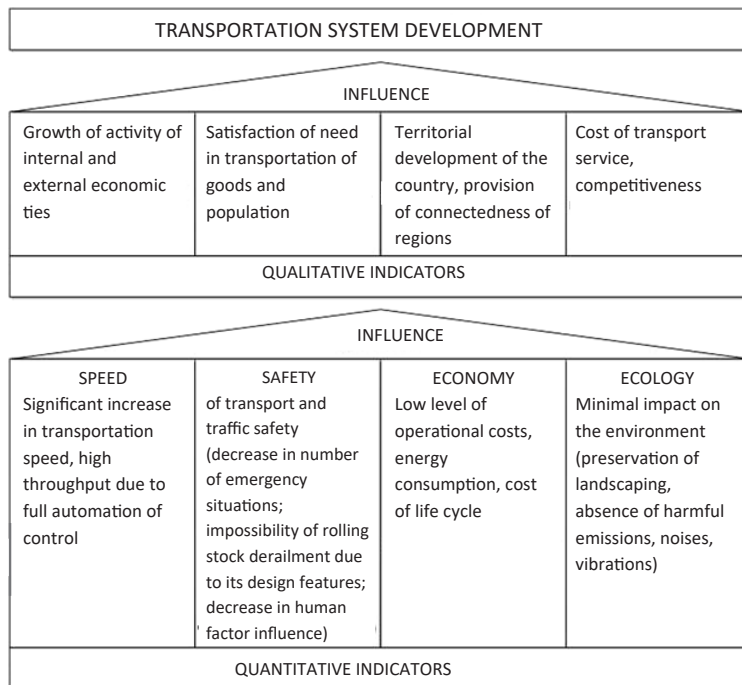
Scientists and practitioners in the field of transport logistics and transportation technology understand the real situation and its consequences for the country and comprehensively justify the need for large-scale projects to strengthen the main transport infrastructure.

The Russian Federation should find the opportunity to effectively use its territory to create West–East and North–South interstate transport corridors, focusing on technical, organizational and economic indicators that correspond to the new technological structure.

#### **Magnetic levitation technology for innovative development of the transport industry**

Magnetic levitation technology is constantly being improved and has great potential to become the core of the new transport revolution, both from the standpoint of accelerating movement and from the standpoint of traffic safety and environmental safety, which is reflected in the works of recognized world experts in this field from the USA, South Korea, Germany [10]. The evolution of high-speed rail transport has clearly demonstrated the achievement of the physical limit of the «wheel–rail» technology, so development of the transport system using innovative magnetic levitation technology is becoming a global trend [11].





**Pic. 2. Key indicators of innovative development of the transport system using magnetic levitation technology.**

The prospects for its use to date are not fully disclosed. However, the key issues of economic efficiency, the ability of a new technology to meet the needs of society and the economy more efficiently than existing technologies are proven and are obvious.

In their work «Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail», the authors, members of the international steering committee, provide convincing proves and a number of comparative energy efficiency parameters for two, magnetic and classic high-speed «wheel–rail», systems [12]. The advantages of magnetic levitation transport vehicles are explained by the absence of friction in the system of moving elements.

For several decades, the international scientific community has been discussing the problem of using the unique properties of superconductors to improve the quality characteristics of magnetic levitation transport vehicles [13; 14; 15], while their widespread use is constrained by the cost, which tends to decrease, but has not yet reached a level acceptable for implementation in transport technologies.

The results of the 24<sup>th</sup> Maglev 2018 International Conference, held in St. Petersburg at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University in September 2018, show that there is an increase in the number of countries in which strategies and programs for introduction of magnetic levitation transport technologies have been developed and are operational, as well as of countries in which magnetic levitation transport projects are either implemented or are being prepared for implementation. In China, Japan, South Korea, Germany, the USA and other countries, production of high-tech components is growing, the process of training specialists for future implementation programs is being developed.

The results of ongoing global studies will allow in the near future to qualitatively improve the technical and economic indicators of the magnetic levitation transport system, the key characteristics of which already confirm its effectiveness for innovative development of the transport system (Pic. 2).

For innovative development of the transport system, strong-willed decisions by the leadership of the country and the industry are needed, as well as system and focused work to test and develop initiative achievements of



Russian engineers. State support is becoming a decisive factor in bringing patented developments to the stage of implementation in real economic and technological conditions in order to safely and quickly move a large number of people and goods at any distance.

### Conclusions.

Strategic management is an effective tool of achieving the goals of innovative development, allowing to obtain the planned results. In this regard, it is necessary to consider Magnetic Levitation Transport System (MLTS) as a technology that is strategic in nature and deserves development as an element of implementation of Russia's transport strategy.

A set of interconnected actions and activities aimed at ensuring an effective solution of the task of creating MLTS will ensure achievement of the strategic goals of innovative development of the transport industry.

Magnetic levitation transport technology, despite its uniqueness and effectiveness, confirmed by research and the results of commercial use in different countries of the world (Japan, China, South Korea), is an innovative product whose implementation experience is not available in Russia. The tools of strategic management and planning are able to minimize to a large extent the risks of project implementation at all stages of its implementation.

### REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 204 «On national goals and strategic objectives of development of the Russian Federation for the period until 2024» [*Ukaz Prezidenta RF ot 07.05.2018 № 204 «O natsionalnykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2024»*]. [Electronic resource]: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027>. Last accessed 06.06.2019.
2. On approval of Comprehensive plan for modernization and expansion of the mainline infrastructure for the period until 2024 [*Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistralnoi infrastruktury na period do 2024 goda*]. [Electronic resource]: <http://government.ru/docs/34297/>. Last accessed 06.06.2019.
3. The government was offered a plan for construction of infrastructure for 7 trillion rubles [*Pravitelstvu predlozili plan stroiteliva infrastruktury na 7 trln rublei*]. [Electronic resource]: <https://www.rbc.ru/economics/20/08/2018/5b76d9759a7947236cf787c2>. Last accessed 06.06.2019.
4. Overview of the Russian transport sector in 2017 [*Obzor rossiiskogo transportnogo sektora v 2017 godu*]. [Electronic resource]: <https://home.kpmg/ru/ru/home/insights/2018/04/transport-survey-2017.html>. Last accessed 06.06.2019.
5. Overview of cargo transportation industry in Russia. 2018 [*Obzor otrasli gruzoperevozok v Rossii. 2018 god*]. [Electronic resource]: <https://www.ey.com/Publication/>

[vwLUAssets/ey-freight-transportation-survey-2018/\\$FILE/ey-freight-transportation-survey-2018.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-freight-transportation-survey-2018/$FILE/ey-freight-transportation-survey-2018.pdf). Last accessed 06.06.2019.

6. Bulaeva, A. Loading of export cargo to ports in January–September increased by 6,1 % [*Pogruzka eksportnykh gruzov v porty v yanvare-sentyabre vyroslo na 6,1 %*]. *Gudok [newspaper]*. [Electronic resource]: <http://www.gudok.ru/news/?ID=1438143>. Last accessed 06.06.2019.
7. Guidelines for development of national projects (programs). Approved by the Chairman of the Government of the Russian Federation D. A. Medvedev on June 4, 2018 No. 4072p-P6 [*Metodicheskie ukazaniya po razrabotke natsionalnykh proektov (program)*]. *Utv. Predsedatelem Pravitelstva RF D. A. Medvedevym 4 iunya 2018 goda № 4072p-P6*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/550517324>. Last accessed 06.06.2019.
8. The integrated project of joint development on the Eurasian continent (scientific and practical concept) [*Integralnyi proekt solidarnogo razvitiya na Evroaziatskom kontinente (nauchno-prakticheskaya kontseptsiya)*]. Report of D.Sc. (Politics) V. I. Yakunin at a meeting of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, March 11, 2014. [Electronic resource]: <https://v-yakunin.livejournal.com/83781.html>. Last accessed 06.06.2019.
9. Sadchikov, A. Economist Ivan Starikov: There is a replacement for oil! It is necessary to earn on transit from China to Europe [*Est' zamena nefli! Nado zarabatyvat' na tranzite iz Kitaya v Evropu*]. [Electronic resource]: <http://www.gudok.ru/events/detail.php?ID=1358082>. Last accessed 06.06.2019.
10. Wenk, M., Kluehspies, J., Blow, L., Fritz, E., Hekler, M., Kircher, R., Witt, M. Practical investigation of future perspectives and limitations of maglev technologies. *Transportation Systems and Technology*, 2018, Vol. 4, Iss. 3, suppl. 1, pp. 85–104. DOI: 10.17816/transsyst201843s185–104.
11. Zaitsev, A. A., Sokolova, Ya. V. Magnetic levitation transport system for cargo transportation [*Magnitolevitatsionnaya transportnaya sistema dlya gruzovykh perevozok*]. *Trends in economic development of the transport complex of Russia: foresight, forecasts and strategies: proceedings of a national scientific and practical conference*, Moscow, Russian University of Transport, 2018, pp. 109–111.
12. Fritz, E., Kluehspies, J., Kircher, R., Witt, M. Energy consumption of track-based high-speed transportation systems: Maglev technologies in comparison with steel-wheel-rail [Electronic resource]: [www.researchgate.net/publication/328733747\\_Energy\\_Consumption\\_of\\_Track-Based\\_High\\_Speed\\_Transportation\\_Systems\\_Maglev\\_Technologies\\_in\\_Comparison\\_with\\_Steel-Wheel-Rail](http://www.researchgate.net/publication/328733747_Energy_Consumption_of_Track-Based_High_Speed_Transportation_Systems_Maglev_Technologies_in_Comparison_with_Steel-Wheel-Rail). Last accessed 06.06.2019.
13. Murakami, M., Oyama, T., Fujimoto, H., Taguchi, T., Gotah, S., Shiohara, Y., Koshizuka, N., Tamaka, S. Large levitation force due to flux pinning in YbCuO superconductors fabricated by melt-powder-melt-growth process. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1990, Vol. 29, Iss. 2–11, pp. 1991–1994. DOI: 10.1143/jjap.29.11991.
14. Wang, S., Wang, J., Wang, X., Ren, Z., Zeng, Y., Deng, C., Jiang, H., Zhu, M., Lin, G., Xu, Z., Zhu, D., Song, H. The man-loading high-temperature superconducting maglev test vehicle. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, Vol. 13, Iss. 2, pp. 2134–2137. DOI: 10.1109/tasc.2003.813017.
15. Deng, Z., Zhang, W., Zheng, J., Wang, B., Ren, Y., Zheng, X., Zhang, J. A High-temperature superconducting maglev – evacuated tube transport (HTS Maglev–ETT) test system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, Vol. 27, Iss. 6, pp. 1–8. DOI: 10.1109/tasc.2017.2716842.





## КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

**О**АО «РЖД» намерено достичь лидерства в развитии квантовых коммуникаций на железнодорожном транспорте.

Об этом заявил генеральный директор — председатель правления ОАО «РЖД» Олег Белозёров, выступая на пленарном заседании Международного железнодорожного салона пространства 1520 «PRO//Движение. ЭКСПО» «Цифровая трансформация и технологии будущего в железнодорожной отрасли».

По его словам, в ОАО «РЖД» принята «Стратегия научно-технологического развития на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года», в которой определены основные направления инновационного развития холдинга. Это создание систем управления перевозочным процессом на основе искусственного интеллекта, «интеллектуальной станции», разработка перспективных средств и технологий для путевого комплекса, принципиально новый подвижной состав, развитие системы управления безопасностью движения, тяжёловесные и высокоскоростные проекты, энергоэффективность и охрана окружающей среды.

«Мы ставим перед собой задачу быть лидерами по всем направлениям. Чтобы двигаться дальше, мы сосредоточили своё внимание на квантовых технологиях. Это направление будет прорывным для железной дороги», — сказал Олег Белозёров. Он подчеркнул, что железнодорожный транспорт всегда отличался

надёжностью и безопасностью. При этом одним из вызовов современности является обеспечение кибербезопасности.

Ключевая особенность квантовых коммуникаций — возможность построения абсолютно защищённых от «взлома» систем связи, в которых неизменность и достоверность передаваемой информации гарантируются физическими принципами, а не математическими алгоритмами, как в существующих криптографических системах. Квантовые технологии в перспективе позволят обеспечить высочайшую скорость и защищённость данных.

На железнодорожном транспорте эта технология даст возможность, в частности, создавать защищённые системы сбора данных о состоянии инфраструктуры и системы передачи управляющих сигналов, которые невозможно подменить.

В более отдалённой перспективе применение квантовых коммуникаций возможно в беспроводной связи, в том числе спутниковой.

Олег Белозёров отметил, что далеко не все технические вопросы ещё решены и требуются дальнейшие исследования, однако ОАО «РЖД» видит высокий потенциал квантовых технологий.

По информации ОАО «РЖД»: [http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE\\_ID=654&layer\\_id=4069&refererLayerId=3307&id=94388](http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE_ID=654&layer_id=4069&refererLayerId=3307&id=94388) ●

## QUANTUM COMMUNICATIONS FOR RAILWAYS

**Q**uantum communications could become a breakthrough technology for Russian Railways.

Russian Railways intends to achieve leadership in the development of quantum communications on railway transport, said Oleg Belozеров, the CEO and Chairman of the Board of Russian Railways.

Belozеров was speaking at the plenary session of the International Railway Salon of the 1520 Space PRO//Movement. EXPO, which was held under the rubric of Digital Transformation and the Technology of the Future in the Rail Industry.

According to Belozеров, Russian Railways has adopted a Strategy of Scientific and Technological Development for the Period up to 2025 and for the Future until 2030.

The Strategy identifies the main areas of the Russian Railways Holding's innovative development, which includes the creation of transport process management systems based on artificial intelligence, smart railway stations, the development of promising tools and technologies for the travel complex, fundamentally new rolling stock, the development of traffic safety management systems, heavy and high-speed projects, energy efficiency and environmental protection.

«We have set ourselves the task of being leaders on all fronts. To move on, we have focused on quantum technologies. This direction will be a breakthrough for the railways», said Oleg Belozеров.

He stressed that rail transport has always been safe and reliable. At the same time, one of the challenges of our time was cybersecurity.

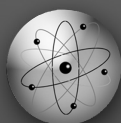
The key feature of quantum communications is the ability to build communication systems which are fully protected from hacking because the underlying physical principles guarantee the immutability and reliability of the transmitted information, rather than mathematical algorithms, as is the case in existing cryptographic systems. In the long term, quantum technologies will provide the fastest speeds and data security.

In rail transport, this technology will enable, among other things, the creation of secure systems for collecting data on the state of infrastructure and control signal transmission systems that cannot be replaced.

In the longer term, the use of quantum communications is possible in wireless communications, including satellite communications.

Oleg Belozеров also noted that not all technical issues had been solved and that further research was needed, but said that Russian Railways saw a high potential for quantum technologies.

Retrieved from JSC Russian Railways news: [http://eng.rzd.ru/newse/public/en?STRUCTURE\\_ID=15&layer\\_id=4839&refererLayerId=5074&id=107540](http://eng.rzd.ru/newse/public/en?STRUCTURE_ID=15&layer_id=4839&refererLayerId=5074&id=107540) ●

**АВТОМОБИЛИ 48**

*Запуск в холодное время года. Конденсат приводит к проблемам: как их диагностировать и избежать?*

**СТРОИТЕЛЬСТВО В КРИОЛИТОЗОНЕ 68**

*Для выбора решений требуются сложные модели, но только они обеспечивают надёжность и долговечность конструкций. Случай вертикальных столбов из щебня для укрепления насыпей.*

**СОРТИРОВОЧНАЯ ГОРКА: ВИРТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 80**

*Виртуальная сортировка ведёт к реальному экономическому эффекту.*

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ 90**

*Важны не только виртуальные, но и физические параметры. К новым высотам?*

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ 98**

*Как сделать машинное зрение более эффективным.*

**ROAD VEHICLES 58**

*Starting the engine in cold season: condensate causes problems. How can we reveal and prevent them?*

**TRANSPORT CONSTRUCTION IN CRYOLITHOZONE 74**

*Only complex modelling can ensure making optimal decisions, providing for stability and long service life of the infrastructure: a case of vertical crushed stone columns to reinforce the subsoil and subgrade.*

**GRAVITY HUMP: VIRTUAL TECHNOLOGY 85**

*Virtual marshalling results in real economic effect.*

**OPTIMISATION OF PARAMETERS 94**

*Physical parameters are no less important than virtual ones. It is the way to new heights, isn't it?*

**DIGITAL CONTROL 105**

*How to make machine vision more efficient.*



## Температурный режим системы выпуска автомобиля при пониженных температурах



Михаил БОЯРШИНОВ



Никита КУЗНЕЦОВ

*Бояршинов Михаил Геннадьевич — Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.  
Кузнецов Никита Игоревич — Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.*

В настоящее время наиболее неблагоприятной, с точки зрения риска блокировки системы выпуска накопившимся в ней конденсатом, является эксплуатация автомобилей в крупных городах в зимний период. Частые пуски в относительно короткий промежуток времени, либо пуск – короткий пробег – и последующая длительная стоянка при низких температурах опасны тем, что система выпуска отработавших газов не успевает прогреться и удалить накопившийся конденсат. Ежедневная эксплуатация в таких режимах способствует быстрому скоплению конденсата, а последующая длительная стоянка при температуре воздуха ниже 0°С опасна тем, что в зависимости от конструктивных особенностей элементов выпускной системы возможны замораживание конденсата в системе выпуска отработавших газов, образование ледяной пробки внутри либо на её выходе и, как следствие, невозможность запуска двигателя.

Учитывая то, что большая часть территории России находится в зонах умеренного и холодного климата, исследования, направленные на выявление закономерностей формирования уровня накопления конденсата в системе выпуска отработавших газов, корректирование на этой основе

периодичности удаления конденсата из системы выпуска, а также оптимизацию конструктивных параметров систем выпуска отработавших газов, более чем актуальны.

Цели данного исследования предусматривали изучение особенностей изменения температуры элементов системы выпуска отработавших газов при прогреве автомобильного двигателя в условиях пониженной окружающей температуры, а также влияния различных режимов работы обогревателя салона на температуру элементов системы выпуска отработавших газов, особенностей изменения температуры отдельных элементов системы выпуска отработавших газов в зависимости от времени для различных температур окружающего воздуха. Для этого проводились экспериментальные исследования по запуску «холодного» двигателя и его прогреву в режиме холостого хода.

Установленные закономерности могут лечь в основу разрабатываемой методики корректирования периодичности прогрева системы выпуска отработавших газов, а также модели устройства, которое будет обеспечивать отсутствие конденсата в системе выпуска при эксплуатации автомобилей в крупных городах в зимний период.

**Ключевые слова:** автомобиль, отработавшие газы, система выпуска, температурный режим, конденсат, зимний период.

\*Информация об авторах:

**Бояршинов Михаил Геннадьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, 9128841776@mail.ru.

**Кузнецов Никита Игоревич** – аспирант кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, totalgame123@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 18.03.2019, принята к публикации 24.07.2019.

For the English text of the article please see p. 58.



**В** условиях современного мегаполиса эксплуатация автомобилей характеризуется частыми короткими поездками, продолжительными простоями в заторах, длительной работой двигателя на холостом ходу и т.д. Практика показывает, что при отрицательных температурах окружающего воздуха продолжительная работа автомобильного двигателя в таких условиях не обеспечивает достаточный прогрев как самого двигателя, так и элементов и узлов системы выпуска отработавших газов. Двигатель считается полностью прогретым, когда температура всех его элементов и рабочих жидкостей выходит на рабочий режим, то есть когда при стационарной работе двигателя температуры перестанут меняться. Быстрее всего прогреваются охлаждающая жидкость и детали верхней части двигателя. Масло в поддоне двигателя греется значительно медленнее. Даже после достижения рабочей температуры охлаждающей жидкостью, температура масла двигателя не достигает рабочей. Такая же ситуация наблюдается и в каталитическом нейтрализаторе. Вследствие чего замедляется процесс выхода на требуемый уровень токсичности отработавших газов. Каталитический нейтрализатор греется от потока отработавших газов, и тем быстрее, чем больше их расход и температура. Однако при отрицательных температурах окружающей среды на режиме холостого хода каталитический нейтрализатор не выходит на рабочий режим.

При эксплуатации в зимних условиях стенки системы выпуска остаются холодными, и движущиеся по системе выпуска вместе с горячими отработанными газами водяные пары конденсируются на холодной поверхности внутри этой системы [1–3]. Как следствие, при длительной работе двигателя на низких оборотах наблюдается накопление конденсата в системе выпуска отработавших газов автомобиля [4, с. 51].

Частые запуски двигателя автомобиля на относительно короткие промежутки времени, прогрев автомобиля в зимних условиях на «автозапуске», движение в режиме коротких пробегов и последующая длительная стоянка при температуре воздуха ниже 0°С опасны тем, что возможно образование и замораживание конденсата в системе выпуска отработавших газов, образование ледяной пробки внутри либо

на её выходе и, как следствие, невозможность запуска двигателя [5, с. 10; 6, с. 3].

Влияние различных сочетаний климатических условий и интенсивности эксплуатации на накопление конденсата в системе выпуска мало изучено. Этому вопросу не уделяется должное внимание в руководствах по пользованию автомобилем. В этой связи требуется исследование описанного явления и разработка на его основе рекомендаций по поддержанию работоспособности системы выпуска отработавших газов в состоянии, обеспечивающем надёжный запуск двигателя и исправную работу автомобиля в период пониженных температур.

*Цели исследования:*

1) выявить факторы, влияющие на температуру элементов системы выпуска отработавших газов легкового автомобиля в зимний период;

2) установить закономерности влияния различных температур окружающего воздуха на температуру нагрева поверхности системы выпуска;

3) установить закономерности влияния различных режимов работы обогревателя салона на температуру нагрева поверхности системы выпуска.

В основу исследования были положены экспериментальные *методы*.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОНДЕНСАТА**

Конденсат образуется при контакте горячих отработавших газов [7–9], движущихся в системе выпуска, со стенками этой системы, имеющими температуру, близкую к температуре окружающего воздуха. В составе отработавших газов имеется вода в парообразном состоянии, образующаяся при сгорании топлива (более 1,2 кг на 1 кг сгоревшего топлива [10, с. 66]). Кроме того, водяной пар поступает в двигатель с воздухом из атмосферы (до 0,38 кг на 1 кг сгоревшего топлива в зависимости от температуры окружающего воздуха [11, с. 83]).

В работе [8, с. 99] показана зависимость содержания количества воды в отработавших газах от используемого состава топливо-воздушной смеси. Так, при давлении отработавших газов 1 бар при стехиометрических условиях доля водяного пара составляет в отработавших газах 13 %, и конденсация воды происходит при температуре,



близкой к 52°C. В смеси, в которой содержится в два раза больше воздуха, чем это необходимо для сжигания топлива, то есть при коэффициенте избытка воздуха, равном двум, концентрация водяного пара достигает 6 %, при этом точка росы понижается до 36°C. Наиболее высокие значения температуры точки росы соответствуют стехиометрическим условиям, когда избыток воздуха отсутствует или имеется избыток топлива, вследствие чего не происходит обеднение топливной смеси.

При охлаждении отработавшего газа имеющийся избыток воды осаждается на относительно холодные стенки системы выпуска и накапливается в системе.

Очевидно, что накопление конденсата не происходит в случае прогрева стенок системы выпуска отработавших газов до температур, при которых водяные пары, находящиеся в контакте со стенками выпускной системы, не охлаждаются до температуры точки росы. Соответственно, не происходит конденсация влаги на стенках выпускной системы. Требуемый прогрев достигается, когда двигатель автомобиля работает при достаточной нагрузке, сопровождающейся испарением образовавшегося конденсата и выбросом отработавших газов, содержащих воду в парообразном состоянии, из выпускной системы, то есть при поездках на продолжительные расстояния или при движении на скоростных участках.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СТАДИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку основной причиной образования конденсата внутри системы выпуска является разность температур отработавших газов и стенок газоотводных каналов, авторами выполнен ряд экспериментов по определению температуры элементов системы выпускного тракта во время прогрева двигателя при его работе на холостом ходу.

Измерение температуры элементов выпускной системы производилось с использованием специального оборудования [12, с. 7]:

- модуля ввода аналоговых сигналов ОВЕН МВ110-8А, предназначенного для считывания и преобразования электрического сигнала с датчиков измерения температуры в градусы Цельсия;

- автоматического преобразователя интерфейсов USB/RS-485 ОВЕН АС4, осуществляющего связь между модулем ввода ОВЕН МВ 110-8А и персональным компьютером, используемым для сбора, хранения, преобразования, отображения результатов экспериментального исследования;

- термопар с рабочим диапазоном измеряемых температур от -50 до +500°C, используемых для измерения температуры элементов выпускной системы отработанных газов;

- программного обеспечения SCADA OwenProcessManager (OPM), выполняющего обмен данными в режиме реального времени с устройствами ОВЕН, подключёнными через преобразователи интерфейсов ОВЕН АС4.

В процессе экспериментальных исследований изучалось влияние на температуру элементов системы выпуска легкового автомобиля в зимний период основных факторов:

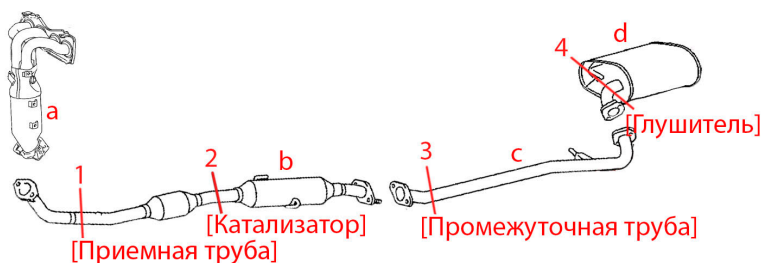
- температуры окружающей среды в диапазоне от -23°C до +9°C;

- частоты вращения коленчатого вала двигателя в режиме пуска и прогрева на холостом ходу в диапазоне от 750 до 1500 об/мин;

- режима работы вентилятора обогрева салона автомобиля в диапазоне от неработающего состояния до максимальной скорости вращения.

Последовательность проведения экспериментального исследования состояла в запуске «холодного» двигателя, температура которого (как и температура системы выпуска) равна температуре окружающего воздуха, и работе двигателя в режиме холостого хода в течение 30 минут. Одновременно с запуском двигателя регистрировалась температура элементов системы выпуска отработавших газов. Опыт практической эксплуатации автомобиля показывает, что в большинстве случаев этого времени достаточно для прогрева двигателя до рабочей температуры.

Из анализа результатов рассмотренных работ следует, что наиболее приемлемым методом измерения является контактный метод измерения с помощью термопар и термометров сопротивления. В работе по измерению температуры поверхности си-



**Рис. 1. Точки установки термопар на поверхности системы выпуска:**  
**1 – приёмная труба; 2 – катализатор; 3 – промежуточная труба; 4 – глушитель.**

**Таблица 1**

**Условия проведения экспериментальных исследований**

№ испытания	Температура окружающей среды	Влажность воздуха	Скорость ветра <sup>1</sup>	Режим работы обогревателя <sup>2</sup>
1	+9°C	36 %	3 м/с	1/7
2	+5°C	40 %	1 м/с	1/7
3	0°C	50 %	2 м/с	1/7
4	-4°C	62 %	1 м/с	1/7
5	-8°C	60 %	1 м/с	1/7
6	-16°C	75 %	3 м/с	1/7
7	-23°C	71 %	3 м/с	1/7

<sup>1</sup> Индикативно, так как эксперименты проводились на защищённом от ветра пространстве.

<sup>2</sup> 1/7 – первый (минимальный) из семи возможных режимов работы обогревателя.

системы выпуска отработавших газов использовались термопары.

Запись показаний термопар выполнялась при различных температурах окружающего воздуха и различных режимах работы обогревателя салона.

Для уменьшения влияния вторичных факторов на процесс нагрева/охлаждения элементов легкового автомобиля эксперименты проводились на территории, защищённой от ветра. Перед началом измерений обеспечивалось равенство температуры системы выпуска и других деталей автомобиля температуре окружающего воздуха, для чего перед началом измерений автомобиль выдерживался на площадке не менее восьми часов.

Экспериментальное исследование проводилось для элементов системы выпуска отработавших газов автомобиля «Toyota Camry», состоящей (рис. 1) из выпускного коллектора (поз. а), который одновременно выполняет функцию предварительного каталитического нейтрализатора; средней части системы выпуска, состоящей из нижнего катализатора и переднего глушителя (поз. б); промежуточной трубы (поз. с) и

заднего глушителя (поз. d). Термопары 1–4 (рис. 1) были установлены на внешней поверхности элементов системы выпуска.

В таблице 1 указаны условия проведения экспериментов по измерению температуры элементов выпускной системы отработавших газов. Во время проведения экспериментальных исследований автоматический режим работы обогревателя (климат-контроль) был отключён.

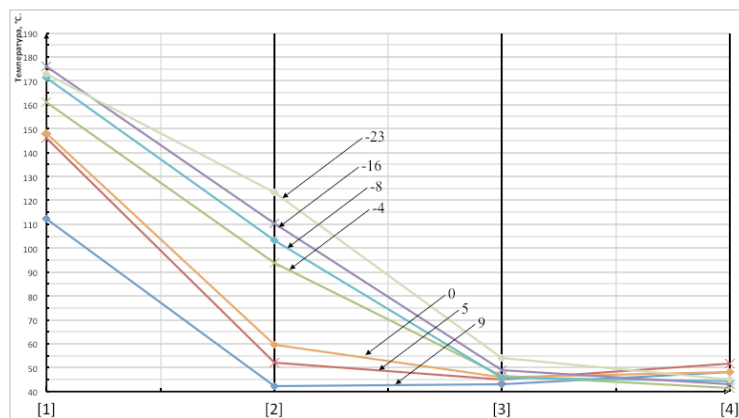
Результаты измерения температуры элементов системы выпуска отработавших газов в зависимости от времени и расположения термопар для некоторых температур окружающего воздуха представлены на рис. 2.

Полученные результаты измерений показывают, что при всех отрицательных температурах окружающего воздуха распределение температуры разных элементов системы выпуска отработавших газов носит однотипный характер. В первой точке измерения имеется интенсивное повышение температуры при прогреве двигателя.

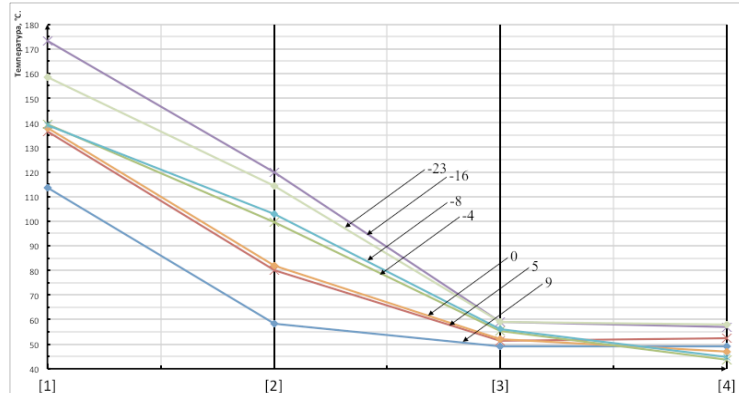
Наблюдается последовательное понижение температуры от места расположения первого термоэлемента к последнему, что



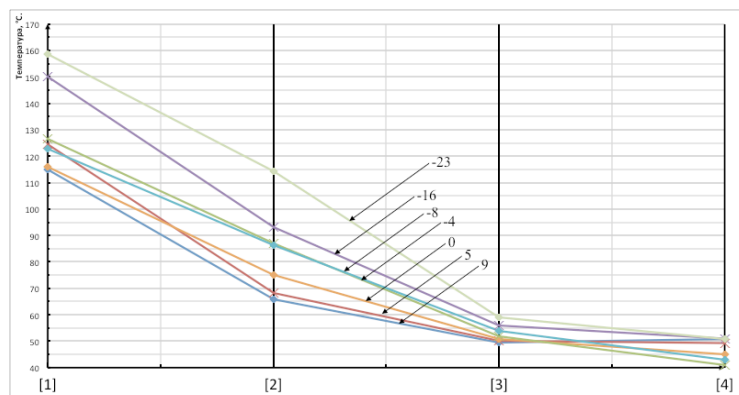
а)



б)



в)



**Рис. 2.** Температуры поверхности системы выпуска при работе двигателя на холостом ходу; время прогрева: а – 10 минут; б – 20 минут; в – 30 минут; числами над кривыми обозначена температура окружающего воздуха; в квадратных скобках указано положение термопар согласно схеме на рис. 1.

вполне соответствует физическому представлению об охлаждении отработавшего газа по мере его продвижения от выпускного коллектора (температура наружной стенки 115–175°C в зависимости от внешней температуры) к заднему глушителю (температура 40–58°C). В конце рассматриваемого 30-минутного отрезка времени наблюдается общее небольшое понижение и выравнивание температуры поверхности выпускной системы.

Установлены некоторые закономерности влияния температуры окружающего воздуха на температуру нагрева поверхности системы выпуска:

- наименьший прогрев стенок системы выпуска отработавших газов наблюдается при положительных температурах окружающего воздуха;
- при понижении отрицательных значений температуры окружающего воздуха отмечается рост температуры



поверхности системы выпуска (рис. 2, точки 1, 2, 3).

Повышение температуры поверхности системы выпуска при понижении отрицательной температуры окружающего воздуха обусловлено, по-видимому, более поздним выходом двигателя на рабочий тепловой режим: если при запуске двигателя охлаждающая жидкость имеет более низкую температуру, соответствующую температуре окружающего воздуха, то прогрев двигателя требует более длительного времени. Нагрев охлаждающей жидкости и самого двигателя требует более продолжительной его работы при повышенной частоте вращения коленчатого вала, чем это требуется при более высоких температурах окружающего воздуха.

При повышенных оборотах двигателя через выпускную систему автомобиля проходит больший объём горячих отработавших газов, интенсивно нагревающих элементы выпускной системы, и это приводит к более высокой температуре поверхности выпускной системы.

В то же время по мере понижения температуры окружающей среды температура в точке 4 также снижается, и это может быть связано с тем, что глушитель системы выпуска имеет значительный объём и при низких температурах во время работы на холостом ходу прогревается незначительно.

На рис. 3 представлены данные о зависимости температуры поверхности системы выпуска от температуры окружающего воздуха на разных временных этапах работы двигателя на холостом ходу. Из сравнения кривых, представленных на этом рисунке, следует что:

- в области расположения первой термопары (рис. 3, кривая 1) система выпуска нагревается до температуры 110–176°С, обеспечивающей испарение и вынос скопившегося ранее конденсата с потоком отработанных газов (температура поверхности превышает температуру кипения воды) во всём исследованном диапазоне температуры окружающего воздуха;
- в месте расположения второй термопары (рис. 3, кривая 2) система выпуска нагревается до температуры 92–122°С при отрицательных значениях температуры воздуха и до 42–83°С – при положительных температурах; в последнем случае сохраня-

ется возможность конденсации и накопления влаги в системе выпуска, и это может приводить к замораживанию скапливающегося конденсата при снижении температуры до отрицательной;

- в районе размещения третьей и четвёртой термопар элементы выпускной системы прогреваются до температуры не выше 60°С; в этих областях возникают благоприятные условия для образования и скапливания конденсата во всем диапазоне рассмотренных температур окружающего воздуха.

На рис. 4 показана зависимость температуры поверхности элементов системы выпуска, на которых установлены термопары, от времени, причём для различных значений температуры окружающего воздуха при работе двигателя на холостом ходу:

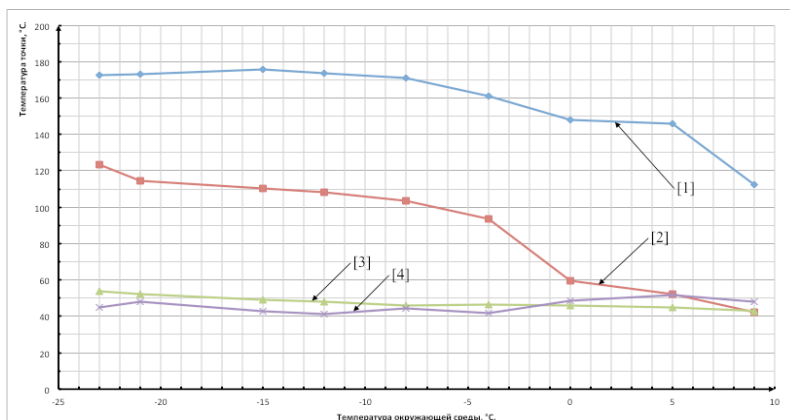
- при температуре окружающего воздуха от -4°С до -15°С отмечается наличие максимумов температуры нагрева элементов системы выпуска отработавшими газами во время неустойчивого режима работы двигателя (рис. 4б, в, г) и понижение температуры этих элементов к концу рассматриваемого 30-минутного периода с дальнейшим выходом на стационарный тепловой режим;
- при температуре окружающего воздуха от -21°С до -23°С температура поверхности системы выпуска в контрольных точках быстро достигает стационарных значений и практически не изменяется в течение рассматриваемого отрезка времени.

Влияние режимов работы обогревателя салона на температуру элементов системы выпуска отработавших газов показано на рис. 5. Обозначение 7/7 соответствует максимальной частоте вращения лопастей вентилятора; обозначение 0/7 соответствует выключенному вентилятору. Во время рассматриваемых испытаний температура воздуха составляла -8°С.

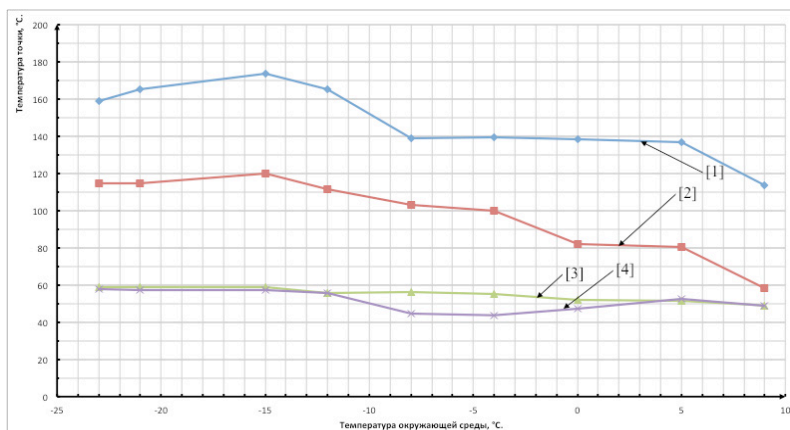
В зоне расположения первой термопары через 30 минут (рис. 5в) температура достигает 120°С при выключенном обогревателе и 190°С – при режиме работы обогревателя 7/7; в зоне размещения второго термоэлемента соответственно 80°С и 147°С, в зоне расположения третьего термоэлемента соответственно 52°С и 85°С при указанных режимах обогрева салона.



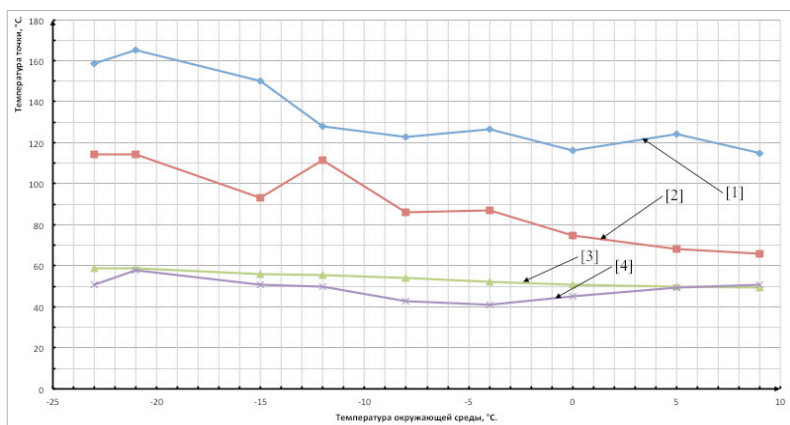
а)



б)



в)



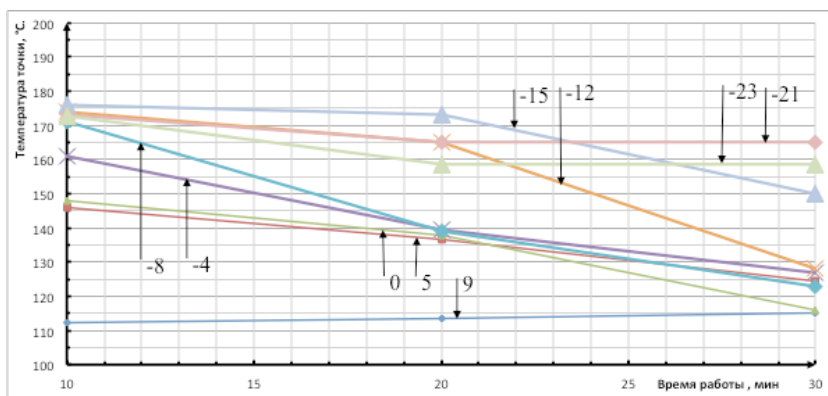
**Рис. 3. Зависимость температуры поверхности системы выпуска от температуры окружающего воздуха при работе двигателя на холостом ходу; время работы двигателя: а – 10 минут; б – 20 минут; в – 30 минут; в квадратных скобках указаны положения термопар согласно схеме на рис. 1.**

Следует обратить внимание на более поздний выход двигателя на рабочий режим и повышение температуры элементов системы выпуска отработанных газов с увеличением числа оборотов вентилятора обогревателя салона при постоянной температуре окружающего воздуха. Более длительный выход двигателя на рабочий

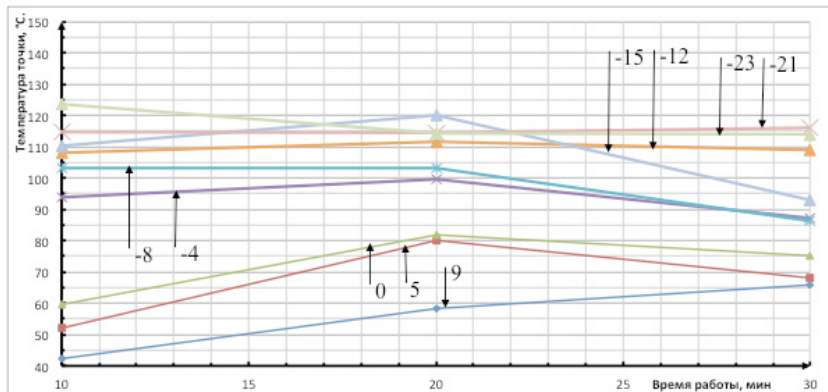
тепловой режим объясняется тем, что циркулирующая охлаждающая жидкость, нагревая воздух в салоне автомобиля, сама охлаждается в радиаторе обогревателя, тем самым замедляя прогрев работающего двигателя.

В частности, при увеличении скорости вращения вентилятора обогревателя сало-

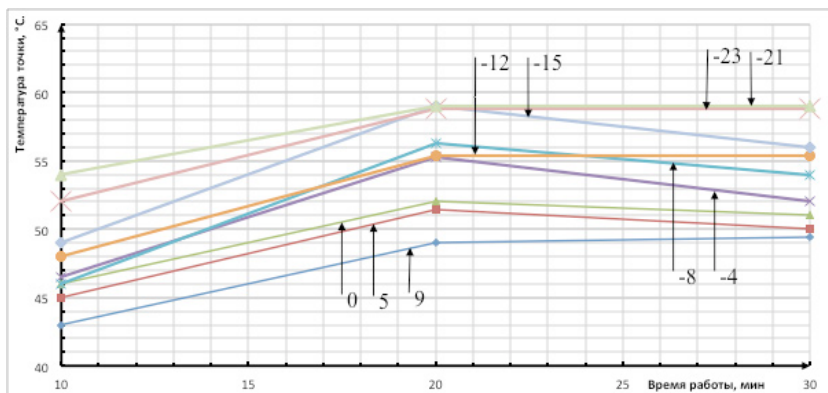
а)



б)



в)



г)

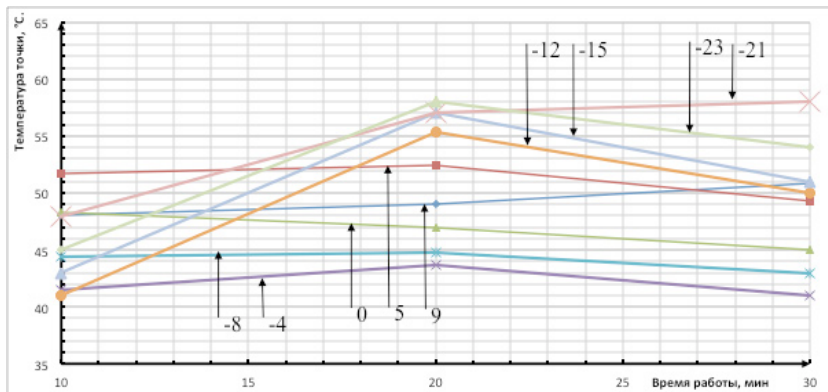
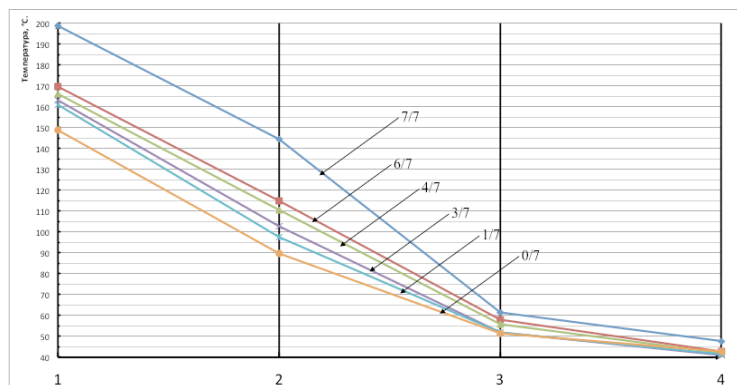
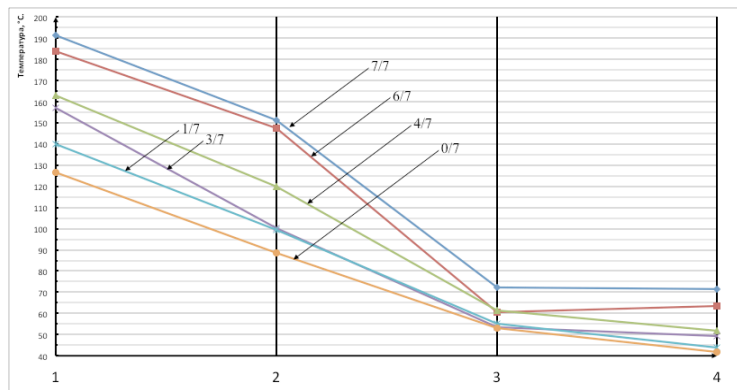


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности элементов системы выпуска от времени при работе двигателя на холостом ходу: а – приёмная труба, б – катализатор, в – промежуточная труба, г – глушитель.

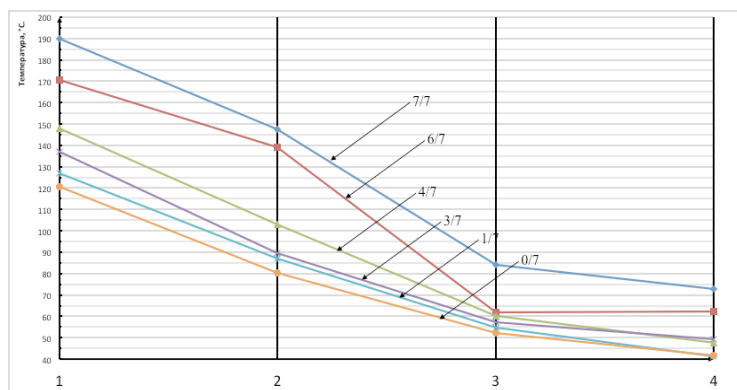
а)



б)



в)



**Рис. 5. Зависимость температуры поверхности элементов системы выпуска от положения термодатчиков (числа на оси) и режимов работы обогревателя салона: время прогрева: а – 10 минут; б – 20 минут; в – 30 минут; дроби – режимы работы обогревателя салона (пояснение в тексте).**

на, отбор тепла у охлаждающей жидкости в радиаторе обогревателя происходит интенсивнее, и, соответственно, прогрев двигателя даже при повышенных оборотах холостого хода происходит медленнее.

Вместе с тем, при повышенных оборотах двигателя за тот же промежуток времени через выпускную систему автомобиля проходит больший объем горячих отработавших газов, интенсивно нагревающих элементы выпускной системы, что приводит к повышению значений температуры поверхности

элементов выпускной системы. Таким образом, зафиксирована связь повышения температуры поверхности элементов системы выпуска при увеличении числа оборотов вентилятора обогревателя салона.

Следует отметить, что поскольку увеличение скорости вращения вентилятора обогревателя салона приводит к увеличению продолжительности прогрева двигателя автомобиля до рабочей температуры, на современных автомобилях предусмотрена возможность отключения вентилятора обо-



гревателя салона в первые минуты запуска двигателя при пониженных температурах окружающей среды, что способствует более быстрому выходу самого двигателя на рабочий тепловой режим.

Проведённые экспериментальные исследования позволили дополнительно установить:

- на остывание системы выпуска до температуры окружающего воздуха требуется от 3 до 4 часов в зависимости от температуры окружающего воздуха;
- при отрицательной температуре окружающего воздуха задний глушитель системы выпуска отработанных газов рассмотренного автомобиля не способен прогреться при работе двигателя на холостом ходу до температуры 100°C.

## ВЫВОДЫ

Выполнено экспериментальное исследование по определению температуры элементов системы выпуска отработавших газов на этапе неуставившейся работы автомобильного двигателя при пониженных температурах. В экспериментальном исследовании установлено, что:

- понижение температуры окружающего воздуха приводит к замедлению прогресса двигателя автомобиля и одновременно к возрастанию температуры элементов системы выпуска;
- повышение скорости работы вентилятора обогревателя салона приводит к понижению температуры охлаждающей жидкости, способствует повышению температуры элементов системы выпуска и одновременно увеличению времени выхода двигателя на рабочий режим.

Ценность установленных закономерностей может лечь в основу разрабатываемой методики корректирования периодичности прогрева системы выпуска отработавших газов, применение которой снижает затраты на контроль технического состояния системы выпуска и затраты, возникающие в случае неудавшегося пуска ДВС в холодных климатических условиях. Также практическая ценность заключается в обосновании разработки модели устройства, которое будет обеспечивать отсутствие конденсата в системе выпуска при эксплуатации автомобилей в крупных городах в зимний период.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Silencers & pipes. [Электронный ресурс]: <https://www.ernst-hagen.de/en/products/silencers-pipes/>. Доступ 18.03.2019.
2. Кузнецов Н. И., Петухов М. Ю., Хазиев А. А. Разработка рекомендаций по эксплуатации автомобилей в условиях мегаполиса // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сб. науч. тр. по материалам 72-й науч.-метод. и науч.-исслед. конф. МАДИ. — М.: МАДИ, 2014. — С. 227–233.
3. Кузнецов Н. И., Петухов М. Ю., Шелудяков А. М. Об особенностях запуска двигателя легкового автомобиля в современном мегаполисе при низких температурах окружающей среды // Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 1. — С. 137–143.
4. Kuznetsov N. I., Petukhov M. Yu., Khaziev A. A., Laushkin A. V. Problem of Accumulation and Freezing of Condensate in the Exhaust Gases of Cars at Low Temperatures // Applied Mechanics and Materials. — June 2016. — Vol. 838. — pp. 47–55. [Электронный ресурс]: <https://www.scientific.net/AMM.838.47>. — DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.838.47>.
5. Судебные и нормативные акты РФ. Решение суда № 2-1747/2015 2-1747/2015~М-374/2015 М-374/2015 от 24 июля 2015 г. по делу № 2-1747/2015. Октябрьский районный суд г. Уфы (Республика Башкортостан). [Электронный ресурс]: <http://sudact.ru/regular/doc/UP2TFt0dJ9Vj/>. Доступ 18.03.2019.
6. Судебные и нормативные акты РФ. Решение № 2-6/2011 от 13 апреля 2011 г. по делу № 2-6/2011. Курчатовский районный суд г. Челябинска. [Электронный ресурс]: <http://sudact.ru/regular/doc/p7OrtXeRoBdy/>. Доступ 18.03.2019.
7. Heil B., Enderle C., Herwig H., Strohmer E., Margadant A., Ruth W. The Exhaust System of the Mercedes SL500. — MTZ worldwide. — January 2002. — Vol. 63. — Iss. 1. — pp. 2–5. [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1007/BF03227514>. Доступ 18.03.2019.
8. González N. G. Condensation in Exhaust Gas Coolers. In: Junior C., Jänsch D., Dingel O. (eds). — Energy and Thermal Management, Air Conditioning, Waste Heat Recovery. — ETA 2016. — Springer, Cham. — 2017. [Электронный ресурс]: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47196-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47196-9_9). Доступ 18.03.2019.
9. Hashimoto R., Mori G., Yasir M., Tröger U., Wieser H. Impact of Condensates Containing Chloride and Sulphate on the Corrosion in Automotive Exhaust Systems. — BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. — September 2013. — Vol. 158 (9). — pp. 377–383. — Springer-Verlag Wien. — <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-013-0180-6>.
10. Лаушкин А. В., Хазиев А. А. Причины обводнения моторного масла в эксплуатации // Вестник МАДИ. — 2012. — № 1. — С. 63–67.
11. Кузнецов Н. И. Количественная оценка содержания в отработавших газах воды, поступающей в двигатель с атмосферным воздухом // Вестник ПНИПУ. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2017. — № 1. — С. 77–87. — DOI: 10.15593/24111678/2017.01.06.
12. Бояршинов М. Г., Лобов Н. В., Кузнецов Н. И., Мартемьянов А. О. Температурный режим системы выпуска отработанных газов автомобиля в условиях пониженных температур // Вестник ПНИПУ. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2018. — № 3. — С. 5–16. DOI: 10.15593/24111678/2018.03.01





# Thermal Regime of Automobile Exhaust System at Low Temperature



Mikhail G. BOYARSHINOV

Nikita I. KUZNETSOV

*Boyarshinov, Mikhail G. – Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.*

*Kuznetsov, Nikita I. – Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia\*.*

## ABSTRACT

Currently operation of cars in large cities in winter is the most unfavorable from the point of view of the risk of blocking the exhaust system by condensate accumulated in it. Frequent starts during relatively short period of time, or the cycle of start-up – short run – and subsequent long-term parking at low temperatures are dangerous because the exhaust system does not have time to warm up and remove the accumulated condensate. Daily operation in such modes contributes to rapid accumulation of condensate, and subsequent long-term parking at ambient temperatures below 0°C are equally dangerous because, depending on the design features of the exhaust system elements, condensation may occur and freeze in the exhaust system, icing can occur inside it or at its exit, causing inability to start the engine.

Given that most of the territory of Russia is located in the areas of moderate and cold climate, the relevance of studies, aimed at identifying the patterns of condensate formation and accumulation in the exhaust system, at

adjusting on this basis the frequency of condensate removal from the exhaust system, as well as at optimizing the design parameters of the exhaust systems, is quite evident.

The objectives of this study were: to identify the features of changes in temperature of the elements of the exhaust system when the automobile engine warms up at low ambient temperature, the effect of various modes of the heater operation on the temperature of the elements of the exhaust system, as well as the features of the temperature change of individual elements of the exhaust system depending on time for various ambient temperatures.

To achieve those objectives a series of experiments has been conducted to study the process of starting the «cold» engine, and of its warming up in idle mode.

The found dependencies can be used to develop methodology to adjust the recommended periodicity of warming up of the exhaust system, as well as a model of a device that will ensure the absence of condensate in exhaust systems during the operation of cars in large cities during winter period.

**Keywords:** car, automobile, exhaust gases, exhaust system, thermal regime, condensate, winter period.

\*Information about the authors:

**Boyarshinov, Mikhail G.** – D.Sc. (Eng), professor, head of the department of cars and technological machines of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, 9128841776@mail.ru.

**Kuznetsov, Nikita I.** – Ph.D. student at the department of cars and technological machines of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, totalgame123@gmail.com.

Article received 18.03.2019, accepted 24.07.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 48.

**Introduction.** In a modern metropolis, car operation is characterized by frequent short trips, prolonged downtime in traffic jams, prolonged engine idling, etc. Practices show that at low ambient temperatures, continuous operation of an automobile engine under such conditions does not provide sufficient heating of either the engine itself or of the elements and components of the exhaust system. The engine is considered fully warmed up when the temperature of all its elements and working fluids enters the operating mode, that is, during stationary operation of the engine, the temperatures ceases to change. Warming up of coolant and parts of the upper part of the engine is the quickest. Oil in the oil pan heats up much more slowly. Even after the coolant reaches operating temperature, the engine oil temperature does not reach the operating temperature. The same situation is observed in the catalytic converter. As a result, the process of reaching the required level of exhaust emissions is slowed down. The catalytic converter is heated by the flow of exhaust gases, and the greater are their flow rate and temperature, faster it is heated. However, at negative ambient temperatures, at idle mode, the catalytic converter does not enter the operating mode.

During wintertime operation, the walls of the exhaust system remain cold, and water vapor moving along the exhaust system along with hot exhaust gases condenses on a cold surface inside this system [1–3]. As a result, during prolonged operation of the engine at low speeds, condensate accumulation is observed in the exhaust system of the car [4, p. 51].

Frequent starts of the car engine for relatively short periods of time, warming up the car in winter conditions through remote starting, driving in short-run mode and subsequent long-term parking at air temperatures below 0°C are dangerous because condensation can appear and freeze in the exhaust system. A formation of an ice plug inside it or at its outlet is also possible, causing inability to start the engine [5, p. 10; 6, p. 3].

The influence of various combinations of climatic conditions and operating intensity on accumulation of condensate

in the exhaust system has not been enough studied. This issue misses due attention in car manuals. In this regard, it is necessary to study the described phenomenon and to develop, on the basis of research, recommendations for maintaining operability of the exhaust system in a state that ensures reliable engine start and proper operation of the vehicle during low temperatures period.

**Objectives** of the study were:

1) to identify factors affecting the temperature of the elements of the exhaust system of a passenger car in winter;

2) to establish the laws of influence of various ambient temperatures on the heating temperature of the surface of the exhaust system;

3) to establish the patterns of influence of various modes of operation of the heater of a passenger compartment on the temperature of the heating of the surface of the exhaust system.

**Methods.** A series of experiments has been conducted to study the process of starting of a «cold» engine, and of its consequent warming up at the idle mode for 30 minutes. Simultaneously with the engine starting, the temperature of the elements of the exhaust system was recorded. To measure the surface temperature of the exhaust system, the contact method of measurement using thermocouples was used.

## Results.

### Physical conditions for condensation

Condensate is formed upon contact of hot exhaust gases [7–9] moving in the exhaust system with the walls of this system having a temperature close to the temperature of the ambient air. The exhaust gases contain water in the vapor state that is formed during combustion of fuel (more than 1,2 kg per 1 kg of burnt fuel [10, p. 66]). Besides, water vapor enters the engine with air from the atmosphere (up to 0,38 kg per 1 kg of burnt fuel, depending on the ambient temperature [11, p. 83]).

The work [8, p. 99] showed the dependence of the amount of water in the exhaust gases on the composition of the fuel-air mixture used. So, with an exhaust gas pressure of 1 bar under stoichiometric conditions, the proportion of water vapor in



the exhaust gases is 13 %, and water condensation occurs at a temperature close to 52°C. In a mixture that contains twice as much air than it is necessary for burning fuel, that is, with an excess air coefficient of two, concentration of water vapor reaches 6 %, while the dew point drops to 36°C. The highest dew point temperatures correspond to stoichiometric conditions when there is no excess air, or when there is an excess of fuel, as a result of which there is no depletion of the fuel mixture.

When the exhaust gas is cooled, the excess water present is deposited on the relatively cold walls of the exhaust system and accumulates in the system.

Obviously, condensate does not accumulate if the walls of the exhaust system are heated to temperatures at which water vapor in contact with the walls of the exhaust system does not cool to the dew point temperature. Accordingly, moisture does not condense on the walls of the exhaust system. The required heating is achieved when the car engine is running under a sufficient load, accompanied by evaporation of the formed condensate and emission of exhaust gases containing water in a vapor state from the exhaust system, i.e. when traveling for long distances or when driving in high-speed sections.

#### **The experimental stage of the study**

Since the main reason for formation of condensate inside the exhaust system is the temperature difference between the exhaust gases and the walls of the exhaust ducts, the authors have conducted a series of experiments to determine the temperature of the elements of the exhaust duct system during engine warm-up when it is idling.

The temperature of the elements of the exhaust system was measured using special equipment [12, p. 7]:

- an analogue input module OWEN MV110-8A, designed to read and convert an electrical signal from temperature sensors to degrees Celsius;
- an automatic converter of USB/RS-485 OWEN AS4 interfaces, which communicates between OWEN MB 110-8A input module and a personal computer used to collect, store, convert, display experimental research results;
- thermocouple with an operating temperature range from -50 to +500°C used

to measure the temperature of the elements of the exhaust system;

- SCADA OwenProcessManager (OPM) software that performs real-time data exchange with OWEN devices connected via OWEN AS4 interface converters.

In the process of experimental research, the influence of the main factors on the temperature of the elements of a passenger car exhaust system in winter was studied. The studied factors were:

- ambient temperature in the range from -23°C to +9°C;
- frequency of rotation of the crankshaft in idle start-up and warm-up modes in the range from 750 to 1500 rpm;
- operation mode of the fan of the heater of the passenger compartment of the car in the range from the inoperative state to the maximum rotation speed.

The sequence of the experimental study consisted in starting a «cold» engine, the temperature of which (like the temperature of the exhaust system) is equal to the temperature of the ambient air, and in operating the engine in the idle mode for 30 minutes. Simultaneously with the engine starting, the temperature of the elements of the exhaust system was recorded. The experience of the practical operation of the car shows that in most cases this time is enough to warm the engine to operating temperature.

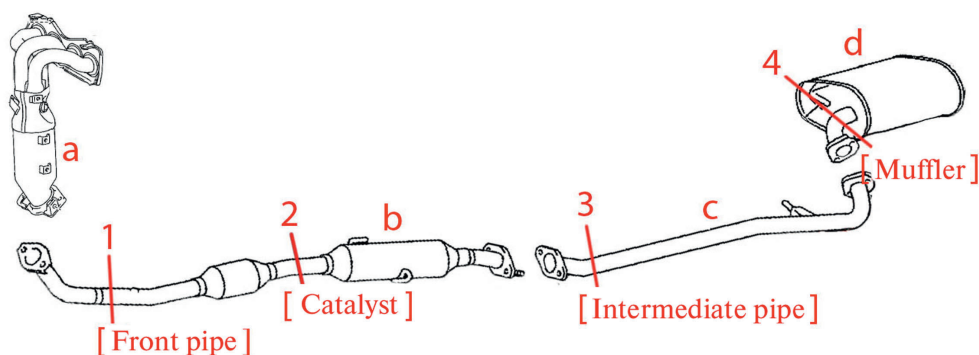
From the analysis of the results of the considered works, it follows that the most acceptable measurement method is the contact measurement method using thermocouples and resistance thermometers. Thermocouples were used to measure the surface temperature of the exhaust system.

Thermocouple readings were recorded at various ambient temperatures and various modes of operation of the interior heater.

To reduce the influence of secondary factors on the heating/cooling process of passenger car elements, experiments were carried out in a territory protected from the wind. Before the start of the measurements, the temperature of the exhaust system and other parts of the car was equal to the ambient temperature, to obtain those conditions the vehicle had been kept at the site for at least eight hours before the measurements.

An experimental study was carried out for elements of the exhaust system of the exhaust





**Pic. 1. Installation points of thermocouples on the surface of the exhaust system:**  
1 – front pipe; 2 – catalyst; 3 – intermediate pipe; 4 – muffler.

system of a Toyota Camry car, consisting (Pic. 1) of an exhaust manifold (pos. a), which simultaneously serves as a preliminary catalytic converter; middle part of the exhaust system, consisting of lower catalyst and front muffler (pos. b); intermediate pipe (pos. c) and rear muffler (pos. d). Thermocouples 1–4 (Pic. 1) were installed on the outer surface of the elements of the exhaust system.

Table 1 shows the test conditions for measuring the temperature of the elements of the exhaust system. During experiments, the automatic operation of the heater (climate control) was turned off.

The results of measuring the temperature of the elements of the exhaust system depending on time and location of the thermocouples for some ambient temperatures are presented in Pic. 2.

The obtained measurement results show that at all negative ambient temperatures, the temperature distribution of various elements of the exhaust system is of the same type. At the first measurement point, there is an intense increase in temperature when the engine is warming up.

A gradual decrease in temperature is observed from location of the first thermocouple to the last one, which is consistent with the physical idea of cooling the exhaust gas as it moves from the exhaust manifold (outer wall temperature was of 115–175°C depending on the external temperature) to the rear muffler (temperature was of 40–58°C). At the end of the considered 30-minute period of time, there is a general slight decrease and equalization of the surface temperature of the exhaust system.

**Table 1**

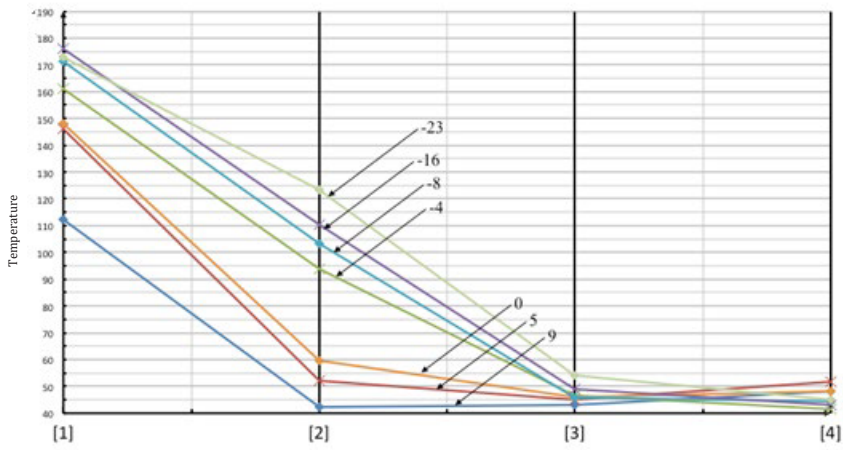
### Experimental conditions

No. test	Ambient temperature	Air humidity	Wind speed <sup>1</sup>	Heater mode <sup>2</sup>
1	+9°C	36 %	3 m/s	1/7
2	+5°C	40 %	1 m/s	1/7
3	0°C	50 %	2 m/s	1/7
4	-4°C	62 %	1 m/s	1/7
5	-8°C	60 %	1 m/s	1/7
6	-16°C	75 %	3 m/s	1/7
7	-23°C	71 %	3 m/s	1/7

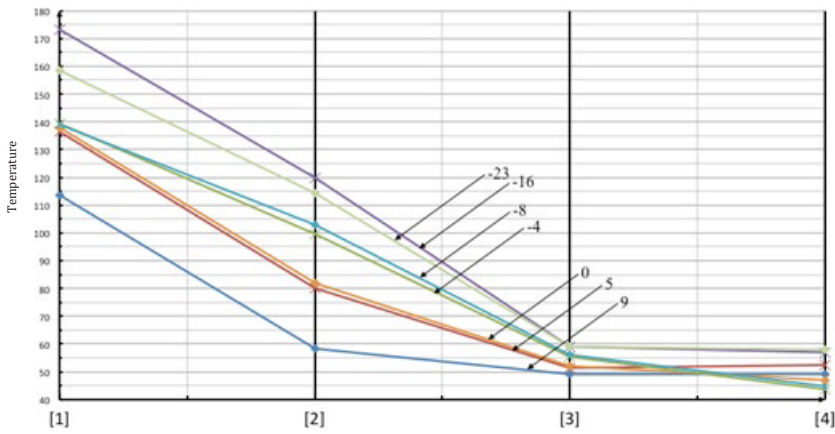
<sup>1</sup> It is indicative, since the experiments were conducted in a space protected from wind.

<sup>2</sup> 1/7 – first (minimum) of seven possible heater modes.

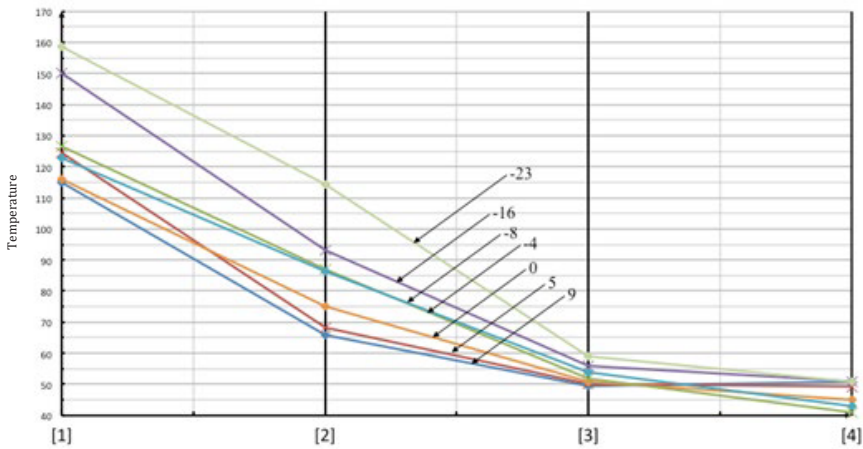




a)

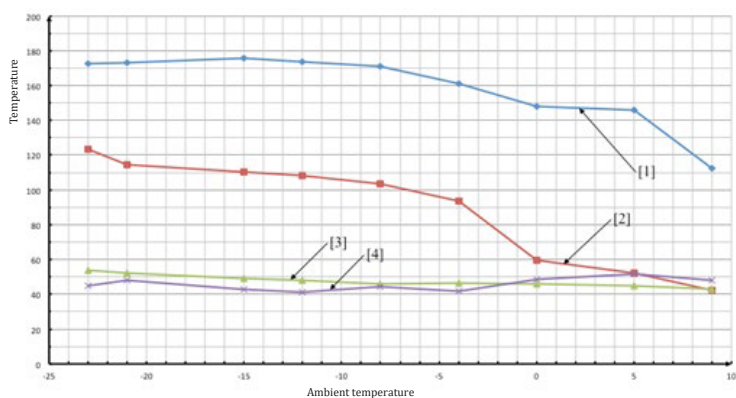


b)

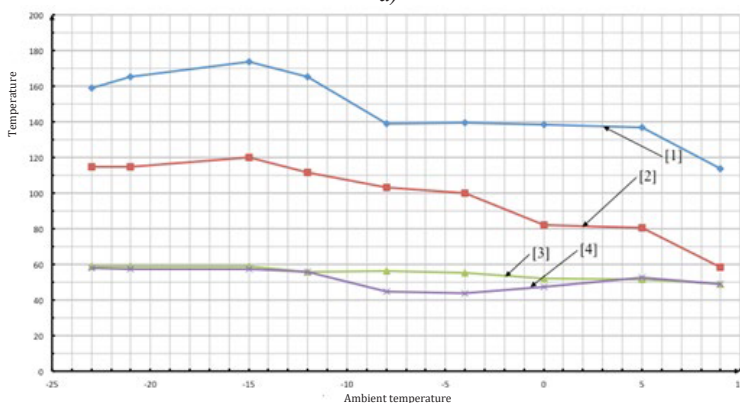


c)

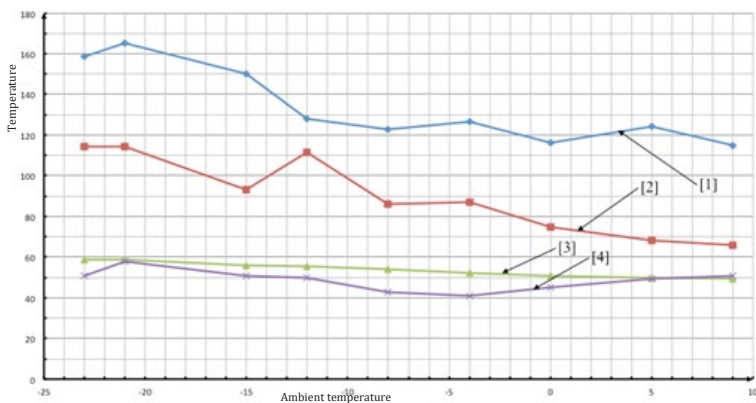
**Pic. 2. The surface temperature of the exhaust system when the engine is idling; warm-up time: a – 10 minutes; b – 20 minutes; c – 30 minutes; the numbers above the curves indicate the ambient temperature; the square brackets indicate the position of the thermocouples according to the chart in Pic. 1.**



a)



b)



c)

**Pic. 3. The dependence of the surface temperature of the exhaust system on ambient temperature when the engine is idling; engine operating time: a – 10 minutes; b – 20 minutes; c – 30 minutes; the square brackets indicate the positions of thermocouples according to the chart in Pic. 1.**

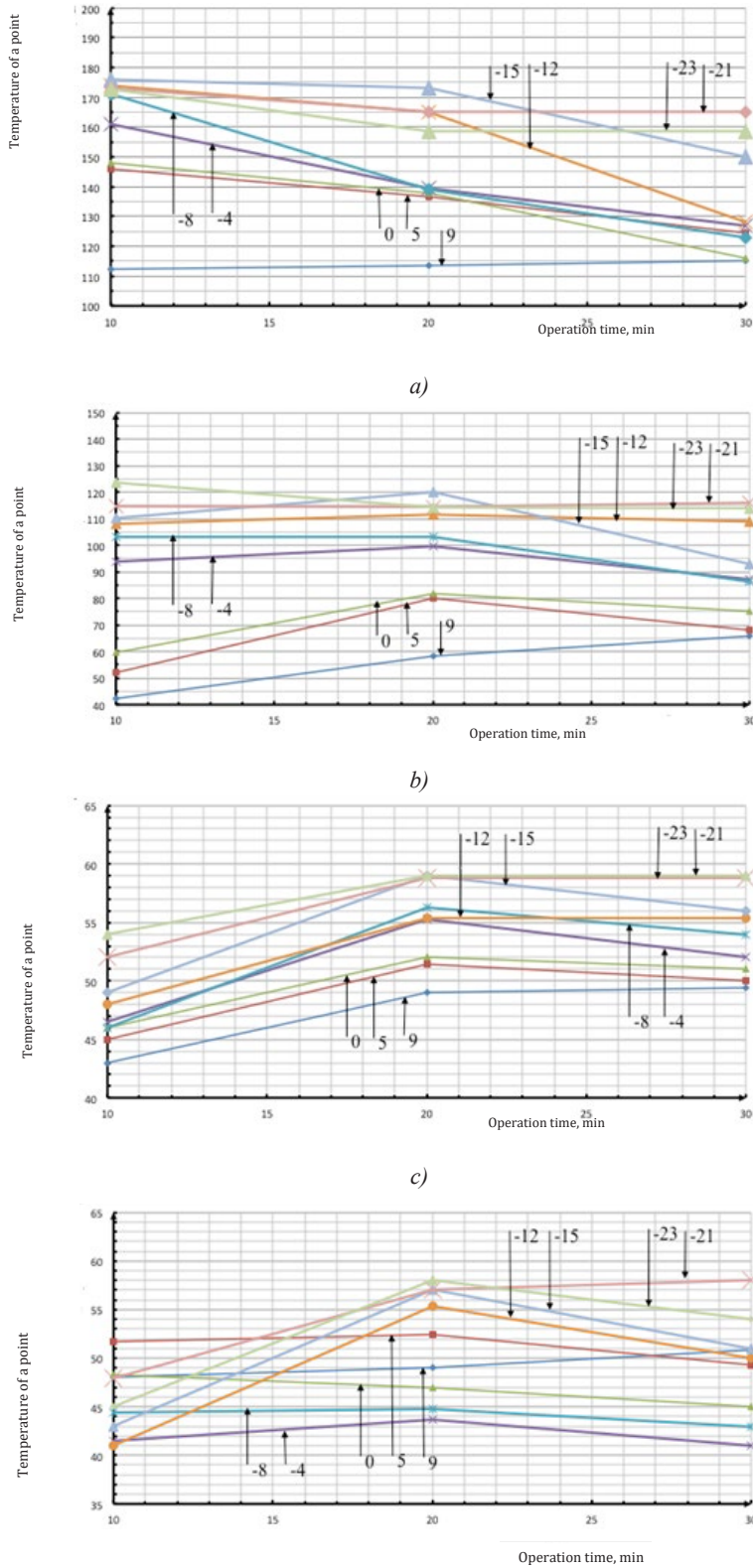
Some regularities of influence of ambient temperature on the heating temperature of the surface of the exhaust system are identified:

- the smallest heating of the walls of the exhaust system is observed at positive ambient temperatures;

- with a decrease in negative values of the ambient temperature, an increase in the surface temperature of the exhaust system is noted (Pic. 2, points 1, 2, 3).

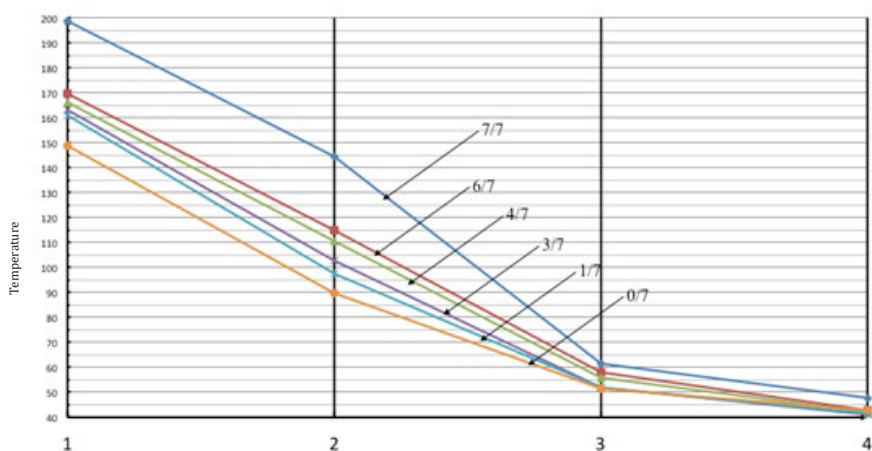
The increase in the surface temperature of the exhaust system with a decrease in the negative ambient temperature is apparently



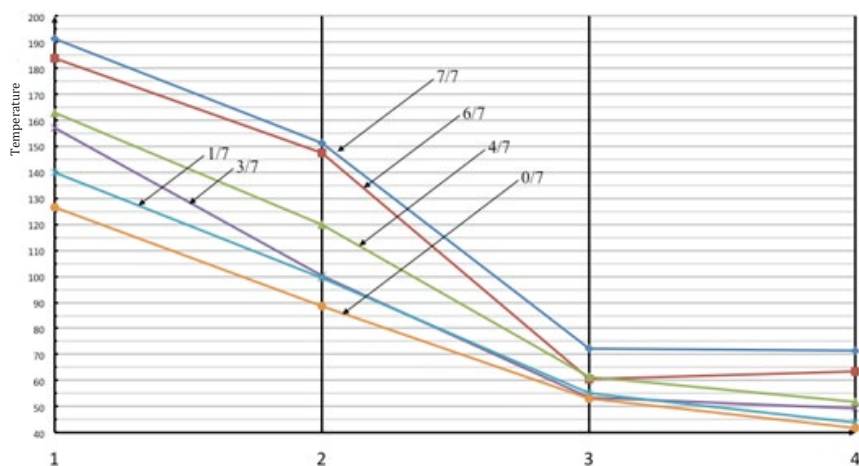


**Pic. 4. Dependence of surface temperature of the elements of the exhaust system on time when the engine is idling; a – front pipe, b – catalyst, c – intermediate pipe, d – muffler.**

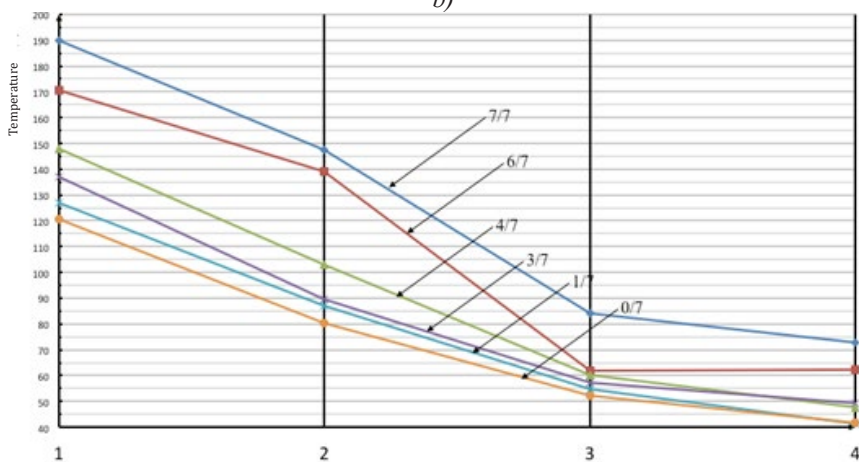




a)



b)



c)

**Pic. 5. Dependence of the surface temperature of the elements of the exhaust system from the position of the thermocouple (numbers on the axis) and the operating modes of the heater; warm-up time: a – 10 minutes; b – 20 minutes; c – 30 minutes; fractions – operating modes of the interior heater (explanation in the text).**



due to a later reaching by the engine of operating thermal mode: if, when starting the engine, the coolant has a lower temperature corresponding to the ambient temperature, then warming up the engine takes a longer time. Heating the coolant and the engine itself requires longer operation at an increased crankshaft speed than is required at higher ambient temperatures.

At increased engine speeds, a larger volume of hot exhaust gas passes through the car exhaust system, intensely heating the elements of the exhaust system, and this leads to a higher surface temperature of the exhaust system.

At the same time, as the ambient temperature decreases, the temperature at point 4 also decreases, and this may be due to the fact that the muffler of the exhaust system has a significant volume and slightly warms up at low temperatures during idle operation.

Pic. 3 presents data on dependence of the surface temperature of the exhaust system on ambient temperature at different time stages of the engine idling. From a comparison of the curves presented in this picture, it follows that:

- in the area of location of the first thermocouple (Pic. 3, curve 1), the exhaust system is heated to a temperature of 110–176°C, which ensures evaporation and removal of the previously accumulated condensate with the exhaust gas flow (surface temperature exceeds the boiling point of water) in the entire studied range of ambient temperature;

- in the area of location of the second thermocouple (Pic. 3, curve 2), the exhaust system is heated to a temperature of 92–122°C at negative air temperatures, and to 42–83°C at positive temperatures; in the latter case, the possibility of condensation and accumulation of moisture in the exhaust system remains, and this can lead to freezing of the accumulated condensate when the temperature drops to negative;

- in the area of location of the third and fourth thermocouples, the elements of the exhaust system warm up to a temperature not exceeding 60°C; in these areas, favorable conditions arise for formation and accumulation of condensate in the entire range of the considered ambient temperatures.

Pic. 4 shows the time dependence of the surface temperature of the exhaust system elements on which the thermocouples are

installed, for various values of ambient temperature when the engine is idling:

- at ambient temperature of -4°C to -15°C, there are maxima in the heating temperature of the exhaust system elements during an unsteady engine operation mode (Pic. 4b, c, d) and a decrease in temperature of these elements by the end of the 30-minute period under considered period with further access to the stable thermal regime;

- at ambient temperature from -21°C to -23°C, the temperature of the surface of the exhaust system at the control points quickly reaches stable values and practically does not change during the considered period of time.

The influence of the operating modes of the passenger compartment heater on temperature of the elements of the exhaust system is shown in Pic. 5. Designation 7/7 corresponds to the maximum rotation speed of the fan blades; 0/7 indicates the fan is off. During the considered tests, air temperature was -8°C.

In the area where the first thermocouple is located, after 30 minutes (Pic. 5c), the temperature reaches 120°C with the heater turned off and 190°C with the heater operating mode 7/7; in the zone of location of the second thermocouple, respectively, 80°C and 147°C, in the zone of the third thermocouple, respectively, 52°C and 85°C under the indicated modes of heating the passenger compartment.

It is necessary to pay attention to the later exit of the engine to the operating mode and an increase in temperature of the elements of the exhaust system with an increase in the number of revolutions of the fan of the heater of the passenger compartment at constant ambient temperature. A longer exit of the engine to the operating thermal mode is explained by the fact that the circulating coolant, heating the air in the car interior, is itself cooled in the radiator of the heater, thereby slowing down the heating of the working engine.

In particular, with an increase in the speed of rotation of the fan of the passenger compartment heater, heat extraction from the coolant in the heater radiator occurs more intensively and, accordingly, the engine warms up even at higher idle speeds more slowly.

At the same time, at increased engine speeds over the same period of time, a larger volume of hot exhaust gases, intensively heating the elements of the exhaust system, passes through the exhaust system of the car,

which leads to an increase in surface temperature of the elements of the exhaust system. Thus, the relationship of an increase in surface temperature of the elements of the exhaust system with an increase in the number of revolutions of the heater fan of the passenger compartment is fixed.

It should be noted that since an increase in speed of rotation of the fan of the heater of the passenger compartment leads to an increase in duration of warming up of the car engine to operating temperature, it is possible on modern cars to turn off the fan of the heater of the passenger compartment in the first minutes of starting the engine at lower ambient temperatures, contributing to a faster transition of the engine to working thermal mode.

The conducted experimental studies made it possible to additionally establish that:

- it takes 3 to 4 hours to cool the exhaust system to ambient temperature, depending on ambient temperature;
- at a negative ambient temperature, the rear muffler of the exhaust system of the car in question is not able to warm up when the engine is idling to a temperature of 100°C.

**Conclusions.** An experimental study was carried out to determine temperature of elements of the exhaust system at the stage of unsteady operation of a car engine at low temperatures. That study has shown that:

- lowering ambient temperature leads to a slowdown in heating of a car engine and, at the same time, to an increase in temperature of the exhaust system elements;
- increase in speed of the fan of the heater of the passenger compartment leads to a decrease in temperature of the coolant, helps to increase temperature of the elements of the exhaust system and, at the same time, increases the time the engine enters operating mode.

The value of the established patterns can be helpful for development of a methodology for adjusting frequency of heating of the exhaust system, the use of which will reduce costs of monitoring the technical condition of the exhaust system and the costs incurred in the event of an unsuccessful start of ICE in cold climatic conditions. Practical value can be also attributed to substantiation of development of a model of the device that will ensure the absence of condensate in the exhaust system when operating cars in large cities in winter.

## REFERENCES

1. Silencers & pipes. [Electronic resource]: <https://www.ernst-hagen.de/en/products/silencers-pipes/>. Last accessed 18.03.2019.
2. Kuznetsov, N. I., Petukhov, M. Yu., Khaziev, A. A. Development of recommendations for operation of cars in a metropolis [*Razrabotka rekomendatsii po ekspluatatsii avtomobilei v usloviyakh megapolisa*]. *Problems of technical operation and car service of rolling stock of motor vehicles: proceedings of 72<sup>nd</sup> scientific methodological and scientific research conference MADI*. Moscow, MADI publ., 2014, pp. 227–233.
3. Kuznetsov, N. I., Petukhov, M. Yu., Shcheludiyakov, A. M. On the features of starting a car engine in a modern metropolis at low ambient temperatures [*Ob osobennostyakh zapuska dvigatelya legkovogo avtomobilya v sovremennom megapolise pri nizkikh temperaturakh okruzhayushchei sredy*]. *Bulletin of PNIPU. Environmental protection, transport, life safety*, 2012, Iss. 1, pp. 137–143.
4. Kuznetsov, N. I., Petukhov, M. Yu., Khaziev, A. A., Laushkin, A. V. Problem of Accumulation and Freezing of Condensate in the Exhaust Gases of Cars at Low Temperatures. *Applied Mechanics and Materials*, June 2016, Vol. 838, pp. 47–55. [Electronic resource]: <https://www.scientific.net/AMM.838.47>. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.838.47>.
5. Court decisions and regulations of the Russian Federation. Court decision No. 2–1747/2015 2–1747/2015–M–374/2015 M–374/2015 dated July 24, 2015 in case No. 2–1747/2015. [Electronic resource]: <http://sudact.ru/regular/doc/UP2TFt0dJ9Vj/>. Last accessed 18.03.2019.
6. Court decisions and regulations of the Russian Federation. Court decision of Kurchatovsky district court of Chelyabinsk, Case No. 2–6/11 dated April 13, 2011. [Electronic resource]: <http://sudact.ru/regular/doc/p7OrtXeRoBdy/>. Last accessed 18.03.2019.
7. Heil, B., Enderle, C., Herwig, H., Strohm, E., Margadant, A., Ruth, W. The Exhaust System of the Mercedes SL500. *MTZ worldwide*, January 2002, Vol. 63, Iss. 1, pp. 2–5. [Electronic resource]: <https://doi.org/10.1007/BF03227514>. Last accessed 18.03.2019.
8. González, N. G. Condensation in Exhaust Gas Coolers. In: Junior, C., Jansch, D., Dingel, O. (eds). *Energy and Thermal Management, Air Conditioning, Waste Heat Recovery*, ETA 2016, *Springer, Cham*, 2017. [Electronic resource]: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47196-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47196-9_9). Last accessed 18.03.2019.
9. Hashimoto, R., Mori, G., Yasir, M., Tröger, U., Wieser, H. Impact of Condensates Containing Chloride and Sulphate on the Corrosion in Automotive Exhaust Systems. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, September 2013, Vol. 158, Iss. 9, pp. 377–383. *Springer-Verlag Wien*. [Electronic resource]: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-013-0180-6>.
10. Laushkin, A. V., Khaziev, A. A. Reasons for flooding motor oil in operation [*Prichiny obvodneniya motornogo masla v ekspluatatsii*]. *Vestnik MADI*, 2012, Iss. 1, pp. 63–67.
11. Kuznetsov, N. I. Quantitative assessment of the content of water entering the engine with atmospheric air, in the exhaust gas [*Kolichestvennaya otsenka soderzhaniya v otrabotavshikh gazakh vody, postupayushchei v dvigatel s atmosferynym vozdukhom*]. *Bulletin of PNIPU. Transport. Transport facilities. Ecology*, 2017, Iss. 1, pp. 77–87. DOI: 10.15593/24111678/2017.01.06.
12. Boyarshinov, M. G., Lobov, N. V., Kuznetsov, N. I., Martemyanov, A. O. Temperature condition of the exhaust system of car's exhaust gases at low temperatures [*Temperaturniy rezhim sistemy vypuska otrabotannykh gazov avtomobilya v usloviyakh ponizhennykh temperatur*]. *Vestnik PNIPU. Transport. Transport facilities. Ecology*, 2018, Iss. 3, pp. 5–16. DOI: 10.15593/24111678/2018.03.01





# Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне



Таисия ШЕПИТЬКО



Игорь АРТЮШЕНКО



Павел ДОЛГОВ

*Шепитько Таисия Васильевна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

*Артюшенко Игорь Александрович – Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

*Долгов Павел Геннадьевич – ООО «Геотехническое обоснование», Санкт-Петербург, Россия\*.*

Стабилизация многолетнемёрзлых грунтов основания земляного полотна, сооружаемого с допущением оттаивания, за счёт улучшения их прочностных характеристик требует разработки и выбора рациональных конструктивно-технологических решений.

Целью исследования является анализ эффективности использования вертикальных столбов из щебня в криолитозоне и их влияния на прочностные характеристики грунтов основания. В исследовании использовались общенаучные методы, моделирование и сравнительный анализ.

Предлагается метод улучшения прочностных свойств грунтов основания земляного полотна на участке Обская–Салехард Северного широтного хода за счёт армирования вертикальными столбами из щебня, что повышает устойчивость сооружения.

Обосновывается принципиальная технологическая схема сооружения земляного полотна,

которая включает в себя следующие основные этапы: подготовительный этап, 1 стадия – устройство вертикальных столбов из щебня и щебёночной подушки, 2 стадия – дополнительное уплотнение виброкатком в случае несоответствия устойчивости несущей способности и осадки основания нормам эксплуатации.

Выполнено моделирование исследуемого объекта транспортной инфраструктуры как без использования технологии армирования вертикальными столбами из щебня, так и с её применением. Рассчитан коэффициент устойчивости и получена теоретическая поверхность обрушения насыпи с использованием программных комплексов Midas GTS NX и Plaxis 2D. Проверка устойчивости данного сооружения велась как в плоской, так и в трёхмерной постановке.

Показана эффективность использования вертикальных столбов из щебня для усиления насыпей, сооружаемых на многолетнемёрзлых грунтах.

**Ключевые слова:** транспорт, железная дорога, земляное полотно, Северный широтный ход, многолетнемёрзлые грунты, вертикальные столбы из щебня, устойчивость насыпи, строительство.

\*Информация об авторах:

**Шепитько Таисия Васильевна** – доктор технических наук, профессор, директор Института пути, строительства и сооружений Российского университета транспорта, Москва, Россия, shepitko-tv@mail.ru.

**Артюшенко Игорь Александрович** – аспирант кафедры проектирования и строительства железных дорог Российского университета транспорта, Москва, Россия, tywka351@mail.ru.

**Долгов Павел Геннадьевич** – генеральный директор ООО «Геотехническое обоснование», Санкт-Петербург, Россия, dolgov@geotechfem.com.

Статья поступила в редакцию 18.04.2019, принята к публикации 11.08.2019.

For the English text of the article please see p. 74.



## ВВЕДЕНИЕ

При строительстве транспортных объектов для обеспечения их надежности необходимо учитывать природно-климатические, гидрологические и мерзлотные процессы [1; 2], игнорирование которых неблагоприятно сказывается не только на ходе строительства, но и на дальнейшей эксплуатации объекта.

Целью исследования является анализ эффективности использования вертикальных столбов из щебня в криолитозоне и их влияния на прочностные характеристики грунтов основания. Для достижения указанной цели использовались общенаучные *методы*, моделирование и сравнительный анализ.

Для обоснованного выбора рациональных конструктивно-технологических решений необходимо проанализировать и учесть при проектировании инженерно-геологические и природно-климатические факторы района строительства.

В соответствии с этим для участков с многолетнемёрзлыми грунтами разработана принципиальная схема технологии сооружения земляного полотна, возводимого с допущением оттаивания, с применением армирования вертикальными столбами из щебня.

Вертикальные столбы из щебня являются одним из методов стабилизации слабых грунтов, применяемым для повышения прочности и надежности земляного полотна, уплотнения грунтового массива и уменьшения влажности грунтов [3, с. 17].

## ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ТЕХНОЛОГИИ АРМИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СТОЛБАМИ ИЗ ЩЕБНЯ

Предложенная принципиальная схема (рис. 1) имеет блочную структуру, объединяющую стадии реализации данной технологии.



Рис. 1. Принципиальная схема сооружения земляного полотна с допущением оттаивания грунтов на многолетнемёрзлых основаниях с применением армирования вертикальными столбами из щебня: ММГ – многолетнемёрзлые грунты;  $K_{уст}$  – коэффициент устойчивости откосов насыпи.

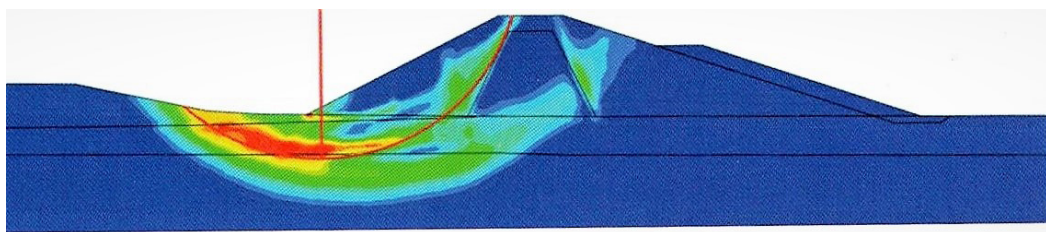


Рис. 2. Криволинейная поверхность возможного смещения [7].

В подготовительный период необходимо предусмотреть возможное влияние негативных факторов на будущее основание земляного полотна и предпринять меры по их ликвидации. Для этого проводится прогнозирование теплотехнических и физико-механических процессов и технологическое регулирование параметров, которые его допускают. Это скорость консолидации и оттаивания, величина относительной осадки, глубина промерзания и оттаивания, влажность грунтов, теплопроводность слоёв и др. На подготовительном этапе также определяется несущая способность деятельного слоя в основании под насыпью под действующей эксплуатационной нагрузкой.

I стадия предлагаемой технологии включает устройство щебёночных свай и щебёночной подушки в основании насыпи для улучшения прочностных характеристик грунтов. Функционирование щебёночных свай как вертикальных дренаж определяется на основе закономерностей процессов в слабом слое [4, с. 12].

На II стадии принципиальной технологической схемы реализуется упрочнение грунтов основания путем дополнительного уплотнения виброкатками, если требуемые несущая способность основания и устойчивость насыпи не были достигнуты на предыдущих стадиях.

На каждой из стадий предложенной технологической схемой (рис. 1) предусматривается уточнение соответствия устойчивости, несущей способности и осадки основания нормативным требованиям. Следует уточнить, что в ходе строительства необходим постоянный

мониторинг физико-механических и теплофизических характеристик грунтов основания.

### ТЕОРИЯ РАСЧЕТА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В качестве объекта моделирования взят участок Северного широтного хода новой железнодорожной линии Обская—Салехард ПК 01+50-ПК 06+50.

Этот участок представляет собой склон водораздельной поверхности ледниково-морского генезиса (m, gm II—III), полого наклонный в сторону ручья Вындыяда. Высотные отметки равномерно понижаются к ручью. Уклон поверхности в среднем составляет 3—5°. Геологическое строение разреза: до глубины 6 м вскрываются мягкопластичный и текучепластичный суглинки, ниже, на глубине 7 м вскрывается мёрзлая супесь. Мощность сезонно-мёрзлого слоя 1,5—2 м, сезонно-талого — 2,9—3,0 м. В пределах рассматриваемого участка запроектирована насыпь высотой 6 метров [5, с. 16].

В ходе исследования произведен расчёт коэффициента устойчивости и получена теоретическая поверхность обрушения данной насыпи. Расчёт произведен методом круглоцилиндрической поверхности проф. Г. М. Шахунянца [6, с. 37].

Проверка устойчивости производится исходя из рассмотрения криволинейной поверхности возможного смещения. Такой приём распространён при выполнении расчётов на возможность смещения грунта насыпи и вовлечения в деформацию грунта основания (рис. 2) [6, с. 37].

Исходя из того, что криволинейная поверхность возможного смещения представляет поверхность круглого цилиндра, расчёт на устойчивость сводят к рассмотре-

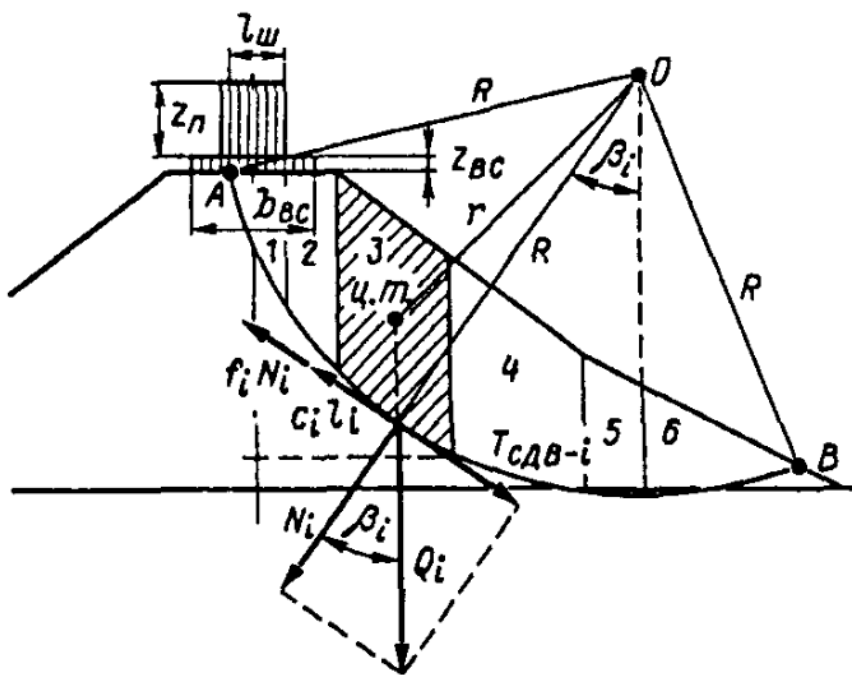


Рис. 3. Схема определения  $K_{уст}$  насыпи методом круглоцилиндрических поверхностей Г. М. Шахунянца:  $Q_i$  – сила, действующая на поверхность возможного смещения, складывающаяся из веса отсека и нагрузки на него, которая раскладывается на нормальную  $N_i = Q_i \cos \alpha_i$  и тангенциальную  $T_i = Q_i \sin \alpha_i$ ;  $f_i N_i$  – силы трения;  $c_i l_i$  – силы сцепления.

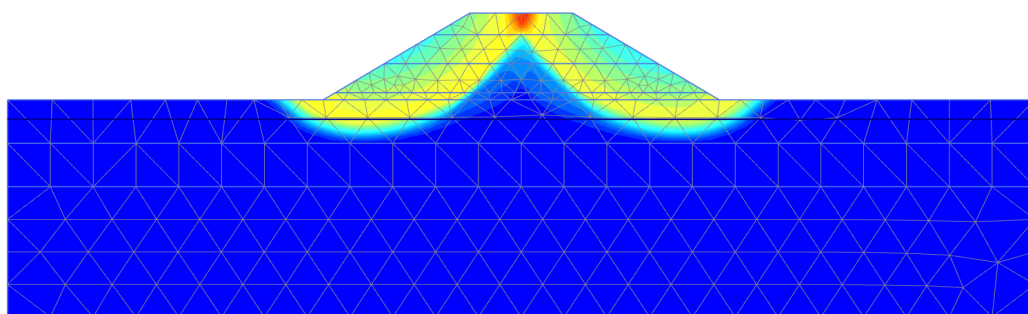


Рис. 4. Теоретическая поверхность обрушения по результатам расчёта устойчивости насыпи на ПК 01+50–ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход, смоделированная в программном комплексе Plaxis 2D (минимальное значение коэффициента устойчивости – 0,953).

нию условий возможности изменения массы грунта при его перемещении по этой поверхности относительно оси круглого цилиндра. Коэффициент устойчивости  $K_{уст}$  массива определяют при этом как отношения моментов сил относительно этой оси О (рис. 3), сопротивляющихся смещению, к моменту сил относительно той же оси, стремящихся его сместить.

Коэффициент устойчивости  $K_{уст}$  определяют по формуле:

$$K_{уст} = \frac{\sum f_i N_i + \sum c_i l_i + \sum T_{iуд}}{\sum T_{iсдв}}, \quad (1)$$

где  $T_{iуд}$  – тангенциальная составляющая, сопротивляющаяся сдвигу массива грунта;

$T_{iсдв}$  – тангенциальная составляющая, стремящаяся сдвинуть грунтовый массив.

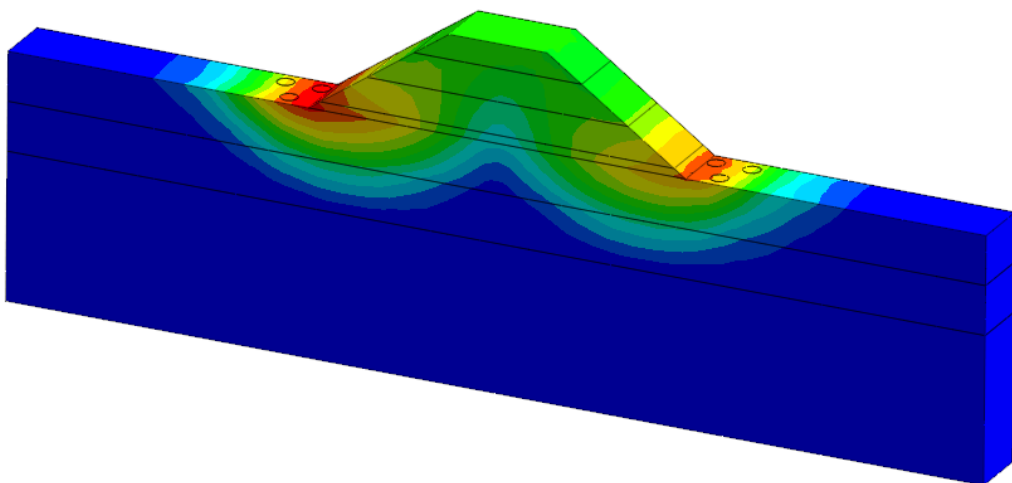


Рис. 5. Теоретическая поверхность обрушения по результатам расчёта устойчивости насыпи на ПК 01+50-ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход, смоделированная в программном комплексе Midas GTS NX в трёхмерном пространстве (минимальное значение коэффициента устойчивости – 1,077).

Тангенциальная составляющая сопротивления сдвигу определяется по формуле:

$$\sum T_{iуд} = \sum f_i N_i + \sum c_i l_i, \quad (2)$$

где  $f_i N_i$  – силы трения;

$c_i l_i$  – силы сцепления.

Полученное значение  $K_{уст}$  сравнивают с допускаемым значением коэффициента устойчивости, нормирование которого приводится в СП 238.132600.2015 [8, с. 70]. Если значение  $K_{уст}$  меньше нормативной величины  $k$ , следует применить технологи-

ческие решения по улучшению прочностных характеристик основания земляного полотна.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НАСЫПИ

В качестве инструмента аналитического исследования в работе использовались программные комплексы Midas GTS NX и Plaxis 2D [9; 10]. Проверка на устойчивость исследуемой шестиметровой насыпи выполнена в плоской и трёхмерной постановке. В ре-

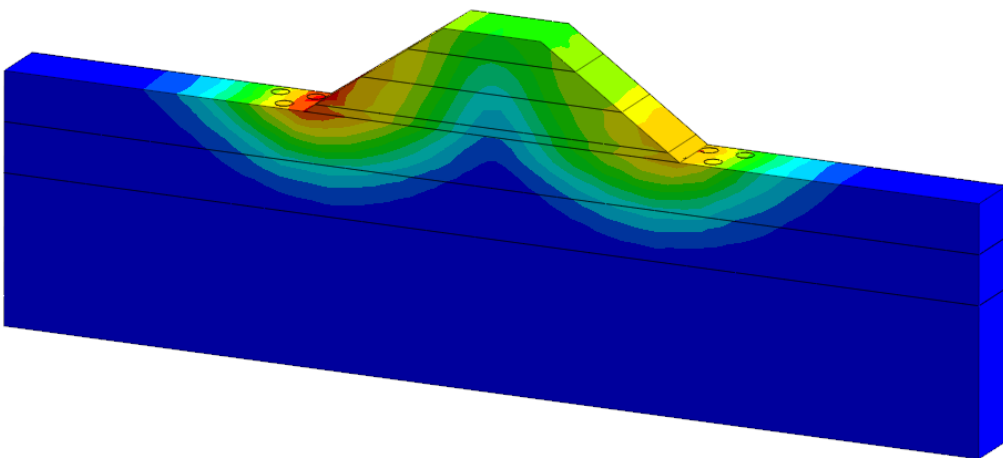


Рис. 6. Теоретическая поверхность обрушения по результатам расчёта устойчивости насыпи на ПК 01+50-ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход (минимальное значение коэффициента устойчивости – 1,852).



зультате расчётов получено, что коэффициент устойчивости составляет, соответственно,  $K_{уст} = 0,953$  и  $K_{уст} = 1,077$  (рис. 4, 5).

В соответствии с требованиями «Инструкции по содержанию земляного полотна железных дорог» [11, с. 13], при соответствии геометрических параметров земляного полотна типовым поперечным профилям, расчётный коэффициент устойчивости откосов земляного полотна должен быть не менее 1,2.

Выполненный расчёт показывает необходимость улучшения свойств грунтов основания. В качестве варианта такого улучшения принят вариант их армирования вертикальными столбами из щебня, которые предназначены для улучшения слабых грунтов основания под зданиями и сооружениями. При этом ствол скважины формируется методом виброфлотации, послойное заполнение скважины щебнем и трамбовка его осуществляются с помощью виброфлотатора под воздействием вибрации и собственного веса снаряда с использованием сжатого воздуха или комбинации воздуха с водой. Следующий этап — подача щебня в бункер виброфлотатора с помощью погрузчика, затем по трубопроводу — на забой скважины. За счёт возвратно-поступательных движений формируется тело сваи с заданными расчётными параметрами, которые зависят от физико-механических свойств грунтов, обеспечивая требуемую несущую способность или фильтрационные свойства.

Для проектирования вертикальных столбов из щебня и гибкого ростверка использован гранитный щебень фракции 20–40 мм.

Использование вертикальных столбов из щебня (материала с высокой прочностью на сдвиг) создаёт боковое сопротивление в грунте. Благодаря использованию вертикальных столбов из щебня происходит улучшение прочностных характеристик грунтов основания, что уменьшает осадку фундаментов и увеличивает несущую способность грунта [12, с. 757].

Так же как и до усиления грунтов основания, после виброфлотации выполнен расчёт коэффициента устойчивости исследуемой насыпи по методу круглоцилиндрических поверхностей проф. Г. М. Шахунянца. Результаты расчёта приведены на рис. 6.

Получено, что минимальное значение коэффициента устойчивости составило  $K_{уст} = 1,852$ , что существенно больше, по сравнению со значением коэффициента устойчивости насыпи без усиления основания (1,077 — Midas GTS NX; 0,953 — Plaxis 2D). Из сопоставления представленных рис. 4–6 видно, как изменяется поверхность обрушения — опасные участки откосов исследуемой насыпи стабилизируются и приходят в норму.

## ВЫВОД

Анализ работы насыпи на ПК 01+50–ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход, усиленной вертикальными столбами из щебня, показал, что опасные участки теоретической поверхности обрушения откосов насыпи стабилизировались, коэффициент устойчивости возрос до 1,852. Полученный результат подтверждает техническую эффективность использования вертикальных столбов из щебня для усиления насыпей, сооружаемых с допущением оттаивания на основаниях, сложенных многолетнемёрзлыми грунтами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Роман Л. Т. Механика мёрзлых грунтов. — М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. — 426 с.
2. Цытович Н. А. Механика мёрзлых грунтов — М.: Высшая школа, 1973. — 446 с.
3. Pivarč J. Stone columns — determination of the soil improvement factor // Slovak journal of civil engineering. — Vol. XIX, 2011. — № 3. — pp. 17–21.
4. Priebe H. J. Design of vibro replacement / Ground Engineering, 1995. — Dec. — pp. 31–37.
5. Положительное заключение государственной экспертизы № 89-1-4-0465-12. Проектная документация и результаты инженерных изысканий (строительство новой железнодорожной линии Обская–Салехард). — Салехард, 2012. — 91 с.
6. Шахунянец Г. М. Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчёта: Учеб. пособие. — М.: Трансжелдориздат, 1953. — 828 с.
7. Выполненные проекты компаний с применением Midas GTS NX. Новый уровень геотехнических расчетов. — Москва, 2017. — 73 с.
8. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. — Москва, 2015. — 71 с.
9. Пособие по расчётам Midas GTS NX. — М., 2015. — 306 с.
10. Plaxis 2D. Руководство пользователя. — СПб: «НИПИ информатика», 2012. — 182 с.
11. ЦП 544. Инструкция по содержанию земляного полотна железнодорожного пути. — М.: Транспорт, 2010. [Электронный ресурс]: <https://epk-rzd.ru/wp-content/uploads/2015/09/CP-544.pdf>. Доступ 22.04.2019.
12. Salahi A., Niroumand, H., Kassim K. Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon / Scientific World Journal. — 2015. — № 20. — pp. 739–759. ●





# Base Soil Reinforcement with Vertical Crushed Stone Columns in Cryolithozone



Taisiya V. SHEPITKO



Igor A. ARTYUSHENKO



Pavel G. DOLGOV

*Shepitko, Taisiya V., Russian University of Transport, Moscow, Russia.  
Artyushenko, Igor A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.  
Dolgov, Pavel G., LLC Geotechnical Obosnovanie, St. Petersburg, Russia.*

## ABSTRACT

Stabilization of permafrost soils of the roadbed base, constructed with assumption of thawing, thanks to improvement of their strength characteristics, requires development and selection of rational structural and technological solutions.

The objective of the study was to analyze the effectiveness of use of vertical columns of crushed stone in the permafrost zone and their influence on strength characteristics of the soil base. The study has used general scientific methods, modeling, simulation and comparative analysis.

This article proposes a method for improving strength properties of soil of the roadbed base within Obokaya-Salekhard section of the Northern Latitudinal Railway thanks to reinforcement of the roadbed base made with vertical columns of crushed stone, which increases stability of the structure.

The proposed basic technological model of construction of the roadbed includes the following main stages: preparatory stage, 1 stage – arrangement of vertical columns of crushed stone and granular sub-bases, 2 stage – additional compaction with a vibratory roller in case of mismatch of stability of bearing capacity and precipitation of the base to operating standards.

The studied object of the transport infrastructure was simulated both without the use of technology for reinforcing it with vertical columns of crushed stone and with its use. The stability coefficient was calculated, and the theoretical surface of embankment collapse was obtained using Midas GTS NX and Plaxis 2D software packages. The stability test of this structure was carried out both in a flat and in a three-dimensional setting.

The efficiency of using vertical columns of crushed stone to strengthen the embankments constructed on permafrost soils has been shown.

**Keywords:** transport, railways, roadbed, Northern Latitudinal Railway, permafrost soils, vertical columns of crushed stone, embankment stability, construction, civil engineering.

\*Information about the authors:

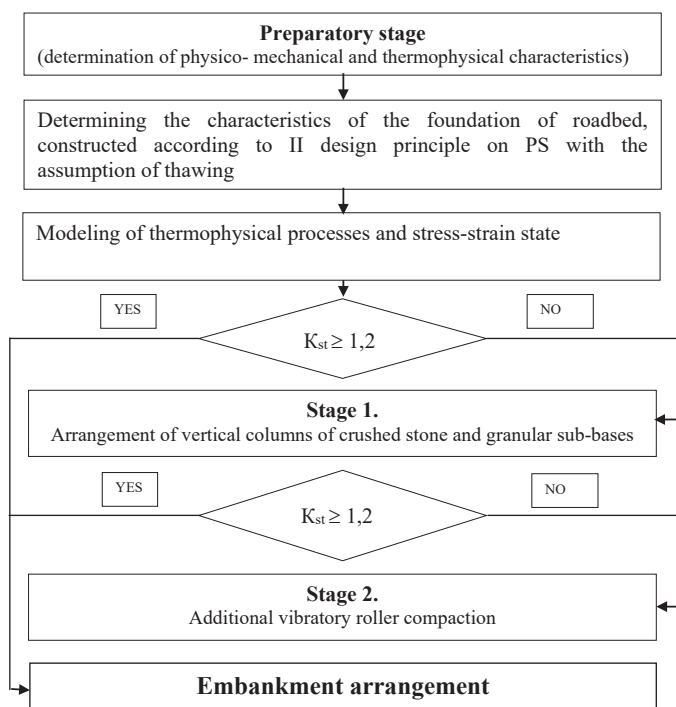
**Shepitko, Taisiya V.** – D.Sc. (Eng), professor, director of the Institute of Track, Construction and Structures of Russian University of Transport, Moscow, Russia, [shepitko-tv@mail.ru](mailto:shepitko-tv@mail.ru).

**Artyushenko, Igor A.** – Ph.D. student at the department of design and construction of railways of Russian University of Transport, Moscow, Russia, [tywka351@mail.ru](mailto:tywka351@mail.ru).

**Dolgov, Pavel G.** – general director of LLC Geotechnical Obosnovanie, St. Petersburg, Russia, [dolgov@geotechfem.com](mailto:dolgov@geotechfem.com).

Article received 18.04.2019, accepted 11.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 68.



**Pic. 1. Principal model chart of construction of roadbed with the assumption of thawing of permafrost soils using reinforcement with vertical columns of crushed stone: PS – permafrost soils;  $K_{st}$  – coefficient of stability of slopes of the embankment.**

**Introduction.** During construction of transport facilities to ensure their reliability, it is necessary to take into account climatic, hydrological and permafrost processes [1; 2], while ignoring those factors could adversely affect not only the progress of construction, but also further operation of the facility.

**Objective.** The objective of the study is to analyze the effectiveness of use of vertical columns of crushed stone in the permafrost zone and their influence on strength characteristics of the soil base.

**Methods.** To achieve this objective, general scientific methods, modeling, simulation and comparative analysis were used.

For a reasonable choice of rational structural and technological design solutions, it is necessary to analyze and consider the engineering-geological and natural-climatic factors of the construction area.

For the areas with permafrost soils, a conceptual technology model has been developed intended for construction of the roadbed, erected with the assumption of thawing, using reinforcement with vertical columns of crushed stone.

Vertical columns of crushed stone are one of the methods for stabilizing soft soils, used to increase strength and reliability of the roadbed, compact the soil mass and reduce soil moisture [3, p. 17].

### Results.

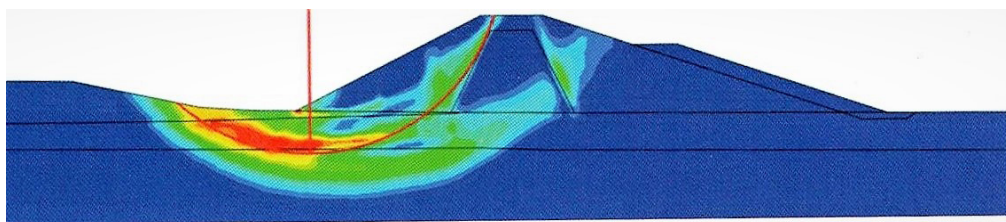
#### Principal technology model of reinforcement with vertical columns of crushed stone

The proposed principal model (Pic. 1) has a block structure that combines the stages of implementation of this technology.

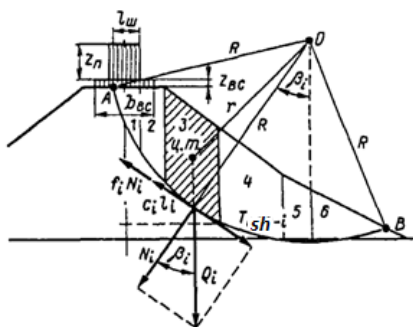
In the preparatory period, it is necessary to provide for the possible impact of negative factors on future foundation of the roadbed and take measures to eliminate them. For this, forecasting of heat engineering and physico-mechanical processes along with technological regulation of parameters of forecasting is carried out. This regards speed of consolidation and thawing, value of relative precipitation, depth of freezing and thawing, soil moisture, thermal conductivity of layers, etc. At the preparatory stage, bearing capacity of the active layer in the base under the embankment under the current operating load is also determined.

I stage of the application of the proposed technology includes arrangement of crushed





Pic. 2. Curved surface of possible displacement [7].



Pic. 3. Scheme for determining  $K_{st}$  of the embankment by the method of circular cylindrical surfaces of G. M. Shakhunyants:  $Q_i$  is the force acting on the surface of possible displacement, consisting of weight of the compartment and the load on it, which decomposes into normal  $N_i = Q_i \cos \alpha_i$  and tangential  $T_i = Q_i \sin \alpha_i$ ;  $f_i N_i$  are friction forces;  $c_i l_i$  are adhesion forces.

stone piles and granular sub-bases at the base of the embankment to improve strength characteristics of soils. The functioning of crushed stone piles as vertical drains is determined on the basis of the laws of processes developing in a weak layer [4, p. 12].

At II stage of the implementation of the basic technological scheme, soil strengthening is carried out through additional compaction with vibratory rollers, if the required bearing capacity of the base and stability of the embankment have not achieved in the previous stages.

At each of the stages of the proposed technological chart (Pic. 1), it is envisaged to clarify conformity of stability, bearing capacity and base precipitation to regulatory requirements. It should be clarified that during construction, constant monitoring of the physico-mechanical and thermophysical characteristics of the soil of the base is necessary.

### Theory of roadbed design calculation

As the object for modeling, we have taken the section of Northern Latitudinal Railway of new Obskaya–Salekhard railway line limited by points PK 01 + 50–PK 06 + 50.

This section is a slope of the watershed surface of the glacial-marine genesis (m, gm II–III), which is gently sloping towards Vyndyad stream. The elevations are evenly lowering towards the stream. The surface slope averages 3–5°. The geological structure of the section: up to a depth of 6 m, soft-plastic and fluid-plastic loams are revealed; below, at a depth of 7 m, frozen sandy loam is found. Thickness of the seasonally frozen layer is of 1,5–2 m, seasonally thawed layer is of 2,9–3,0 m. An embankment with a height of 6 meters has been designed within the considered section [5, p. 16].

During the study, stability coefficient was calculated and theoretically collapsible surface of this embankment was obtained. The calculation was made by the method of round cylindrical surface of professor G. M. Shakhunyants [6, p. 37].

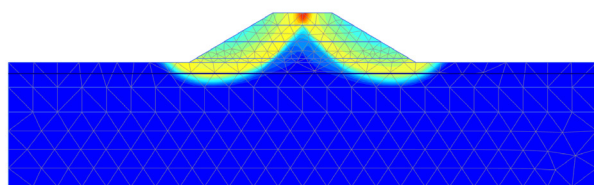
The stability test is carried out on the basis of consideration of the curved surface of a possible displacement. Such a technique is widespread when performing calculations on possibility of displacing the embankment soil and involving the base in the soil deformation (Pic. 2) [6, p. 37].

As the curved surface of a possible displacement represents the surface of a round cylinder, calculation of stability reduces to considering the conditions of possible changes in the mass of the soil when it moves along this surface relative to the axis of the round cylinder. The stability coefficient  $K_{st}$  of the array is determined in this case as the ratio of the moments of forces relative to this axis O (Pic. 3), resisting displacement, to the moment of forces relative to the same axis, trying to displace it.

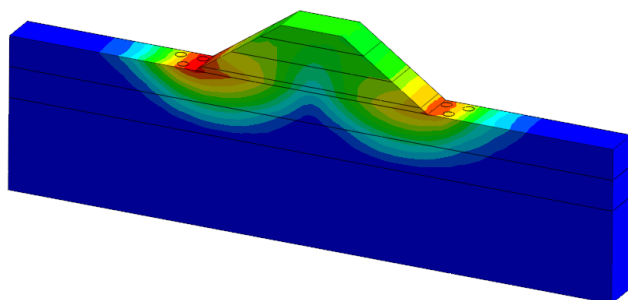
Stability coefficient  $K_{st}$  is determined according to the formula:

$$K_{st} = \frac{\sum f_i N_i + \sum c_i l_i + \sum T_{irel}}{\sum T_{ish}}, \quad (1)$$





**Pic. 4.** The theoretically collapsible surface according to the calculation of stability of the embankment at PK 01 + 50-PK 06 + 50 of the section Obskaya–Salekhard of the new Northern Latitudinal Railway line, simulated with the Plaxis 2D software package environment (the minimum value of the stability coefficient is 0,953).



**Pic. 5.** The theoretically collapsible surface according to the results of calculating the embankment stability at PK 01 + 50-PK 06 + 50 of Obskaya–Salekhard section of the new Northern Latitudinal Railway line, simulated in Midas GTS NX software package environment in three-dimensional space (the minimum value of the stability coefficient is 1,077).

where  $T_{irel}$  is the tangential component, resisting the shift of the soil mass;

$T_{ish}$  is the tangential component that seeks to move the soil mass.

The tangential component of shift resistance is determined by the formula:

$$\sum T_{iud} = \sum f_i N_i + \sum c_{i1i}, \quad (2)$$

where  $f_i N_i$  are friction forces;

$c_{i1i}$  are adhesion forces.

The obtained value of  $K_{st}$  is compared to the permissible value of stability coefficient, the normalization of which is given in SP [Construction Rules] 238.132600.2015 [8, p. 70]. If the value of  $K_{st}$  is less than the standard value  $k$ , then engineering solutions should be applied to improve the strength characteristics of the foundation of the roadbed.

#### Modeling stability of embankment slopes

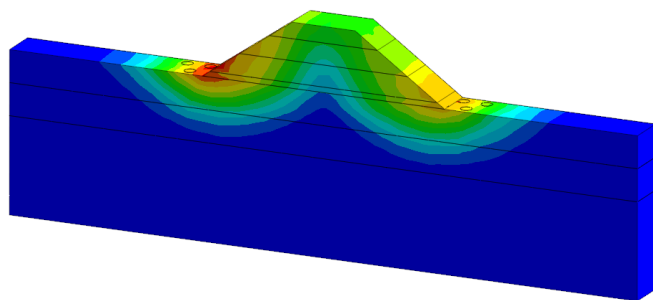
As an analytical research tool, the Midas GTS NX and Plaxis 2D software packages were used [9; 10]. The stability test of the studied six-meter embankment was performed in a flat and three-dimensional settings respectively. As a result of calculations, it was found that the

stability coefficients were, respectively,  $K_{st} = 0,953$  and  $K_{st} = 1,077$  (Pic. 4, 5).

In accordance with the requirements of the «Instructions for maintenance of the roadbed of railways» [11, p. 13], subject to geometric parameters of the roadbed consistent with roadbed typical cross-sectional profiles, the calculated coefficient of stability of slopes of the roadbed must be at least 1,2.

The calculation showed the need to improve the properties of the soil base. As an option for such an improvement, the decision on reinforcing them with vertical columns of crushed stone, which are intended to improve the weak soil of the base under buildings and structures, was accepted. In that case, the wellbore is formed by the method of vibroflotation, layer-by-layer filling of the well with crushed stone, and tamping of it is carried out using a vibroflotator under the impact of vibration and dead weight using compressed air or a combination of air and water. The next stage was to supply crushed stone to a vibroflotator hopper using a loader, and then through the pipeline to the bottom of the well. Due to reciprocating movements, a pile body is formed with predetermined design





**Pic. 6. The theoretical collapse surface according to the results of calculating the embankment stability at PK 01 + 50-PK 06 + 50 of Obskaya–Salekhard section of the new Northern Latitudinal Railway line (the minimum value of the stability coefficient is 1,852).**

parameters, which depend on physical and mechanical properties of soils, providing required load-bearing capacity or filtration properties.

For design of vertical columns of crushed stone and a flexible grillage, granite crushed stone of a fraction of 20–40 mm was used.

The use of vertical columns of crushed stone (a material with high shear strength) creates lateral resistance in the soil. Due to the use of vertical columns of crushed stone, strength characteristics of the soil of the base are improved, which reduces settlement of foundations and increases bearing capacity of the soil [12, p. 757].

As well as before strengthening the base soil, after vibroflotation, the stability coefficient of the studied embankment was calculated by the method of circular cylindrical surfaces of professor G. M. Shakhunyan. The calculation results are shown in Pic. 6.

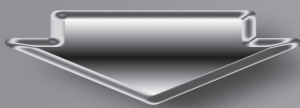
It was found that the minimum value of the stability coefficient was  $K_{st} = 1,852$ , which is significantly higher compared to the value of the stability coefficient of the embankment without reinforcing the base (1,077 with Midas GTS NX; 0,953 with Plaxis 2D). From a comparison of the presented Pic. 4–6 it is possible to see how the collapse surface changes: the dangerous slopes of the studied embankment stabilize and return to normal.

**Conclusions.** Analysis of the operation of the embankment at PK 01 + 50-PK 06 + 50 of Obskaya–Salekhard section of the new Northern Latitudinal Railway line, reinforced with vertical columns of crushed stone, showed that the dangerous sections of the theoretically collapsible surface of the embankment slopes stabilized, the stability coefficient increased to 1,852. The obtained result confirms the

technical efficiency of the use of vertical columns of crushed stone to strengthen the embankments constructed with the assumption of thawing on the bases composed of permafrost soils.

## REFERENCES

1. Roman, L. T. Mechanics of frozen soils [*Mekhanika merzlykh gruntov*]. Moscow, MAIK «Nauka/Interperiodika», 2002, 426.
2. Tsytovich, N. A. Mechanics of frozen soils [*Mekhanika merzlykh gruntov*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1973, 446 p.
3. Pivarč, J. Stone columns – determination of the soil improvement factor. *Slovak journal of civil engineering*, Vol. XIX, 2011, Iss. 3, pp. 17–21.
4. Priebe, H. J. Design of vibro replacement. *Ground Engineering*, 1995, Dec., pp. 31–37.
5. The positive conclusion of the state expertise No. 89-1-4-0465-12. Design documentation and engineering survey results (construction of the new railway line Obskaya–Salekhard) [*Polozhitelnoe zaklyuchenie gosudarstvennoi ekspertizy No. 89-1-4-0465-12. Proektnaya dokumentatsiya i rezul'taty inzhernykh izyskanii (stroitel'stvo novoi zheleznodorozhnoi linii Obskaya–Salekhard)*]. Salekhard, 2012, 91 p.
6. Shakhunyan, G. M. The roadbed of railways. Design and calculation issues: Study guide [*Zemlyanoe polотно zheleznnykh dorog. Voprosy proektirovaniya i rascheta: Ucheb. posobie*]. Moscow, Transzheldorizdat publ., 1953, 828 p.
7. Completed projects of companies using Midas GTS NX. A new level of geotechnical calculations [*Vypolnennye proekty kompanii s primeneniem Midas GTS NX. Noviy uroven' geotekhnicheskikh raschetov*]. Moscow, 2017, 73 p.
8. SP 238.1326000.2015. Railway track [*SP 238.1326000.2015. Zheleznodorozhnyi put'*]. Moscow, 2015, 71 p.
9. Midas GTS NX calculation guide [*Posobie po raschetam Midas GTS NX*]. Moscow, 2015, 306 p.
10. Plaxis 2D. User's manual [*Plaxis 2D. Rukovodstvo polzovatelya*]. St. Petersburg, «NIPInformatika» publ., 2012, 182 p.
11. SP 544. Instructions for maintenance of the roadbed of the railway track [*CP 544. Instruktziya po soderzhaniyu zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puti*]. Moscow, Transport publ., 2010. [Electronic resource]: <https://epk-rzd.ru/wp-content/uploads/2015/09/CP-544.pdf>. Last accessed 22.04.2019.
12. Salahi, A., Niroumand, H., Kassim, K. Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon. *Scientific World Journal*, 2015, Iss. 20, pp. 739–759. ●



### ЛУЧШИЕ КАЧЕСТВА ЛОКОМОТИВА

25 июля 2019 года на Новосибирском электровозоремонтном заводе состоялось очередное заседание Совета по взаимодействию ОАО «РЖД» с предприятиями транспортного машиностроения. Его провел генеральный директор — председатель правления компании Олег Белозёров.

Говоря о перспективных моделях тягового подвижного состава, глава ОАО «РЖД» подчеркнул, что компании необходим локомотив с улучшенными потребительскими качествами и цифровые решения при его эксплуатации и обслуживании.

«ОАО «РЖД» создаёт сеть инновационных площадок для привлечения технологичных компаний по всей России. Такие площадки,

как мы надеемся, будут способствовать созданию новых научных и производственных связей. Прошу активнее включаться в эту работу», — отметил Олег Белозёров.

Ещё одним драйвером должны стать ключевые цифровые решения «Умный локомотив» и «Доверенная среда локомотивного комплекса», на базе которых предстоит перейти на малолюдные и безлюдные технологии и полностью цифровое управление процессами жизненного цикла локомотива.

**Новости ОАО «РЖД»:** [http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE\\_ID=654&layer\\_id=4069&refererLayerId=3307&id=94220](http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE_ID=654&layer_id=4069&refererLayerId=3307&id=94220) ●

### LOCOMOTIVE WITH BETTER QUALITIES

On 25 July 2019, a regular meeting of the Council for Cooperation between Russian Railways and Transport Engineering Enterprises was held at the Novosibirsk Electric Locomotive Repair Plant. It was chaired by the Chief Executive Officer and Chairman of the Board of Russian Railways, Oleg Belozеров.

Speaking about promising rolling stock models, the head of Russian Railways stressed that the Company needed a locomotive with improved consumer qualities and digital solutions for both its operation and maintenance.

«Russian Railways is creating a network of innovative sites and platforms to attract technology companies throughout Russia. We hope that such

centers will help create new scientific and industrial ties. I ask you to become more actively involved in this work», Oleg Belozеров said.

Also key digital solutions «Smart Locomotive» and «Trusted Environment of the Locomotive Complex», will help to switch to technologies employing less people or fully unmanned ones, and to the fully digital control of the locomotive life-cycle processes.

**Compiled from JSC Russian Railways news:** [http://eng.rzd.ru/newse/public/en?STRUCTURE\\_ID=15&layer\\_id=4839&refererLayerId=5074&id=107523](http://eng.rzd.ru/newse/public/en?STRUCTURE_ID=15&layer_id=4839&refererLayerId=5074&id=107523) ●





# Виртуальная сортировка: совершенствование организации пропуска и переработки порожних вагонопотоков



Андрей ШАТОХИН

*Шатохин Андрей Андреевич — Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия\*.*

В условиях роста грузоперевозок железнодорожным транспортом и поиска путей повышения их эффективности возникает необходимость совершенствования нормативно-правовой базы взаимодействия всех участников перевозочного процесса на железнодорожном транспорте и технологии организации пропуска и переработки вагонопотоков на путях общего пользования, снижения существующих издержек. Это обуславливает актуальность проработки вопросов уменьшения объёмов маневровой работы путём перехода к гибкой привязке вагонов к станциям назначения.

Целью исследования стала разработка системы виртуальной сортировки порожнего вагонопотока. В работе использовались методы системного анализа и аналитические инструменты управления движением на железных дорогах.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, управление порожними вагонами, балансовый метод, распределение порожних вагонов, заявка на погрузку, станции назначения, виртуальная сортировка, сокращение расходов, ускорение пропуска и переработки вагонов.

В результате предложена технология «виртуальной сортировки порожних вагонов».

Технология базируется на замене физической перестановки порожних вагонов при выполнении маневровой работы изменением в сопровождающих вагон документах станции назначения и получателя.

Она позволяет сократить горизонт планирования работы порожних вагонов за счёт уточнения их назначений в процессе доставки и, как следствие, получить существенный экономический эффект за счёт сокращения расходов на переработку транзитных вагонопотоков, снижения рисков необеспечения погрузки порожними вагонами, привлечение дополнительных объёмов погрузки, ускорения оборота вагонов и других эффектов. В конечном счёте, её внедрение может повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта.

\*Информация об авторе:

**Шатохин Андрей Андреевич** – начальник отделения «Взаимодействие транспортных систем» АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», Москва, Россия, [aassrv@gmail.com](mailto:aassrv@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 11.02.2019, принята к публикации 17.06.2019.

For the English text of the article please see p. 85.



**Н**а железных дорогах Российской Федерации при переходе от балансового метода управления порожними вагонопотоками к рыночному основные изменения коснулись порядка направления порожних вагонов на станции погрузки. Если раньше передача порожняка осуществлялась в порядке регулировочных заданий с использованием балансового метода, а станции погрузки определялись диспетчерским персоналом на стадии сменно-суточного планирования, то в настоящее время заадресовка порожнего вагона оформляется по полным перевозочным документам с указанием станции назначения и получателя вагона [1, 2].

В таких условиях распределение порожних вагонов на станции погрузки стало выполняться не на стадии сменно-суточного планирования, а гораздо раньше (до семи суток и более) в зависимости от времени порожнего рейса, что существенно снизило точность планирования их работы [3–6].

Из-за наличия станций назначения у всех порожних вагонов увеличился объём сортировочной и маневровой работы на технических и грузовых станциях. Порожние вагоны одного типа и одного собственника приходится перерабатывать в соответствии с назначением независимо от их расположения на станционных путях и в составе поезда. При этом для получателя важен своевременный подвод вагонов определённого типа и конструкционных особенностей без какой-либо привязки к номеру.

На многих зарубежных железных дорогах порожние вагоны имеют жёсткую привязку к станциям назначения и отправителям, так как это оправдано существенно меньшим расстоянием порожнего рейса вагона, высокой специализацией подвижного состава и маршрутизацией перевозок, а также наличием развитой инфраструктуры и относительно невысокой интенсивностью её использования [7, 8]. Тем не менее описанная выше ситуация, по мнению автора, может складываться и на железных дорогах других стран, что делает проблему и цель исследования достаточно универсальными.

Основной *гипотезой* для исследования является то, что объём маневровой работы может быть снижен при переходе от жёсткой привязки вагонов к станциям назначения к гибкой, когда допускается изменение

назначений порожних вагонов одного типа и конструкционных особенностей.

*Целью* исследования является совершенствование системы управления вагонопотоками в порожнем состоянии в условиях принадлежности всего парка вагонов операторским компаниям. Используются общенаучные, инженерные и математические *методы*, системный анализ, существующая технология организации вагонопотоков на железных дорогах.

## **ВИРТУАЛЬНАЯ СОРТИРОВКА: ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЯ**

При виртуальном перераспределении порожних вагонов по станциям назначения необходимо учитывать не только тип подвижного состава, но и конструкционные особенности вагонов по грузоподъёмности, объёму кузова и другие. Для этого необходимо предварительно выполнить декомпозицию:

- парка вагонов по всем параметрам, которые учитываются при распределении порожних вагонов под погрузку;
- заявок на погрузку по допустимым параметрам вагонов.

Это позволит для таких вагонов заменить их физическую перестановку путём выполнения маневровой работы изменением в сопровождающих вагон документах станции назначения и получателя.

Такая виртуальная сортировка порожних вагонов позволит:

- сократить объём маневровой работы на станциях выполнения грузовых операций за счёт частичной виртуальной подборки групп вагонов для прицепки и подачи;
- сократить объём и ускорить выполнение сортировочной работы на технических станциях за счёт сокращения количества отцепов в составах поездов;
- сократить время накопления составов за счёт виртуального формирования замыкающих групп и/или виртуального сгущения подвода вагонов для накапливаемого назначения;
- повысить дальность следования технических маршрутов за счёт формирования поездов более дальних назначений при виртуальном сгущении подхода порожних вагонопотоков определённого назначения.

Переход на данную технологию будет выгоден и крупным операторам вагонов, так как появится возможность заменять неакту-



Рис. 1. Сокращение количества отцепов на примере конкретного поезда.



альные станции назначения порожних вагонов актуальными, оперативно восполнять потери погрузочных ресурсов в рамках ограничений, задаваемых планом формирования поездов и другими нормативными документами, определяющими условия организации местной работы и работы станций.

Это также позволит сократить риски, связанные с неравномерностью пропуска порожних вагонопотоков и возможных изменений планов погрузки при многосуточном планировании подвода порожних вагонов под погрузку [9]. Учитывая тенденцию укрупнения операторских компаний, эффективность использования данной технологии будет увеличиваться, т.к. будет возрастать доля вагонов отдельных операторов в общем вагонопотоке.

Анализ размеченных натуральных листов грузовых поездов, содержащих порожние полувагоны ОАО «ПГК», показал целесообразность выполнения виртуальной сортировки назначений для них даже в рамках одного поезда. Так, в отдельных случаях (рис. 1), возможно сокращение количества отцепов в составе поезда на 6–7, что позволит ускорить скорость роспуска состава на сортировочной станции. Также технология виртуальной сортировки позволит сократить объёмы маневровой работы на станции, когда подбор групп порожних вагонов для подачи на грузовой фронт, прицепки к поезду и других операций будет производиться путём виртуальной перестановки назначений вагонов в электронных документах, а не самих вагонов.

## ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ

Целевая функция эффективной виртуальной сортировки порожних вагонов долж-

на обеспечивать минимизацию количества групп вагонов одного назначения в составах поездов и на станционных путях:

$$\sum (k_{отц}^{сорт} n_{отц}^{сорт} + k_{приц}^{местн} n_{приц}^{местн} + k_{отц}^{местн} n_{отц}^{местн} + k_{под}^{ср} n_{под}^{ср}) \rightarrow \min,$$

где  $k_{отц}^{сорт}$ ,  $n_{отц}^{сорт}$  — соответственно весовой коэффициент и количество отцепов в составе поезда или на станционных путях (под накоплением);

$k_{приц}^{местн}$ ,  $n_{приц}^{местн}$  — соответственно весовой коэффициент и количество групп вагонов на станционных путях к прицепке в соответствии с планом формирования;

$k_{отц}^{местн}$ ,  $n_{отц}^{местн}$  — соответственно весовой коэффициент и количество групп вагонов в составе поезда или под накоплением к отцепке на станции назначения или базовой станции;

$k_{под}^{ср}$ ,  $n_{под}^{ср}$  — соответственно весовой коэффициент и количество групп вагонов в составе поезда или на станционных путях к подаче на грузовой фронт.

При ограничениях:

- обеспечение своевременного подвода порожних вагонов на станции назначения:

$$t_{приб}^{пл} \geq t_{расч} + t_{рейс}^{пор};$$

- новая станция назначения вагона должна удовлетворять требованиям плана формирования грузовых поездов и других нормативных документов, определяющих условия организации местной работы и работы станций:

$$e_j \in E_{ij};$$

- подвода требуемого количества вагонов в соответствии с заявками отправителей по периодам планирования  $t$ :

$$\sum_{j=1}^n x(t)_{ij} = q_j(t);$$

- непревышение наличной пропускной и перерабатывающей способности используемых объектов инфраструктуры и путей необщего пользования по периодам планирования  $t$ :

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x(t)_{ij} \leq N_k(t);$$

- соответствие конструкционных особенностей вагона (тип, модель, характеристики модели) дополнительным требованиям заявки на погрузку:

$$h_j \in H_j;$$

- достаточности остаточного пробега вагона до планового ремонта для выполнения планируемой перевозки:

$$l_{ост}^{пз} \geq (l_{пор}^{ост} + l_{сп}^{пз}),$$

где  $t_{проб}^{пз}$  — предполагаемая дата погрузки или плановое время прибытия вагона под погрузку, час;

$t_{расч}$  — время расчёта, час;

$t_{рейс}^{пор}$  — планируемое время доставки вагона от текущего состояния до станции назначения, час;

$e_j$  — код станции назначения  $j$  порожнего вагона после операции «виртуальная сортировка»;

$E_{ij}$  — допустимые диапазоны кодов станций назначения вагона, зависящие от текущей дислокации  $i$ , технологического состояния, плана формирования грузовых поездов, технологии организации местной работы;

$x(t)_{ij}$  — количество вагонов, следующих со станции  $i$  на станцию  $j$  после выполнения виртуальной сортировки по периодам планирования  $t$ ;

$q_j(t)$  — функция спроса на порожние вагоны по станции  $j$  по периодам планирования  $t$ ;

$N_k(t)$  — возможности по пропуску или переработке порожних вагонопотоков объектов инфраструктуры по периодам планирования  $t$ ;

$h_j$  — параметры вагона, направленного на станцию  $j$  после виртуальной сортировки;

$H_j$  — множество допустимых параметров вагона для заявки на погрузку по станции  $j$ ;

$l_{ост}^{пз}$  — остаточный пробег вагона до планового ремонта, км;

$l_{пор}^{ост}$  — расстояние от текущей дислокации вагона до станции погрузки, км;

$l_{сп}^{пз}$  — расстояние планируемого гружёного рейса вагона в соответствии с заявкой на погрузку, км.

Перестановка назначений должна производиться в массиве порожних вагонов одного оператора (или консолидированного парка нескольких операторов), принятых к перевозке и не поданных на пути необщего пользования. По сути, это уточнение распределения вагонов по станциям погрузки с учётом их текущего состояния с целью сокращения расходов ответственной за это компании (в нашем случае — ОАО «РЖД») на выполнение перевозки при сортировочной и маневровой работе и сокращения непроизводительных операций с порожними вагонами, возникающими из-за корректировки плана грузовой работы и неравномерностью продвижения вагонопотоков.

Расчёт стоимости порожнего рейса при реализации технологии виртуальной сортировки должен выполняться по фактическому расстоянию, которое прошёл порожний вагон.

## ЭТАПЫ ВНЕДРЕНИЯ

Учитывая сложность технологии виртуальной сортировки порожних вагонов целесообразно организовать её внедрение в несколько этапов.

**1-й этап:** выполнение виртуальной сортировки в ручном режиме и в составе одного поезда. На данном этапе отрабатывается:

- взаимодействие АСУ оператора вагонов с информационно-управляющими системами ОАО «РЖД» в части формирования ограничений на замену назначений порожних вагонов (см. рис. 1), с учётом типа и конструкционных особенностей вагонов;

- информационное обеспечение технологии операции виртуальной сортировки в АСУ ОАО «РЖД».

**2-й этап:** реализация виртуальной сортировки внутри массива поездов, следующих в расформирование на одну сортировочную станцию. На данном этапе будет отрабатываться замена назначений между порожними вагонами, следующими в разных поездах.

**3-й этап:** реализация виртуальной сортировки для порожних вагонов, следующих в местном сообщении. На данном этапе будет отрабатываться виртуальная сорти-



ровка вагонов в местной работе с частичной подборкой групп вагонов к отцепке/прицепке, подаче на грузовые фронты.

**4-й этап:** реализация виртуальной сортировки для порожних вагонов на сетевом уровне с перераспределением порожних вагонов в масштабах сети в соответствии с заданными ограничениями. На данном этапе отрабатывается взаимодействие с операторами подвижного состава по замене части неактуальных назначений порожних вагонов актуальными, подвод порожних вагонов к срочным заявкам и восполнение «потери погрузочного ресурса» за счёт перераспределения их назначений в пути следования, ускоренного формирования составов за счёт виртуального сгущения подвода вагонов заданных назначений к сортировочной станции.

**5-й этап:** реализация виртуальной сортировки для порожних вагонов разных собственников. Перераспределение назначений порожних вагонов разных собственников с целью достижения минимума целевой функции.

## ВЫВОДЫ

Основной вывод, который следует из проведённого исследования, — это возможность получения позитивного эффекта, в первую очередь, экономического, при внедрении технологии виртуальной сортировки для всех участников перевозочного процесса.

Экономический эффект для ответственной за процесс сортировки порожних вагонов компании (в нашем случае — ОАО «РЖД») при реализации технологии виртуальной сортировки порожних вагонов достигается за счёт следующих составляющих:

- сокращение расходов на переработку транзитных вагонопотоков;
- снижение рисков необеспечения погрузки порожними вагонами и привлечение дополнительных объёмов погрузки;
- ускорение оборота вагонов, что позволит повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта;
- сокращение расходов и времени на расформирование составов при сокращении в них количества отцепов;
- ускорение накопления составов за счёт виртуального формирования замыкающих групп вагонов для накапливаемых составов

поездов и виртуального сгущения подвода вагонов в отдельные периоды;

- сокращение маневровой работы на станциях грузовых операций при подборе групп вагонов для подачи на грузовой фронт, прицепке/отцепке вагонов от составов поездов и других операций.

Экономический эффект для операторских компаний достигается по следующим составляющим:

- сокращение повторных порожних рейсов вагонов, простоев в ожидании погрузки, случаев позднего прибытия вагонов на станцию спроса;
- замена неактуальных назначений порожних вагонов актуальными и восполнения потери погрузочного ресурса в процессе доставки;
- перераспределение назначений порожних вагонов с учётом неравномерности пропуска порожнего вагонопотока;
- тарификация порожнего рейса вагонов по фактически пройденному расстоянию от станции выгрузки до станции погрузки без учёта изменения назначений вагонов при операции виртуальной сортировки порожних вагонов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаров В. А. Технология эксплуатационной деятельности производственного блока ОАО «РЖД», связанного с управлением перевозками // Транспорт Российской Федерации. — 2010. — № 5. — С. 58–62.
2. Кужель А. Л., Шапкин И. Н., Вдовин А. Н. Новый подход к управлению вагонопотоками // Железнодорожный транспорт. — 2010. — № 10. — С. 19–24.
3. Сотников Е. А. Шенфельд К. П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и её влияние на потребную пропускную способность участков // Вестник ВНИИЖТ. — 2011. — № 5. — С. 3–9.
4. Хусаинов Ф. И. Экономические реформы на железнодорожном транспорте: Монография. — М.: Издательский Дом «Наука», 2012. — 192 с.
5. Шенфельд К. П., Сотников Е. А., Ивницкий В. А. Задача распределения порожних вагонов под погрузку в современных условиях // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2012. — № 3. — С. 3–7.
6. Александров А. Э., Якушев Н. В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учётом случайного разброса времени доставки и времени потребления // Управление большими системами. — Выпуск 12–13. — М.: ИПУ РАН, 2006. — С. 5–14.
7. Хусаинов Ф. И. Приватизация железных дорог в Великобритании: уроки для России // Экономика железных дорог. — 2011. — № 9. — С. 83–90.
8. Railroad facts (2012 г.). Отчёт по работе американских железных дорог за 2011 г., с исправлениями и дополнениями. — М.: ЦНТИБ. — 87 с.
9. Операторы ждут профицита вагонов // «Гудок». — Вып. № 222 (26595). — 10.12.2018.





# Virtual Sorting: Improving Organization of Moving and Processing of Empty Car Flows



*Shatokhin, Andrey A., JSC NIIS, Moscow, Russia\*.*

**Andrey A. SHATOKHIN**

## ABSTRACT

*The growth in railway cargo carriage, followed by the search for its more efficient implementation results in the need to improve the regulatory framework for interaction of all participants in the transportation process on railways and the technology of organization of moving and processing of car flows on public tracks, reducing existing costs. This explains topicality of reducing shunting operations through flexible arrangement of wagons by destination stations.*

*The objective of the study is to develop the technology of «virtual sorting of empty cars». The work has used methods of system analysis and the specific tools of railway traffic management and control.*

*The technology is based on replacing physical rearrangement of empty cars when performing shunting work by introducing changes into the documents, that accompany the car, regarding the destination station and the recipient.*

*It allows to reduce the planning horizon of turnover of empty cars by clarifying their destination assignments within the delivery process and, as a consequence, to obtain a significant economic effect by reducing the costs of processing transit car flows, by reducing the risks of not providing empty cars for loading, by attracting additional loading volumes, by accelerating the turnover of cars and other effects. Ultimately, the implementation of the suggested technology can increase the competitiveness of railway transport.*

**Keywords:** *railway transport, empty car control, balance method, distribution of empty cars, application for loading, destination stations, virtual sorting, cost reduction, acceleration of movement and processing of cars.*

\*Information about the author:

**Shatokhin, Andrey A.** – head of the department of Transport systems interaction of the Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), Moscow, Russia, [aassrv@gmail.com](mailto:aassrv@gmail.com).

Article received 11.02.2019, accepted 17.06.2019.

**For the original Russian text please see p. 80.**

**Background.** The main changes on the railways of the Russian Federation during the transition from the balance method of managing empty car flows to the market method referred to the procedure of directing empty cars to the loading stations. If earlier the delivery of empty cars was carried out according to the adjustment assignments using the balance method, and the loading stations were determined by the dispatching personnel at the shift-daily planning stage, then currently the empty car is directed to destination according to the complete set of transportation documents indicating the destination station and the recipient of the car [1, 2].

Under such conditions, the distribution of empty cars by loading station was performed not at the stage of shift-daily planning, but much earlier (up to 7 days before or earlier) depending on the run time of the empty run, which significantly reduced the accuracy of planning of their operation [3–6].

Due to the assignment of exact stations of destination for all empty cars [that is the destination is linked to the wagon's registration (reference) number], the volume of sorting and shunting work at technical and cargo stations increased. Empty cars of the same type and belonging to the same owner have to be processed in accordance with their destination, regardless of their location on the station tracks and within the train. At the same time, it is important for the recipient to get timely supply of cars of a certain type and design features regardless of their registration (reference) number.

On many foreign railways, empty cars are tightly tied to destination stations and senders, since this is justified by the significantly smaller distance of the empty car's journey, high rolling stock specialization and transport routing, as well as by availability of developed infrastructure and relatively low intensity of its use [7, 8]. Nevertheless, the situation described above, in the author's opinion, can also take shape on the railways of other countries, which makes the problem and the purpose of the study quite universal.

The main *hypothesis* for the study is that the amount of shunting work can be reduced

when moving from rigid scheme of binding cars to destination stations to flexible model, when changes in the appointment of empty cars of the same type and design features are allowed.

The *objective* of the research is to consider virtual sorting process for empty car flows. The author uses general scientific and engineering *methods*, mathematical methods, comparative analysis, railway traffic control analytic tools.

## Results.

### Virtual sorting: tasks and solutions

In the virtual redistribution of empty cars by destination stations, it is necessary to consider not only the type of rolling stock, but also the design features of the cars as for their carrying capacity, body volume and others. To do this, it is necessary first to perform a decomposition of:

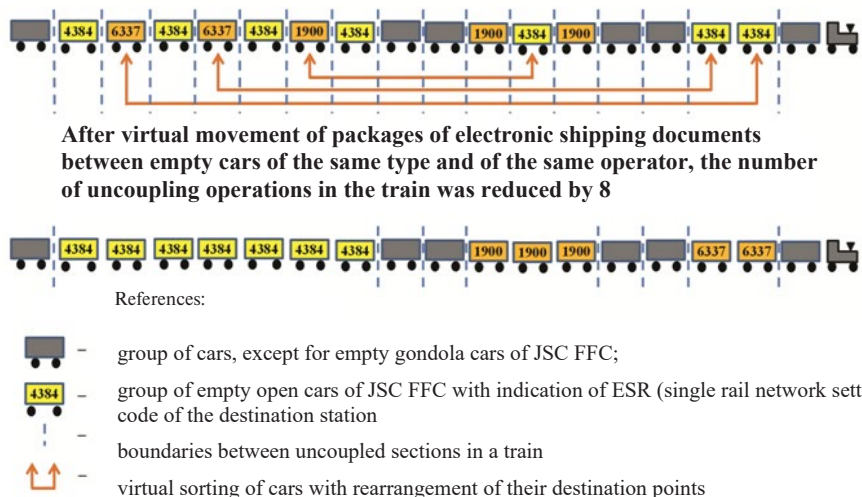
- fleet of cars according to all parameters, which are taken into account when distributing empty cars for loading;
- requests for loading according to permissible parameters of cars.

Regarding those cars this will allow to replace their physical rearrangement by performing shunting work with a change in the accompanying documents of the destination station and of the recipient.

Such virtual sorting of empty cars will allow to:

- reduce the amount of shunting work at the stations performing cargo operations thanks to a partial virtual selection of groups of cars for coupling and supply;
- reduce the volume and speed up the performance of sorting work at technical stations, thanks to the reduced number of cuts within the trains;
- reduce the time of accumulation of trains thanks to the virtual formation of closing groups and/or to virtual thickening of the supply of cars cumulated for a destination;
- increase the distance range of technical routes thanks to formation of trains for more distant destinations with a virtual condensation of the supply of empty car flows assigned to a specific destination.

Transition to this technology will also be beneficial for large car operators, since it will be possible to replace irrelevant stations of destination of empty cars with current



**Pic. 1. Decrease in number of uncoupling operations at the example of a particular train.**

ones, to quickly compensate for the loss of loading resources within the limitations set by the train formation plan and other regulatory documents that determine the conditions for organizing local work and stations' work.

It will also reduce the risks associated with uneven transit of empty car flows and possible changes in loading plans due to planning of the supply of empty cars for loading for many days [9]. Considering the tendency to consolidation of carrier companies, the efficiency of using this technology will increase, since the share of cars of individual operators in the total car flow will increase.

Analysis of marked wagon lists of freight trains containing empty open cars of JSC First Freight Company (JSC FFC) showed the feasibility of performing virtual sorting of appointments for them even within one train. So, in some cases (Pic. 1), it is possible to reduce the number of uncoupling operations in the train by 6–7 operations, which will accelerate the speed of the sorting of a train's cars at a sorting station. Also, the technology of virtual sorting will reduce the volume of shunting work at stations, when the selection of groups of empty cars for moving them to the cargo loading facilities, for coupling to trains and other operations will be performed by virtual rearrangement of appointment of cars' destination in electronic documents, rather than by physical moving of the cars.

### Target function

The target function of efficient virtual sorting of empty cars should ensure minimization of the number of groups of cars of one and the same destination in trains and on station tracks:

$$\sum (k_{uncoup}^{sort} n_{uncoup}^{sort} + k_{coup}^{loc} n_{coup}^{loc} + k_{uncoup}^{loc} n_{uncoup}^{loc} + k_{sup}^{cargo} n_{sup}^{cargo}) \rightarrow \min,$$

where  $k_{uncoup}^{sort}$ ,  $n_{uncoup}^{sort}$  are, respectively, the weighting coefficient and the number of uncoupling operations in the train or on station tracks (during accumulation);

$k_{coup}^{loc}$ ,  $n_{coup}^{loc}$  — respectively, the weighting coefficient and the number of groups of cars on station tracks prepared for coupling operations in accordance with the formation plan;

$k_{uncoup}^{loc}$ ,  $n_{uncoup}^{loc}$  — respectively, the weighting coefficient and the number of groups of cars in the train or cumulated for further uncoupling operations at the destination station or at core station;

$k_{sup}^{cargo}$ ,  $n_{sup}^{cargo}$  — respectively, the weighting coefficient and the number of groups of cars in the train or on station tracks prepared to be supplied to the cargo loading facilities;

Constrains to be met:

- ensuring timely supply of empty cars at the destination station:

$$t_{arr}^{est} \geq t_{calc} + t_{run}^{empty},$$

- new car's destination station must meet the requirements of the freight train formation plan and other regulatory documents defining





the conditions for organizing local work and station operation:

$$e_j \in E_j;$$

- supply of the required number of cars in accordance with the applications of the senders for planning periods  $t$ :

$$\sum_{j=1}^n x(t)_{ij} = q_j(t);$$

- non-exceedance of the available throughput and processing capacity of the used infrastructure facilities and of non-public tracks during planning periods  $t$ :

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x(t)_{ij} \leq N_k(t);$$

- compliance of the car's design features (type, model, model characteristics) with the additional requirements of the application for loading:

$$h_j \in H_j;$$

- sufficiency of the residual run of the car until the scheduled repair/maintenance to perform the planned transportation:

$$l_{res}^{car} \geq (l_{empty}^{res} + l_{cargo}^{pl}),$$

where  $t_{arr}^{est}$  is estimated date of loading or planned time of arrival of the car for loading, hours;

$t_{calc}$  — time of calculation, hours;

$t_{run}^{empty}$  — estimated time of delivery of the car

from the current position to the destination station, hours;

$e_j$  — code of the destination station  $j$  of the empty car after the «virtual sorting» operation;

$E_{ij}$  — allowable range of codes of destination station of the car, depending on the current location  $i$ , technological condition, plan for formation of freight trains, technology for organizing local work;

$x(t)_{ij}$  — number of cars moving from station  $i$  to station  $j$  after virtual sorting according to planning periods  $t$ ;

$q_j(t)$  — function of demand for empty cars at station  $j$  for planning periods  $t$ ;

$N_k(t)$  — capacity to allow passing or to process empty car flows of infrastructure facilities for planning periods  $t$ ;

$h_j$  — parameters of the car, sent to station  $j$  after virtual sorting;

$H_j$  — set of permissible parameters of the car for the application for loading at station  $j$ ;

$l_{res}^{car}$  — residual car mileage before scheduled maintenance, km;

$l_{empty}^{res}$  — distance from the current location

of the car to the loading station, km;

$l_{cargo}^{pl}$  — planned travel distance of the loaded

car in accordance with the application for loading, km.

The rearrangement of appointments should be made in an array of empty cars of one and the same operator (or regarding a consolidated fleet of several operators) accepted for transportation and not supplied to the track of non-public use. Essentially, this is a refinement of distribution of cars by loading stations, taking into account their current state in order to reduce the costs of the company responsible for this (in our case, JSC Russian Railways) to carry out transportation during sorting and shunting work and to reduce unproductive operations with empty cars due to adjustment of the cargo handling plan and the uneven movement of the car flows.

The calculation of the cost of an empty car's travel when implementing a virtual sorting technology should be performed regarding the actual distance that the empty car has traveled.

### Stages of implementation

Given the complexity of the technology of virtual sorting of empty cars, it is advisable to organize its implementation through several stages.

**1<sup>st</sup> stage:** performing virtual sorting in manual mode and regarding a single train. At this stage, the following is fulfilled:

- interaction of automated control systems (ACS) of the car operator with information management systems of JSC Russian Railways in terms of development of restrictions on rearrangement of appointments of empty cars (Pic. 1), taking into account the type and design features of the cars;

- information support of the virtual sorting technology operation in the automated control system of JSC Russian Railways.

**2<sup>nd</sup> stage:** implementation of virtual sorting within the array of trains, which are to be sorted at one and the same sorting station. At this stage, rearrangement of appointments between empty cars in different trains will be made.

**3<sup>rd</sup> stage:** implementation of virtual sorting for empty cars moving within local traffic. At this stage, virtual sorting of cars operated locally with a partial selection of groups of cars for uncoupling/coupling and for supplying to cargo loading facilities will be made.



4<sup>th</sup> stage: implementation of virtual sorting for empty cars at the network level with redistribution of empty cars along the network in accordance with the specified constraints. At this stage, interaction with rolling stock operators is being organized in terms of replacing part of irrelevant appointments of empty cars with currently required destinations, supplying empty cars to meet urgent requests and replenishing the «loss of loading resource» due to redistribution of their assignments during the transit process, accelerated formation of trains thanks to virtual thickening of the cars' supply of assigned destinations to the sorting station.

5<sup>th</sup> stage: implementation of virtual sorting for empty cars of different owners. Redistribution of appointments of empty cars of different owners is made in order to achieve the minimum of the target function.

**Conclusions.** The main conclusion that follows from the conducted research is the proved possibility of obtaining a positive effect, first of all, an economic one, when introducing the technology of virtual sorting for all participants in the transportation process.

The economic effect for the company responsible for the sorting process of empty cars (in our case, JSC Russian Railways) when implementing the technology of virtual sorting of empty cars is achieved thanks to the results that follow:

- reduction of costs of processing of transit car flows;
- reducing the risks of not providing empty cars for loading and attracting additional loading volumes;
- acceleration of car turnover, increasing thus the competitiveness of railway transport;
- reduction of costs and time for sorting trains, thanks to diminished number of uncoupling operations;
- acceleration of accumulation of trains thanks to the virtual formation of closure groups of cars for accumulated trains and virtual thickening of supply of cars in certain periods;
- reduction of shunting work at the stations of cargo operations during selection of groups of cars to be supplied to the cargo loading facilities and coupling / uncoupling of cars from trains and other operations.

The economic effect for carrier companies is achieved through the following:

- reduction of repeated empty voyages of cars, of downtime during waiting for loading, of cases of late arrival of cars to the station of demand;
- replacement of irrelevant appointments of empty cars with actual ones and replenishment of the loss of the loading resource in the process of delivery;
- redistribution of appointments of empty cars, taking into account the unevenness of the empty car flow;
- tariffing of an empty voyage of cars according to the actual distance traveled from the unloading station to the loading station without taking into account the change in the car assignments during the operation of virtual sorting of empty cars.

## REFERENCES

1. Sharov, V. A. Technology of operational activities of the production unit of JSC Russian Railways related to traffic control [ *Tekhnologiya ekspluatatsionnoi deyatelnosti proizvodstvennogo bloka OAO «RZD», svyazannogo s upravleniem perevozkami*]. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2010, Iss. 5, pp. 58–62.
2. Kuzhel, A. L., Shapkin, I. N., Vdovin, A. N. A new approach to management of car flows [ *Noviy podkhod k upravleniyu vagonopotokami*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2010, Iss. 10, pp. 19–24.
3. Sotnikov, E. A. Shenfeld, K. P. Unevenness of cargo transportation in modern conditions and its impact on the required capacity of sections of railways [ *Neravnomernost' gruzovykh perevozok v sovremennykh usloviyakh i ee vliyaniye na potrebnuyu propusknyuyu sposobnost' uchastkov*]. *Vestnik VNIIZhT*, 2011, Iss. 5, pp. 3–9.
4. Khusainov, F. I. Economic reforms in railway transport: Monograph [ *Ekonomicheskie reformy na zheleznodorozhnom transporte: Monografiya*]. Moscow, Nauka, 2012, 192 p.
5. Shenfeld, K. P., Sotnikov, E. A., Ivitsky, V. A. The task of distributing empty cars for loading in modern conditions [ *Zadacha raspredeleniya porozhnykh vagonov pod pogruzku v sovremennykh usloviyakh*]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, 2012, Iss. 3, pp. 3–7.
6. Aleksandrov, A. E., Yakushev, N. V. Stochastic statement of a dynamic transport problem with delays taking into account random distribution of delivery time and consumption time [ *Stokhasticheskaya postanovka dinamicheskoi transportnoi zadachi s zaderzhkami s uchetom sluchainogo razbrosa vremeni dostavki i vremeni potrebleniya*]. *Upravlenie bolshimi sistemami*, Iss. 12–13. Moscow, IPU RAS, 2006, pp. 5–14.
7. Khusainov, F. I. Privatization of railways in the UK: lessons for Russia [ *Privatizatsiya zheleznnykh dorog v Velikobritanii: uroki dlya Rossii*]. *Ekonomika zheleznnykh dorog*, 2011, Iss. 9, pp. 83–90.
8. Railroad Facts. Report on the work of American Railways in 2011, with amendments and additions. Moscow, CNTIB, 2012, 87 p.
9. Operators are waiting for a surplus of cars [ *Operatory zhduť profitsita vagonov*]. *Gudok*, Iss. 222 (26595) of December 10, 2018.





# Совершенствование методики расчёта параметров сортировочных горок



Иван СТАРШОВ



Валерий КОБЗЕВ



Евгений СЫЧЁВ

*Старшов Иван Петрович* — Российский университет транспорта, Москва, Россия.  
*Кобзев Валерий Анатольевич* — Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре — филиал ОАО «РЖД», Москва, Россия.  
*Сычёв Евгений Иванович* — Российский университет транспорта, Москва, Россия\*.

В работе представлен новый подход к выбору расчётных нормативов при проектировании сортировочных горок, которые являются одним из важнейших элементов железнодорожных станций. Высота сортировочных горок является определяющим параметром в обеспечении успешной и безопасной работы по расформированию составов на станциях. Наибольшее влияние на расчётную высоту сортировочных горок оказывают длина пробега и величина основного удельного сопротивления движению расчётных бегунов.

В связи с изменением в настоящее время структуры перерабатываемого вагонопотока на станциях требуется пересмотр существующих методик. Целью исследования является пересмотр существующей методики выбора расчётного бегуна и расчётной точки при определении расчётной высоты сортировочных горок.

По результатам проведённого с использованием методов статистического и математического анализа исследования вес расчётного бегуна предлагается определять по средней величине всего вагонопотока, перерабатываемого на сортировочной горке, а расчётную длину пробега и расчётную точку принимать с учётом полезной длины и уклонов сортировочных путей. Применение предложенных изменений в методике определения потребной высоты сортировочных горок будет способствовать повышению эффективности и безопасности их работы. Методология исследования, при том, что непосредственно цифровые выводы предназначены для использования на российских железных дорогах, тем не менее может быть применена при проведении аналогичного анализа в условиях любых других железных дорог.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, станция, сортировочная горка, вагон, расчётный бегун, параметры сортировочных горок, методика расчёта.

\*Информация об авторах:

**Старшов Иван Петрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожных станций и транспортных узлов Российского университета транспорта, Москва, Россия, [ivstarshov@gmail.com](mailto:ivstarshov@gmail.com).  
**Кобзев Валерий Анатольевич** — доктор технических наук, профессор, ведущий технолог Проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре — филиала ОАО «РЖД», Москва, Россия, [vkobzev46@yandex.ru](mailto:vkobzev46@yandex.ru).  
**Сычёв Евгений Иванович** — кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожных станций и транспортных узлов Российского университета транспорта, Москва, Россия, [sychevei@yandex.ru](mailto:sychevei@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 15.11.2018, актуализирована 18.02.2019, принята к публикации 25.05.2019.

For the English text of the article please see p. 94.

Сортировочные горки являются одним из важнейших элементов железнодорожных станций по расформированию и формированию вагонопотоков на сети железных дорог. Определяющим параметром в обеспечении успешной и безопасной работы по расформированию составов на станциях является потребная высота сортировочных горок, которая зависит от многих факторов: особенностей перерабатываемого вагонопотока, ходовых свойств вагонов, характеристик пути, метеорологических условий. Наибольшее влияние на высоту сортировочных горок, как показывают опыт и соответствующие результаты статистического и математического анализа, оказывают расчётная длина пробега вагонов и величина основного удельного сопротивления движению расчётных бегунов.

В литературных источниках и российских действующих нормативных документах по проектированию сортировочных устройств [1–5] расчётная высота сортировочных горок ( $H_p$ ) определяется по условию докатывания расчётного бегуна (типа вагона и его массы) до расчётной точки (РТ) с учётом его ходовых свойств, характеристик пути, кривых и стрелок, метеорологических данных, соответствующих расчётному месяцу:

$$H_p = 1,75 \left[ L_p w_o + \sum_{i=1}^K (l_i w_{cb,i} + 0,56 v_i^2 n_{ci} + 0,23 v_i^2 a_{ci}^o) \right] 10^{-3} + L_{ch} w_{ch} 10^{-3} - \frac{v_o^2}{2g}, \text{ м}, \quad (1)$$

где 1,75 – коэффициент отклонения расчётных значений удельных сопротивлений движению от их средних значений;

$L_p$  – расчётная длина пробега вагона от вершины горки до РТ, м;

$w_o$  – основное удельное сопротивление движению вагонов, кгс/тс;

$w_{cb}$  – удельное сопротивление движению вагона от воздушной среды и ветра, кгс/тс;

$0,56 v_i^2 10^{-3}$  – средняя удельная работа сил сопротивления движению вагона от ударов об острия, крестовину и контррельсы одного стрелочного перевода, м эн. в.;

$v_i$  – средняя скорость движения вагона на расчётном  $i$ -ом участке, м/с;

$n_{ci}$  – число стрелочных переводов на пути следования вагона по  $i$ -му расчётному участку;

$0,23 v_i^2 10^{-3}$  – средняя удельная работа (в метрах энергетической высоты) сил сопротивления движению вагона на роликовых

подшипниках в кривых участках пути на каждый градус угла поворота;

$\alpha_{ki}^o$  – сумма углов поворота в (градусах)

в кривых, включая переводные кривые стрелочных переводов, на расчётном  $i$ -ом участке;

$L_{ch}$  – расстояние от начала головного стрелочного перевода пучка сортировочных путей до расчётной точки, м;

$w_{ch}$  – среднее удельное сопротивление движению вагона от снега и инея;

$$\frac{v_o^2}{2g'} = h_o - \text{энергетическая высота (удельная}$$

кинетическая энергия), соответствующая расчётной скорости роспуска состава м эн.в.;

$v_o$  – расчётная скорость роспуска состава, м/с;

$g' = g/(1 + g)$  – величина ускорения силы тяжести вагона с учётом влияния инерции его вращающихся масс, м/с<sup>2</sup>;

$g = 0,42 n_0/q$  – коэффициент, учитывающий влияние инерции вращающихся масс вагона;

$n_0, q$  – соответственно число осей и вес расчётного бегуна брутто, тс.

Расчётная точка (РТ) принимается на расчётном трудном (по условиям движения вагонов по уклонам, кривым и стрелочным участкам) сортировочном пути на расстоянии 50 метров от выходного конца парковой тормозной позиции, при этом полезная длина парковых путей не учитывается.

Вес расчётного бегуна устанавливается [5, с. 25] на основании анализа структуры вагонопотока, перерабатываемого на горке в наиболее напряжённый и неблагоприятный период года. Если перерабатываемый вагонопоток относится к смешанному типу (число легковесных вагонов составляет более 10 %), то вес расчётного бегуна принимается как средневзвешенное значение веса вагона в выделенной группе легковесных вагонов. Если перерабатываемый вагонопоток относится к груженому типу (число легковесных вагонов менее 10 %), то вес расчётного бегуна принимается как средневзвешенное значение веса вагона в выделенной группе (около 10 % вагонопотока), состоящей из вагонов лёгкой и средней весовых категорий.

Основное удельное сопротивление движению вагонов при скатывании их с горки рассматривается как случайная величина, распределение которой можно аппроксимировать гамма-распределением [5, с. 20; 6, с. 127]. Численные значения  $w_o$  принимаются вне за-



**Числовые характеристики распределения  $w_0$ , (кгс/тс)  
для различных весовых категорий вагонов**

Диапазон веса вагонов, $q$ , тс	Весовая категория вагонов		Числовые характеристики распределения $w_0$ , кгс/тс	
	Наименование	Обозначение	Среднее значение $w_0$	Среднее квадратичное отклонение
До 28	Лёгкая	Л	1,75	0,67
28–44	Легко-средняя	ЛС	1,54	0,59
44–60	Средняя	С	1,40	0,50
60–72	Средне-тяжёлая	СТ	1,25	0,38
Свыше 72	Тяжёлая	Т	1,23	0,35

висимости от температуры наружного воздуха применительно к весовым категориям одиночных вагонов в соответствии с таблицей 1.

При выполнении горочных конструкторских и технологических поверочных расчётов значения основного удельного сопротивления  $w_0$  движению расчётных бегунов обычно принимаются следующими:

- очень плохой бегун (ОП) – 4,5 кгс/тс; плохой бегун (П) – 4,0 кгс/тс;
- хороший бегун (Х) – 0,8 кгс/тс; очень хороший бегун (ОХ) – 0,5 кгс/тс, то есть общий разброс сопротивлений движению достаточно большой.

Для более точного учёта влияния веса вагонов основное удельное сопротивление движению вагонов и среднее квадратичное отклонение могут рассчитываться по формулам:

$$w_0 = 188/q + 80, \quad (2)$$

$$\sigma_w = 67/q + 80. \quad (3)$$

Практика показывает, что наибольшее влияние (60–65 %) на высоту сортировочных горок оказывают расчётная длина пробега и величина основного удельного сопротивления движению, поэтому выбор и обоснование этих величин является важным фактором в определении оптимальных параметров горки.

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНИВШИХСЯ УСЛОВИЙ

В настоящее время существенно изменились эксплуатационные условия работы железных дорог России [7, с. 12; 8, с. 34], поэтому выбор только 10 % вагонопотока при определении расчётной величины  $w_0$  не отражает современные реальные условия работы горок. Так, при переходе в период 2004–2012 гг. российских железных дорог к работе с приватным вагонным парком множественность операторов подвижного состава привела к росту до 41 % порожнего пробега вагонов. При этом существенно из-

менилась и структура перерабатываемого вагонопотока на станциях (таблица 2).

Сегодня нередко случаи, когда легковесные вагоны составляют более половины общего объёма поступающих на сортировочные горки, тогда как ранее этот показатель был в 2–3 раза меньше. В сложившихся условиях существующая расчётная высота большинства сортировочных горок оказывается недостаточной. В результате значительная часть порожних вагонов не добежит до середины сортировочных путей. Для их осаживания приходится производить дополнительную маневровую работу в сортировочном парке. На основании изложенного можно заключить, что существующая методика выбора расчётного бегуна и расчётной точки при определении расчётной высоты сортировочных горок требует пересмотра.

Таким образом, целью исследования является пересмотр существующей методики выбора расчётного бегуна и расчётной точки при определении расчётной высоты сортировочных горок.

### ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА

Вес расчётного бегуна предлагается определять по средней величине всего вагонопотока ( $n$ ), перерабатываемого на горке в наиболее напряжённый и неблагоприятный период года, а не по выделенной группе вагонов, то есть:

$$q_p^c = \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{n}, \quad (4)$$

и далее по таблице 1 или формуле (2) определять среднюю расчётную величину  $w_0^c$ .

Расчётную длину пробега ( $l_{рп}$ ) и расчётную точку предлагается принимать с учётом всей полезной длины ( $l_{сп}$ ) сортировочных путей от парковой тормозной позиции до противовклона. В этом случае полная расчётная длина пробега с учётом расстояния от вершины гор-



**Изменение структуры перерабатываемых вагонопотоков (в %) на сортировочных горках в разные годы их эксплуатации**

Весовая категория, тс	1970 год	1990 год	2016 год
Лёгкая (до 28)	17 %	7,3 %	61 %
Легко-средняя (28–44)	15 %	2,7 %	4 %
Средняя (44–60)	18 %	25 %	8 %
Тяжёлая (свыше 72)	50 %	65 %	27 %

ки до парковой тормозной позиции  $l_{\text{вг}}$  будет равна:

$$l_{\text{рп}} = l_{\text{вг}} + l_{\text{сп}} \quad (5)$$

Расчётную высоту сортировочных горок следует определять по формуле:

$$H_{\text{р}} = [L_{\text{р}} w_{\text{о}} + \sum_{i=1}^K (l_i w_{\text{св},i} + 0,56 v_i^2 n_{\text{св}} + 0,23 v_i^2 \alpha_{\text{св}}^{\circ})] 10^{-3} + L_{\text{сн}} w_{\text{сн}} 10^{-3} - \frac{v_{\text{о}}^2}{2g}, \quad (6)$$

где  $L_{\text{р}} = l_{\text{рп}} = l_{\text{вг}} + l_{\text{сп}}$  — полная расчётная длина пробега вагона от вершины горки до расчётной точки в конце сортировочных путей;

$w_{\text{о}} = w_{\text{о}}^{\text{с}}$  — средняя величина основного удельного сопротивления движению вагонов, соответствующая средней величине ( $q_{\text{р}}^{\text{с}}$ ) всего вагонопотока расчётного месяца.

Предварительные оценки показывают, что изменение высоты сортировочных горок при расчёте по формуле (6) может составлять  $\pm 10$ – $20$  % по сравнению с величинами, рассчитанными по формуле (1). При этом расчёты по формуле (6), по нашему мнению, являются более точными, т.к. в ней учитываются полные реальные вагонопотоки и полезная длина сортировочных путей.

## Выводы

1. Опыт работы и проектирования сортировочных горок показал, что наибольшее влияние на их основные определяющие параметры (высоту и продольный профиль) оказывают расчётная длина пробега и величина основного удельного сопротивления движению расчётных бегунов.

2. В настоящее время, в связи с переходом ОАО «РЖД» к работе с приватным вагонным парком наблюдается рост порожнего пробега вагонов (до 41 %) и, соответственно, существенное изменение структуры вагонопотоков на станциях, что требует пересмотра методики расчёта и нормативного документа [5] по проектированию сортировочных горок.

3. В связи с изменением структуры вагонопотоков на станциях ОАО «РЖД» вес

расчётного бегуна на сортировочной горке предлагается определять по средней величине всего вагонопотока, перерабатываемого на горке в наиболее напряжённый и неблагоприятный период года, а расчётную длину пробега и расчётную точку принимать с учётом полезной длины сортировочных путей.

Применение предложенных изменений методики расчёта будет способствовать оптимизации работы сортировочных горок, сокращению эксплуатационных расходов и повышению безопасности отпуска.

Методология исследования, при том, что непосредственно цифровые выводы предназначены для использования на российских железных дорогах, тем не менее может быть применена при проведении аналогичного анализа в условиях любых других железных дорог.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР. ВСН 56–78. — М.: Транспорт, 1978. — 175 с.
2. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы): Учебник под ред. Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. — 1086 с.
3. Шейкин В. П. Эксплуатация механизированных сортировочных горок. — М.: Транспорт, 1992. — 240 с.
4. Родимов Б. А., Павлов В. Е., Прокинова В. Д. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных горок. — М.: Транспорт, 1980. — 96 с.
5. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. — М.: Техинформ, 2003. — 168 с.
6. Чистяков В. П. Курс теории вероятностей / 8 изд., испр. — М.: URSS, 2015. — 304 с.
7. Шапкин И. Н., Юсипов Р. А., Кожанов Е. Н. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах: методы, алгоритмы, технология расчёта. — М.: ИСПИ РАН, 2006. — 265 с.
8. Шенфельд К. П., Сотников Е. А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. — М.: Научный мир, 2015. — 200 с.
9. Рудановский В. М., Старшов И. П., Кобзев В. А. О попытке критики теоретических положений динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. — 2016. — № 6. — С. 19–28.





# Improving the Methodology for Calculating the Parameters of Hump Yards



Ivan P. STARSHOV



Valery A. KOBZEV



Evgeny I. SYCHYOV

*Starshov, Ivan P., Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

*Kobzev, Valery A., Infrastructure Design and Development Bureau – a branch of JSC Russian Railways, Moscow, Russia.*

*Sychyov, Evgeny I., Russian University of Transport, Moscow, Russia \*.*

## ABSTRACT

The paper presents a new approach to selection of design standards in design of hump yards, which are among the most important elements of railway stations. The height of gravity hump is a key parameter to ensure successful and safe operations of separating railway cars at stations. Estimations of the gravity hump's height are influenced mostly by the path length and the value of the main specific resistance to movement of the estimated free axles.

Following currently changing structure of the processed car flow at stations, it is necessary to update the current methods. The objective of the study is to update the existing method of choosing of estimated free axle and estimated point while

calculating the estimated height of marshalling gravity humps.

Following the results of the study that used statistical and mathematical analysis the weight of the estimated free axle is proposed to be determined by the average value of the total car flow processed at the hump yard, and that calculations of estimated path length and estimated point should take into account the useful length and slopes of the sorting tracks.

The application of the proposed changes in the methodology for determining the required height of gravity humps will help to increase the efficiency and safety of their operation. The methodology of the study, while its conclusions in the form of calculated values are intended for Russian railways, can be applied for conducting similar analysis at any railway.

**Keywords:** transport, railway transport, station, marshalling yard, gravity hump, car, estimated free axle, parameters of hump yards, calculation procedure.

\*Information about the authors:

**Starshov, Ivan P.** – Ph.D. (Eng), associate professor of the department of railway stations and transport junctions of Russian University of Transport, Moscow, Russia, [ivstarshov@gmail.com](mailto:ivstarshov@gmail.com).

**Kobzev, Valery A.** – D.Sc. (Eng), professor, leading technologist of the Infrastructure Design and Development Bureau – a branch of JSC Russian Railways, Moscow, Russia, [vkobzev46@yandex.ru](mailto:vkobzev46@yandex.ru).

**Sychyov, Evgeny I.** – Ph.D. (Eng), associate professor of the department of railway stations and transport junctions of Russian University of Transport, Moscow, Russia, [sychevei@yandex.ru](mailto:sychevei@yandex.ru).

Article received 15.11.2018, revised 18.02.2019, accepted 25.05.2019.

For the original Russian text please see p. 90.

**Background.** Hump yards are among the most important elements of railway stations for separating and formation of car flows on the railway network. The decisive parameter in ensuring successful and safe operation of separating of trains at stations is the required height of humps, which depends on many factors: characteristics of a processed car flow, running properties of cars, track characteristics, and meteorological conditions. The experience and the results of statistical and mathematical analysis show that the estimated path length of cars and the value of the main specific resistance to movement of the estimated sample free axles have the greatest influence on the design of the humps' height.

**Objective.** The objective of the authors is to consider methods for improving the methodology for calculating the parameters of hump yards.

**Methods.** The authors use general scientific and engineering methods, mathematical calculations, statistical and mathematical analysis.

**Results.** The scientific papers and Russian current regulatory documents on design of sorting devices [1–5] suppose that the estimated height of humps ( $H_e$ ) is determined by the conditions of how an estimated sample free axle (a type of wagon considered together with its mass) rolls to the estimated point (EP), taking into account its running properties, characteristics of a track, curves and switches, meteorological data corresponding to the considered month:

$$H_e = 1,75 \cdot [L_e w_0 + \sum_{i=1}^K (l_i w_{rc,i} + 0,56 v_i^2 n_{ci} + 0,23 v_i^2 a_{ci}^0)] \cdot 10^{-3} + L_{sn} w_{sn} 10^{-3} - \frac{v_o^2}{2g}, \text{ m}, \quad (1)$$

where 1,75 is coefficient of deviation of estimated values of specific resistance to movement from their average values;

$L_e$  – estimated path length of a car from the top of the hump to EP, m;

$w_0$  – main specific resistance to movement of cars, kgf/tf;

$w_{rc}$  – specific resistance to movement of a car caused by air and wind, kgf/tf;

$0,56 v_i^2 10^{-3}$  – average specific work of forces of resistance to movement of a car caused by impacts against points, a frog and

counter-rails of a switch, m en. h. (meters of energy height);

$v_i$  – average speed of a car on the estimated  $i$ -th section, m/s;

$n_{ti}$  – number of turnouts along the cars' path along the  $i$ -th considered section;

$0,23 v_i^2 10^{-3}$  – average specific work (in meters of energy height) of forces of resistance to movement of a car on roller bearings in curved sections of a track per each degree of rotation angle;

$\alpha_{ci}^0$  – sum of rotation angles in (degrees)

in curves, including curved turnouts of switches, for the considered  $i$ -th section;

$L_{sn}$  – distance from beginning of the head turnout of the sorting tracks set to the estimated point, m;

$w_{sn}$  – average specific resistance to movement of a car caused by snow and hoarfrost;

$\frac{v_o^2}{2g} = h_o$  – energy height (specific kinetic

energy) corresponding to the estimated speed of separating of the wagons of a train m en.h.;

$v_o$  – estimated speed of separating of wagons of a train, m/s;

$g' = g/(1 + g)$  – value of acceleration of gravity of a car, taking into account influence of inertia of its rotating masses, m/s<sup>2</sup>;

$g = 0,42 n_0/q$  – coefficient taking into account influence of inertia of rotating masses of a car;

$n_0, q$  – accordingly, the number of axles and the gross weight of the estimated sample free axle, tf.

The estimated point (EP) is assumed to be located on an estimated «difficult» track (with regard to the conditions of movement of cars along slopes, curves and switch sections) of a sorting track at a distance of 50 meters from the output end of the yard brake position, while the useful length of the yard tracks is not taken into account.

The weight of the estimated free axle is calculated [5] on the basis of the analysis of the structure of the car flow processed at the hump yard during the most intense and unfavorable period of the year. If the processed wagon flow is of the mixed type (the share of lightweight cars is more than 10 %), then the weight of the estimated free



Table 1

Numerical characteristics of distribution  $w_0$ , (kgf/tf) for different weight categories of wagons

Weight range of wagons, q, tf	Weight category of wagons		Numerical characteristics of distribution $w_0$ , kgf/tf	
	Name	Designation	Average value $w_0$	Standard deviation
Up to 28	Light	L	1,75	0,67
28–44	Light-medium	LM	1,54	0,59
44–60	Medium	M	1,40	0,50
60–72	Medium-heavy	MH	1,25	0,38
Свыше 72	Heavy	H	1,23	0,35

Table 2

Change in the structure of processed wagon flows (in %) at hump yards during different years of their operation

Weight category, tf	1970	1990	2016
Light (up to 28)	17 %	7,3 %	61 %
Light-medium (28–44)	15 %	2,7 %	4 %
Medium (44–60)	18 %	25 %	8 %
Heavy (above 72)	50 %	65 %	27 %

axle is taken as the weighted average weight of a car in the selected group of lightweight cars. If the processed wagon flow belongs to the loaded type (the share of lightweight cars is less than 10 %), then the weight of the estimated free axle is taken as the weighted average value of the car weight in the selected group (about 10 % of the car flow), consisting of light and medium weight cars.

The main specific resistance to movement of cars rolling down the hump is considered as a random variable, the distribution of which can be approximated by the gamma distribution [5, p. 20; 6, p. 127]. The numerical values of  $w_0$  are considered regardless of the outdoor temperature and are applied to the weight categories of single cars according to Table 1.

When performing hump design and technological verification calculations, the values of the main specific resistance  $w_0$  to movement of the estimated free axles are usually taken as follows:

– a very bad free axle (VB) – 4,5 kgf/tf; bad free axle (B) – 4,0 kgf/tf;

– a good free axle (G) – 0,8 kgf/tf; a very good free axle (VG) – 0,5 kgf/tf, that is, the total spread of resistance to movement is quite large.

To more accurately take into account the influence of weight of cars, the main specific resistance to movement of cars and the standard deviation can be calculated by the formulas:

$$w_0 = 188/q + 80, \quad (2)$$

$$\sigma_w = 67/q + 80. \quad (3)$$

Practice shows that the greatest impact (60–65 %) on the height of humps is exerted by the estimated path length and the value of the main specific resistance to movement, so the choice and justification of these values is an important factor in determining the optimal parameters of the hump.

#### The impact of changing conditions

Currently, the operating conditions of the Russian railways have changed significantly [7, p. 12; 8, p. 34], so the choice of only 10 % of the car flow when determining the estimated value of  $w_0$  does not reflect the current real conditions of hump yards. In 2004–2012 Russian railways were developing operations with private wagon fleet, and the multiplicity of rolling stock operators has led to an increase to 41 % of the rate of empty run of cars. At the same time, the structure of the processed wagon flow at stations has significantly changed (Table 2).

Today, it is not uncommon for lightweight railcars to make up more than half of the total volume of wagons arriving at hump yards, whereas earlier this indicator was 2–3 times less. Under those circumstances, the current estimated height of most humps is insufficient. As a result, a significant portion of empty cars stops at the middle of sorting tracks. For their further marshalling it is necessary to perform additional shunting work at the hump yard. Based on the foregoing, it can be concluded that the existing methodology for choosing the estimated sample free axle and estimated point in determining the design height of humps requires revision.



### Proposed methodology

It is proposed to determine the weight of the estimated sample free axle by the average value of the total wagon flow ( $n$ ) processed at the hump yard during the most intense and unfavorable period of the year, and not by the specified group of cars, that is by formula:

$$q_e^{av} = \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{n}, \quad (4)$$

and then, according to Table 1 or formula (2), determine the average estimated value  $w_o^{av}$ .

It is proposed to take the estimated path length ( $l_{epl}$ ) and the estimated point taking into account the entire useful length ( $l_{st}$ ) of the sorting tracks from the yard brake position to the opposite elevation (inverse slope). In this case, the total estimated path length taking into account the distance from the top of the hump to the yard brake position  $l_{th}$  will be equal to:

$$l_{epl} = l_{th} + l_{st}. \quad (5)$$

The estimated height of humps should be determined by the formula:

$$H_e = [L_e \cdot w_o + \sum_{i=1}^K (l_i w_{rc,i} + 0,56v_i^2 n_{ci} + 0,23v_i^2 \dot{a}_{ci}^0)] \cdot 10^{-3} + L_{sn} w_{sn} 10^{-3} - \frac{v_o^2}{2g}, \text{ m}, \quad (6)$$

where  $L_e = l_{epl} = l_{th} + l_{st}$  is full estimated path length of the car from the peak of the hump to the estimated point at the end of the sorting tracks;

$w_o = w_o^{av}$  – average value of the main specific resistance to movement of cars, corresponding to the average value ( $q_e^{av}$ ) of the total car flow during the calculated month.

Preliminary estimates show that the change in the height of humps using formula (6) can be of  $\pm 10$ – $20$  % compared with the values calculated by formula (1). Moreover, the calculations according to formula (6), in our opinion, are more accurate, because that formula takes into account the full real car flows and the useful length of sorting tracks.

### Conclusions.

1. The practices of designing of hump yards showed that their main parameters (height and longitudinal profile) are most influenced by the estimated path length and the value of the main specific resistance to movement of estimated sample free axles.

2. Currently, as Russian Railways work with a private car fleet, there is an increase in empty mileage of cars (up to 41 %) and, accordingly, a significant change in the structure of car flows at stations, requiring a modification of the calculation

method and of the regulatory document [5] regarding design of hump yards.

3. Following the change in the structure of car flows at the stations of Russian Railways, the weight of the estimated sample free axle at the hump yard is proposed to be determined by the average value of the total car flow processed at the hump yard during the most stressful and unfavorable period of the year, and the estimated path length and the estimated point should be considered with account of the useful length of sorting tracks.

The application of the proposed changes in the calculation method will help optimize the operation of hump yards, reduce operating costs and increase safety of separating the wagons of the trains.

The suggested methodology, while values in the research have been calculated at the example of Russian railways, can be applied for similar analysis for any other railways.

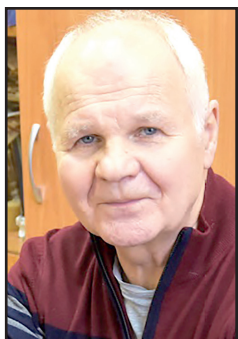
### REFERENCES

1. Instructions for design of stations and junctions on the railways of the USSR. VSN56-78 [*Instruktsiya po proektirovaniyu stantsuu i uzlov na zheleznykh dorogakh Soyuza SSR. VSN56-78*]. Moscow, Transport publ., 1978, 175 p.
2. Designing the infrastructure of railway transport (stations, railway and transport hubs): Textbook [*Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnie i transportnie uzly)*]; Uchebnik]. Ed. by N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko. Moscow, TMC for education for railway transport, 2012, 1086 p.
3. Sheikin, V. P. Operation of mechanized hump yards [*Ekspluatatsiya mekhanizirovannykh sortirovochnykh gorok*]. Moscow, Transport publ., 1992, 240 p.
4. Rodimov, B. A., Pavlov, V. E., Prokina, V. D. Design of mechanized and automated hump yards [*Proektirovanie mekhanizirovannykh i avtomatizirovannykh sortirovochnykh gorok*]. Moscow, Transport publ., 1980, 96 p.
5. Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm gauge railways [*Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm*]. Moscow, Tekhninform publ., 2003, 168 p.
6. Chistyakov, V. P. Course in probability theory [*Kurs teorii veroyatnostei*]. 8<sup>th</sup> ed., rev. Moscow, URSS publ., 2015, 304 p.
7. Shapkin, I. N., Yusipov, R. A., Kozhanov, E. N. Standardisation and forecasting at railways: methods, algorithms, calculation technology [*Normirovanie i prognozirovanie na zheleznykh dorogakh: metody, algoritmy, tekhnologiya rsascheta*]. Moscow, ISPI RAS publ., 2006, 265 p.
8. Shenfeld, K. P., Sotnikov, E. A. Development of methods for controlling the transportation process by railways in modern conditions [*Razvitiye metodov upravleniya peredovym protsessom na zheleznodorozhnom transporte v sovremennykh usloviyakh*]. Moscow, Nauchnyi mir publ., 2015, 200 p.
9. Rudanovsky, V. M., Starshov, I. P., Kobzev, V. A. On an attempt to criticize the theoretical positions of the dynamics of rolling of a wagon down the slope of a gravity hump [*O popytke kritiki teoreticheskikh polozhenii dinamiki skatyvaniya vagona po uklonu sortirovochnoi gorki*]. *Bulletin of Transport Information*, 2016, Iss. 6, pp. 19–28. ●





# Интеллектуализация контроля вагонов в железнодорожном сортировочном парке



Сергей КОВАЛЁВ



Андрей СУХАНОВ

*Ковалёв Сергей Михайлович – Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия.*

*Суханов Андрей Валерьевич – Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия\*.*

Железнодорожная сортировочная станция занимает центральное место в технологической цепочке грузовых перевозочных процессов, поскольку скорость переработки железнодорожных составов на ней определяет объём и стоимость перевозок. Поэтому развитие средств автоматизации и информатизации сортировочных процессов ведёт к повышению эффективности грузовых перевозок в целом.

Целью работы является формализация задачи контроля вагонов в железнодорожном сортировочном парке и разработка метода её решения, основанного на использовании алгоритмов распознавания и позиционирования динамических объектов путём интеллектуального анализа данных потокового видео.

В работе представлен новый подход к решению задачи контроля подвижных единиц в подгорочном (сортировочном) парке железнодорожных сортировочных станций. Приводятся основные критерии определения скорости движения и позиционирования групп вагонов при их движении после расформирования на сортировочной горке. Определено, что контроль подвижных

единиц в сортировочном парке является менее автоматизированным процессом по сравнению с контролем на сортировочной горке. Для решения поставленной задачи автоматизации контроля подвижных единиц в сортировочном парке предложен алгоритм на базе методов интеллектуального анализа видеоданных – компьютерного зрения – и представлена его модель реализации на конкретном объекте.

Методы работы основаны на теории компьютерного зрения и направлены на распознавание ключевых динамических объектов на потоковом видео с их последующим позиционированием.

Результатом проведённой работы является обоснование актуальности использования компьютерного зрения в процессе расформирования-формирования железнодорожных составов. В дальнейшем планируется совершенствование представленных разработок для подготовки готового программного продукта, позволяющего объективизировать информацию о сортировочном парке для повышения эффективности прицельного торможения на сортировочной горке.

**Ключевые слова:** транспорт, железная дорога, автоматизация сортировочных процессов, заполнение путей сортировочного парка, позиционирование железнодорожных подвижных единиц, интеллектуальный анализ видеоданных, цифровизация.

\*Информация об авторах:

**Ковалёв Сергей Михайлович** – доктор технических наук, профессор, начальник Центра инновационных и интеллектуальных технологий на железнодорожном транспорте Ростовского филиала АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (ЦИИТ РостФ НИИАС), профессор кафедры автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, ksm@rfniias.ru.

**Суханов Андрей Валерьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ростовского филиала АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» ЦИИТ РостФ НИИАС, доцент кафедры вычислительной техники и автоматизированных систем управления Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, a.suhanov@rfniias.ru.

Статья поступила в редакцию 01.04.2019, принята к публикации 14.08.2019.

For the English text of the article please see p. 105.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты № 17-20-01040 офи\_м, 19-07-00263, 19-07-00195).

**С**ортировочная станция является важнейшим звеном технологической цепочки перевозочного процесса, поскольку себестоимость перевозок главным образом и напрямую зависит от долей простоя вагонов на ней [1]. Повышение эффективности технологических процессов, протекающих на сортировочных станциях и сортировочных горках, достигается за счёт совершенствования средств автоматизации и информатизации. Современные средства автоматизации сортировочных процессов, такие как КСАУСП [2], MSR-32 [3], DDC-III [4] и другие, осуществляют полный контроль подвижных единиц (определение скорости движения и позиционирование) при следовании их по сортировочной горке. После выхода подвижной единицы из сортировочной горки на путь сортировочного парка определение скорости не производится, а позиционирование доступно только для последнего зашедшего в парк вагона, что приводит к необходимости имитационного моделирования движения вагонов на основе статистических данных с привлечением ручного труда осмотрщиков вагонов. Всё это приводит к уменьшению точности и объективности контроля движения вагонов в сортировочном парке и, как следствие, к превышению скоростей соударения вагонов и появлению окон на путях парка, что негативно влияет на эффективность сортировочного процесса в целом.

Целью работы является формализация задачи позиционирующего контроля вагонов при выходе их из сортировочной горки и следовании по путям железнодорожного сортировочного парка с определением скорости их движения и соударения. Кроме того, в работе представлен метод решения формализованной задачи, основанный на использовании алгоритмов распознавания и позиционирования динамических ключевых объектов на сцене путём интеллектуального анализа данных потокового видео с помощью средств компьютерного зрения.

В работе используются две группы методов компьютерного зрения, первая из которых реализует распознавание ключевых движущихся объектов на окружающем фоне, вторая — позиционирование известных заранее объектов на сцене.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные системы автоматизации железнодорожных сортировочных процессов [2–5] осуществляют полный контроль движения групп вагонов (отцепов) на сортировочной горке по прохождению ими контрольных участков (рис. 1). На тормозных позициях контроль ведётся посредством радиолокационных измерителей скорости, на путевых участках между тормозными позициями — посредством измерения скорости по датчикам счёта осей. Устройства контрольных участков позволяют точно определять скорость вагонов, соотносить её с математической моделью, полученной от системы автоматической регулировки скорости (АРС) и оперативно корректировать алгоритмы работы тормозных средств, а, при необходимости, и систем маршрутизации отцепов.

После выхода отцепа из вагонного замедлителя парковой тормозной позиции на сортировочный путь определение скорости движения и объединения отцепа со стоящими на путях вагонами не производится, расчёт ведётся исходя из имитационной модели АРС, при построении которой учитываются статические данные о состоянии продольного профиля пути, текущие метеорологические условия и ходовые свойства вагонов (весовая категория, тип буксы, условная длина).

Согласно «Методике проверки скорости соударения вагонов на путях сортиро-

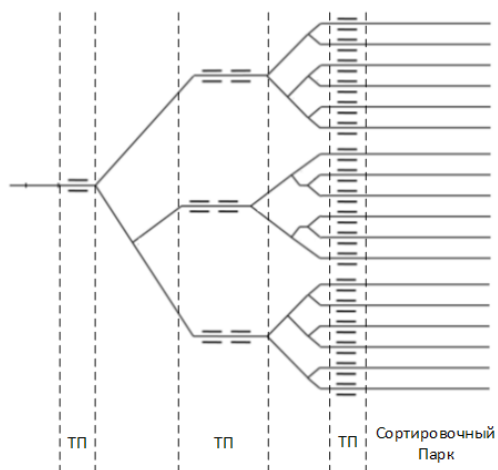


Рис. 1. Схематическое разделение сортировочной горки на контрольные участки с примыкающим сортировочным парком (ТП – тормозная позиция).



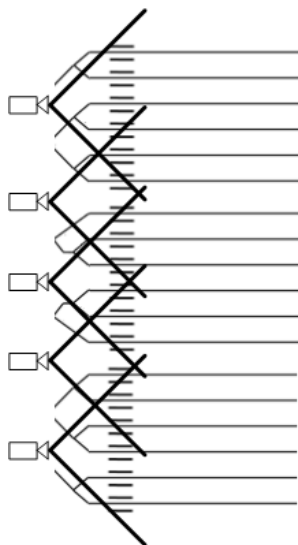


Рис. 2. Размещение камер видеонаблюдения для контроля.

вочных (подгорочных) парков»<sup>1</sup>, в обязанности осмотрщика входят ежедневные измерения скоростей объединения вагонов в подгорочном парке для 20 вагонов при помощи радиолокационных измерителей скорости. Погрешность измерения скорости данным устройством  $\pm 0,2$  км/ч, что эквивалентно 4,3 % от средней скорости движения вагонов в парке.

Количество перерабатываемых вагонов на крупной сортировочной станции, оборудованной двумя сортировочными горками, за смену в среднем составляет 9000 штук в сутки [6]. Следовательно, измерение осмотрщиками 80 вагонов в сутки (две смены на двух горках) эквивалентно покрытию всего 0,9 % от количества перерабатываемых вагонов. Кроме того, при ухудшении погодных условий резко снижается как количество, так и достоверность данных, что подтверждается анализом, проводимым в комплексной системе автоматизированного управления сортировочным процессом (КСАУ СП) [2]. Таким образом, достоверное знание о характере перемещения подвижных единиц на путях сортировочных парков в связи со всё большей автоматизацией процесса расформирования составов является всё более насущной потребностью служб железнодорожной автоматики и телемеханики.

<sup>1</sup> Распоряжение ОАО «РЖД» от 12.08.2010 г. № 1735р.

На основании вышеизложенного, задача контроля скорости движения и объединения вагонов на путях сортировочных парков при ведении роспуска на автоматизированных горках является весьма актуальной.

Решение данной задачи классическим способом (установка группы датчиков счёта осей на протяжённости всех путей сортировочного парка) не представляется эффективным по материальным и эксплуатационным показателям (общая длина путей сортировочного парка в среднем более 50 км). Для её решения необходимо разработать инструмент, позволяющий эффективно контролировать отцепы в сортировочном парке. В качестве такого инструмента могут быть использованы камеры видеонаблюдения, закреплённые на мачтах освещения парка (рис. 2).

Для автоматического преобразования видеосигналов в количественные характеристики движения контролируемых вагонов (скорость и положение) предлагается использование метода интеллектуального анализа видеоданных — компьютерного зрения, уже зарекомендовавшего себя в области коммерческих железнодорожных грузоперевозок при распознавании номеров вагонов [7], при контроле состояния железнодорожного пути [8], при обеспечении транспортной безопасности [9] и др.

Для решения задачи контроля движения вагонов в терминах компьютерного зрения [10] необходимо решить две подзадачи. Они — следующие:

1. Распознавание (сегментация) ключевых объектов.
2. Позиционирование ключевых объектов в видеопотоке.

В последующих разделах статьи описываются основные шаги решения поставленных выше задач, а также приводятся альтернативные методы реализации.

## СЕГМЕНТАЦИЯ КЛЮЧЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Решение задачи сегментации подразумевает выделение контуров ключевых объектов на окружающем фоне. При сегментации движущихся объектов контуры определяются для сущностей, положение которых отлично хотя бы в двух последовательных кадрах [11]. Следовательно,



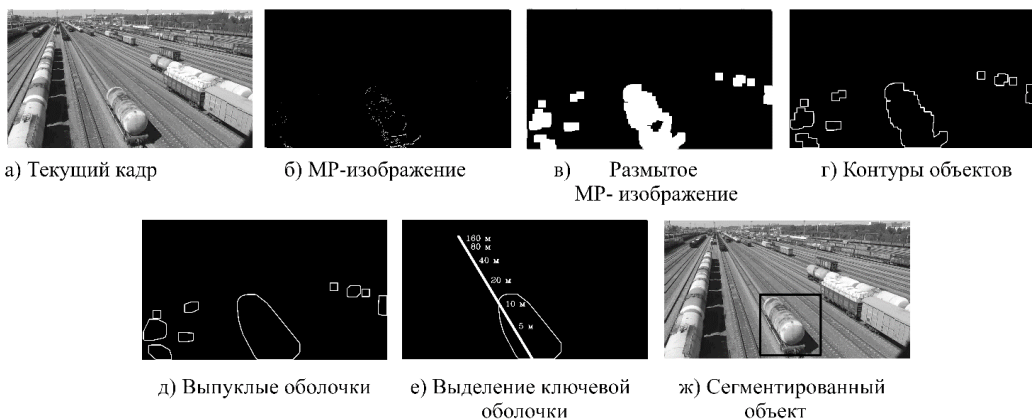


Рис. 3. Сегментация движущегося ключевого объекта-вагона через анализ межкадровой разницы.

первым этапом сегментации ключевых объектов будет определение точек, положение которых изменяется от кадра к кадру. Для его реализации в настоящей работе используется метод межкадровой разницы (МР) [12], в котором предлагается использовать разницу между интенсивностями пикселей двух последовательных кадров  $I_t$  и  $I_{t-1}$ . При этом для выявления движущихся точек необходимо выбрать граничное значение разницы, выше которого область полученного изображения будет отнесена к движущимся объектам, или – в противном случае – к фону (рис. 3б):

$$I(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } |I_t(x, y) - I_{t-1}(x, y)| > \tau, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (1)$$

где  $x, y$  – координаты пикселя;

$\tau$  – граничное значение разницы интенсивностей пикселей.

Выбор  $\tau$  обусловлен эмпирическим вычислением минимально взятого значения, при котором ещё не заметен шум воздействия окружающего фона.

Следующим этапом является выделение контуров объектов. В представляемом исследовании для его реализации использован алгоритм выделения контуров, предлагаемый в [13]. Суть алгоритма состоит в вычислении контуров (рис. 3г) движущихся объектов на морфологически расширенном МР изображении (рис. 3в) с последующим их преобразованием к выпуклым оболочкам (рис. 3д).

Размер структурного блока морфологического расширения [14] выбирался равным половине минимального расстояния

(в пикселях) между рассматриваемым и соседним путями для получения непересекающихся контуров объектов. В качестве точек контуров использованы белые пиксели, у которых хотя бы один соседний пиксель имеет нулевую интенсивность. Для получения контуров в виде выпуклых оболочек в работе применён алгоритм Джарвиса, формирующий множество точек контура  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , такое, что угол между прямой  $p_i p_1$  и прямой  $p p_{i+1}$  – максимальный.

Полученные контуры, характеризующие расположение объектов, необходимо классифицировать на ключевые и не ключевые. Ключевыми будем считать контуры, удовлетворяющие двум критериям:

1. Контур расположен на линии анализируемого пути сортировочного парка.

2. Контур имеет размеры, сопоставимые с заранее известной длиной отцепа, значение которой получено от соответствующей системы автоматизации управления сортировочной горкой.

Проверка выполнения первого критерия является тривиальной и не требует пояснений. Проверка выполнения второго критерия требует сопоставления пикселей изображения с реальными координатами путей в парке. Для этого может быть использована формула калибровки камеры, представленная в [15] и позволяющая вычислить реальное расстояние на пути в метрах через расстояние на изображении в пикселях:

$$D = \frac{L \cdot K}{W / x - 1 + K}, \quad (2)$$



где  $D$  — искомое расстояние до объекта, м;  
 $L$  — длина пути, м;  
 $W$  — длина пути в пикселях;  
 $x$  — расстояние от начала пути до анализируемой точки на изображении в пикселях;

$K$  — коэффициент наклона камеры, рассчитываемый по формуле:

$$K = \frac{W - M}{M}, \quad (3)$$

где  $M$  — расстояние от начала до середины пути в пикселях.

На рис. 3е представлена нанесённая экспертом линия анализируемого пути сортировочного парка со шкалой расстояний в метрах, полученной на основе формулы (2). Согласно информации, полученной от системы автоматизации управления сортировочным процессом, длина вагона составляет 14 метров, что соответствует длине выделенного объекта на рассчитанной шкале. Таким образом, изображённый на рис. 3е контур характеризует ключевой объект и является решением задачи сегментации.

На рис. 3ж представлено изображение, на котором сегментированный ключевой объект отмечен прямоугольником с минимальными размерами, позволяющими обвести все его контуры.

## ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОТОКЕ

Позиционирование решает задачу вычисления изменения положения объекта с известными начальными координатами относительно окружающего фона на основе известных характеристик объекта в предыдущем кадре. Благодаря использованию априорной информации об объекте позиционирования в качестве входных данных, такой подход является более эффективным и сопровождается меньшими временными затратами, чем повторная сегментация ключевого объекта в каждом новом кадре [16].

В предлагаемом исследовании в качестве априорных данных об объекте позиционирования используется изображение с размеченной областью расположения объекта (рис. 3ж).

В отличие от алгоритма сегментирования, позволяющего при использовании базовых подходов получить допустимое

решение первой подзадачи исследования, для позиционирования необходимо подобрать оптимальный комплексный подход, поскольку базовый алгоритм Adaboost [17], который формирует значение схожести каждого пикселя, соседнего к размеченной на обучающем изображении прямоугольной области, оказался не подходящим для позиционирования (рис. 4, 1 столбец).

Ниже приведено сравнение трёх современных алгоритмов позиционирования, позволяющих достичь наиболее допустимых результатов решения задачи позиционирования отцепов: многовариантное обучение (Multiple Instance Learning, MIL) [16], минимальная сумма квадратичных ошибок (Minimum Output Sum of Squared Error, MOSSE) [18], дискриминативный корреляционный фильтр с канальной и пространственной надёжностью (Discriminative Correlation Filter with Channel and Spatial Reliability, DCF-CSR) [19].

Алгоритм MIL основан на той же идее, что и Adaboost. Огромная разница состоит в том, что, кроме исходных данных, алгоритм также рассматривает соседние области изображения, которые потенциально считает расположением объекта с некоторым значением доверия. Это позволяет скорректировать позиционирование в случае неверного определения границ объекта на предыдущем шаге.

Алгоритм MOSSE ведёт поиск области в кадре, максимально похожей на изображение из множества, полученного путём небольших аффинных преобразований входного изображения (области с объектом). В качестве критерия поиска новой области с объектом на текущем кадре авторы предлагают использовать максимальное значение корреляции  $G$  между изображением  $I$ , являющимся потенциальной областью с объектом на тестовом изображении, и идеальным фильтром  $h$ , характеризующим входное изображение, в пространстве Фурье:

$$G = F(I) \odot F(h)^*, \quad (4)$$

где  $F(\cdot)$  — быстрое преобразование Фурье;

$\odot$  — поэлементное умножение матриц;

$*$  — комплексное сопряжение матрицы.

Задача сводится к поиску идеального фильтра  $h$ , Фурье преобразование которого удовлетворяет формуле:

$$\min_{F(h)} \sum_i |F(I_i) \odot F(h)^* - F(g_i)|^2, \quad (5)$$

где  $I_i$  –  $i$ -ое аффинное преобразование входного изображения;

$g_i$  – идеальный отклик на  $i$ -ое аффинное преобразование.

Идеальный отклик представляется в виде Гауссовой функции:

$$g = \exp\left(-\frac{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}{2.0}\right), \quad (6)$$

где  $x_c, y_c$  – координаты центра области;

$x, y$  – координаты точки на изображении.

Алгоритм DCF-CSR является одним из наиболее современных алгоритмов позиционирования. Он, подобно MOSSE, использует корреляционные фильтры. Отличительной особенностью алгоритма является использование карты пространственной надёжности, позволяющей игнорировать заведомо известные шумы путём присвоения каждой точке значения принадлежности к позиционируемому объекту, что приводит формулу (5) к виду:

$$\min_{F(h)} \left( \sum_i w_i |F(I_i) \odot F(h)^* - F(g_i)|^2 \right), \quad (7)$$

где  $w_i$  – вес соответствующего фильтра на основе степени аффинности преобразования, которое он реализует на входном изображении.

С точки зрения точности наиболее эффективным алгоритмом позиционирования является DCF-CSR. Для сравнения остальных алгоритмов было использовано среднее отношение числа точек перекрытия областей позиционирования к общему числу точек области позиционирования DCF-CSR. Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение точности позиционирования

Алгоритм	Точность
Adaboost	0,53
MIL	0,91
MOSSE	0,67
DCF-CSR	1

Таблица 2

Сравнение скорости позиционирования

Алгоритм	FPS
Adaboost	24
MIL	15
MOSSE	45
DCF-CSR	7

Сравнение быстроты алгоритмов на Intel Core i54200U (8 Гб DDR3) с использованием библиотек OpenCV 4.0 показано в табл. 2.

Для определения скорости движения отцепы и пройденного им расстояния была использована шкала, определённая на рис. 3е. Исходное и обработанное видео с использованием позиционирования DCF-CSR выгружены на YouTube<sup>2,3</sup>. Результаты исследования внедрены в качестве экспериментального проекта в подгоровном парке нечётной горки сортировочной станции Инская Западно-Сибирской железной дороги.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана задача контроля подвижных единиц в подгоровном парке же-

<sup>2</sup> Vehicle tracker NIAS. [Электронный ресурс]: <https://youtu.be/x-IV7zwy6k>.

<sup>3</sup> Video for vehicle tracking (NIAS) [Электронный ресурс]: <https://youtu.be/tGm9mKFyQ4U>.

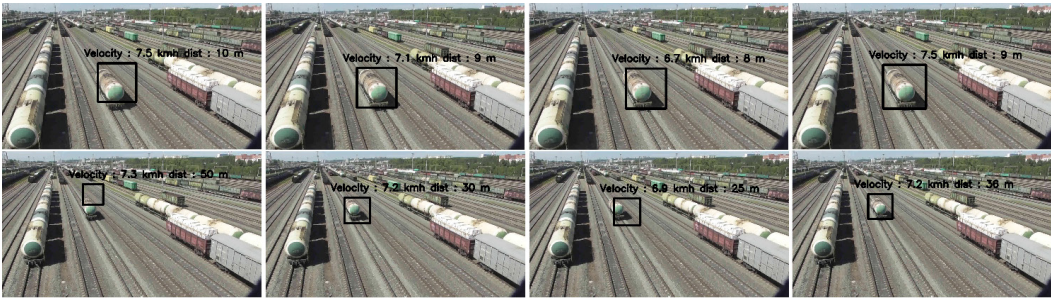


Рис. 4. Сравнение алгоритмов позиционирования (1 столбец – Adaboost, 2 столбец – MIL, 3 столбец – MOSSE, 4 столбец – DCFCSR).





лезнодорожной сортировочной станции и представлен алгоритм её решения. Предлагаемая разработка является актуальной в связи с неэффективностью использования традиционных подходов, применяемых на сортировочной горке. В работе описаны основные критерии задачи и представлены шаги возможного решения, а также проиллюстрированы результаты контроля движения одновагонного отцепа в парке.

Как следует из проведённого исследования, разработанный алгоритм является актуальным в использовании на сортировочных железнодорожных станциях, а также может быть применён в других областях, где целью является автоматический контроль скорости и местоположения объектов относительно расположения видеокамеры.

Результатом настоящей работы является обоснование актуальности использования компьютерного зрения в области железнодорожных сортировочных процессов. Внедрение разрабатываемых алгоритмов в системы автоматизации железнодорожных сортировочных процессов (например, КСАУ СП) позволит объективизировать получаемую информацию о состоянии сортировочного парка. Это в итоге создаст возможность более точной подстройки подсистемы прицельного торможения на горке, что сократит количество опасных соударений и предотвратит появление «окон» между отцепами на сортировочных путях.

В качестве дальнейших исследований планируется совершенствование представленного алгоритма для контроля движущихся отцепов, содержащих два и более вагона, а также тестирование разработанного подхода при плохой видимости (ночное время суток и неблагоприятные погодные условия).

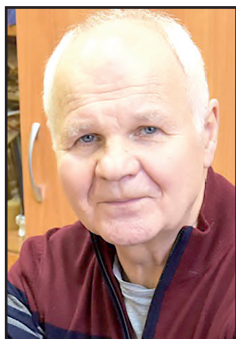
## ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалёв С. М., Ковалёв В. С., Суханов А. В. Интеллектуальный подход к прогнозированию нештатных ситуаций в процессе расформирования поездов на сортировочных горках // Труды V научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2016, 17–18 ноября 2016 г., Москва, Россия). – М.: ОАО «НИИАС», 2016. – С. 168–172.
2. Шабельников А. Н., Соколов В. Н. КСАУ СП – новое направление автоматизации сортировочных горок // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 8. – С. 2–4.
3. Hansmann R. S., Zimmermann U. T. Optimal sorting of rolling stock at hump yards / R. S. Hansmann, U. T. Zimmermann // Mathematics-key technology for the future. – 2007. – № 8. – pp. 189–203.
4. Zhang C. [et al]. Analysis of hump automation in China // Traffic and Transportation Studies. – 2000. – pp. 285–290.
5. Кобзев В. А. Автоматизированное управление на сортировочных станциях // Мир транспорта. – 2010. – № 5. – С. 60–66.
6. Шабельников А. Н. Совершенствование комплексной системы автоматизации управления сортировочным процессом и горочных технических средств в рамках реализации проекта «цифровая сортировочная станция» // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте: Сборник докладов IX Международной научно-практической конференции «ТрансЖАТ – 2018». – Ростов-на-Дону. – 243 с.
7. Артемьев И. С. Новый подход к идентификации подвижных единиц // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 11. – С. 11–14.
8. Васин Н. Н., Диязитдинов Р. Р. Система технического зрения для контроля состояния железнодорожного пути // Компьютерная оптика. – 2016. – № 3. – С. 410–415.
9. Гречухин И. А., Каркищенко А. Н. Интеллектуальная обработка видеоинформации в задачах транспортной безопасности // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 4. – С. 45–47.
10. Mahalingam T., Subramoniam M. A robust single and multiple moving object detection, tracking and classification // Applied Computing and Informatics. – 2018. – № 1. – pp. 1–10.
11. Tokmakov P., Schmid C., Alahari K. Learning to segment moving objects // International Journal of Computer Vision. – 2017. – № 3. – pp. 1–20.
12. Singla N. Motion detection based on frame difference method // International Journal of Information & Computation Technology. – 2014. – № 15. – pp. 1559–1565.
13. Aksaç A., Öztürk O., Özyer T. Real-time multi-objective hand posture/gesture recognition by using distance classifiers and finite state machine for virtual mouse operations // 7<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). – IEEE, 2011. – pp. 457–461.
14. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. – БИНОМ. Лаб. знаний, 2006. – С. 93–103.
15. Шубникова И. С., Палагута К. А. Анализ способов и алгоритмов определения параметров объекта и расстояния до него по изображению // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2013. – Т. 1. – С. 352–355.
16. Babenko B., Yang M. H., Belongie S. Visual tracking with online multiple instance learning // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2009. – pp. 983–990.
17. Yeh Y. J., Hsu C. T. Online selection of tracking features using AdaBoost // 16<sup>th</sup> International Conference on Computer Communications and Networks. – IEEE, 2007. – pp. 1183–1188.
18. Bolme D. S. [et al]. Visual object tracking using adaptive correlation filters // Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2010. – pp. 2544–2550.
19. Lukezic A. [et al]. Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2017. – pp. 6309–6318.





# Implementation of Intelligent Monitoring for the Marshalling Yard



Sergey M. KOVALYOV



Andrey V. SUKHANOV

*Kovalyov Sergey M., Rostov branch of JSC NIILAS, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia.*

*Sukhanov Andrey V., Rostov branch of JSC NIILAS, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia\*.*

## ABSTRACT

The railway marshalling station occupies a central place in the technological chain of freight transportation processes, since the speed of processing trains at marshalling yards determines the volume and cost of transportation. Therefore, development of automation and computerization of sorting processes results in growing efficiency of freight transportation in general.

The objective of the study is to formalize the problem of cars' monitoring within the railway marshalling yard and to develop a method for solving it with the use of algorithms of recognizing and positioning of dynamic objects through the intelligent data analysis of streaming video.

The article presents a new approach to solution of the problem of monitoring moving units in the hump (sorting) yard of marshalling stations. The article suggests core criteria for identifying speed and positioning of the railway wagons when they are running after been separated at the hump. The article

specifies that monitoring of moving units at hump yard is less automated in comparison with the monitoring at the hump itself, and that confirms the relevance of the research. To get the problem of the automation monitoring of moving units in the hump yard solved, the authors have suggested an algorithm that is based on the image data intelligent analysis, that is on computer vision, and have described the model of its implementation at a station.

The methods used are based on the theory of computer vision and are aimed at recognizing key dynamic objects in streaming video and at their subsequent positioning.

The study has resulted in substantiation of acceptability of the use of computer vision in the process of separation and formation of trains. It is planned to proceed with further improvement of the presented approach to develop a software product allowing to objectify information about hump yard in order to increase the efficiency of targeted braking at the hump.

**Keywords:** transport, railway, classification process automation, classification yard track occupancy, positioning of railway vehicle units, intelligent analysis of video data, digitalization.

\*Information about the authors:

**Kovalyov Sergey M.** – D.Sc. (Eng), Professor, Director of the Center for Railway Innovative and Intelligent Technology of the Rostov branch of Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIILAS); Professor of the department of Railway automatics and telemechanics of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, ksm@rfniias.ru.

**Sukhanov Andrey V.** – Ph.D. (Eng), Senior Researcher of the Center for Railway Innovative and Intelligent Technology of the Rostov branch of Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIILAS); associate professor at the department of Computer engineering and automatic control systems of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, a.suhanov@rfniias.ru.

Article received 01.04.2019, accepted 14.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 98.

The study has been conducted with the support of RFBR Grants (Projects No. 17-20-01040 ofi\_m, 19-07-00263, 19-07-00195).

**Background.** The railway marshalling station is the most important segment of transportation process chain, since transportation costs mainly and directly depend on wagons' idle time spent at them [1]. Growth in efficiency of technological processes at the marshalling yards and hump yards is achieved through improving the IT and automation equipment. The modern automation equipment of classification processes, such as KSAU SP [2], MSR-32 [3], DDC-III [4] *et al.*, provides for complete monitoring of railway vehicle units (identification of a wagon speed and location) while they are moving along the hump yard. After a moving unit leaves the hump towards marshalling yard tracks, the speed is not identified and only the last wagon that enters the yard can be localized, that results in the need for simulation modeling of wagons' motion based on statistical data using manual labour of yard controllers. All this reduces the accuracy and objectivity of monitoring of railcar moving within the marshalling yard and, as a result, causes wagons' collisions at overspeed and probability of appearance of time intervals on the yard tracks, that negatively affects the efficiency of the marshalling process as a whole.

**Objective.** The objective of the work is to formalize the problem of positioning control of cars when they exit the hump and follow the tracks of the railway marshalling yard with identifying speed of their movement and collision. In addition, the paper presents a method for solving a formalized problem, based on the use of algorithms for recognizing and positioning key dynamic objects on the stage

through the intellectual analysis of streaming video data using computer vision.

**Methods.** Two groups of computer vision methods are used, the first of which implements recognition of key moving objects against the surrounding background, the second implements positioning of previously known objects on the scene.

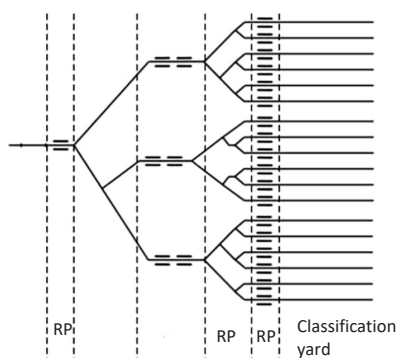
### Statement of the problem

The current rail marshalling process automation systems [2–5] provide for complete monitoring of railcar groups (cuts) movement in the hump yard when they are passing the control sections (Pic. 1): yard retarder positions (RP) are monitored by radar speed meters, track sections between retarder positions are monitored by speed measurement using axle counter transmitter. The control section equipment permits to precisely determine a wagon's speed, to correlate it with the simulation model received from Automatic Speed Control system and quickly correct brake operation algorithms and algorithms of cut routing systems if needed.

After the cut leaves the wagon retarder yard RP to the sorting track, the speed of the cut and the velocity of its unification with other cars on the tracks is not determined. The calculation is based on the Automatic Speed Control simulation model considering statistical data on the state of the vertical alignment of track, current meteorological conditions, running characteristics of railcars (weight, box type, nominal length).

According to «Procedure for checking the wagon collision speed on the tracks of marshalling (hump) yards»<sup>1</sup>, each yard inspector must measure speed of unification of 20 wagons in the hump yard per shift using radar speed meters. Metering accuracy of this device is  $\pm 0,2$  km/h that is equivalent to 4,3 % of car average speed in the yard.

Number of the cars to be marshalled at large marshalling yard, equipped with two humps, is about 9000 pcs. per day [6]. Thus, 80 wagons measured by inspectors per day (two shifts at two humps) is equivalent to the coverage of about 0,9 % of the number of marshalled wagons. Besides, in poor weather conditions both the quantity and the reliability of the data decrease sharply, which is confirmed by the



**Pic. 1. Schematic division of the hump yard into control sections with an adjacent classification yard (RP means a retarder position).**

<sup>1</sup> Directive of JSC Russian Railways dated August 12, 2010, No. 1735p.

analysis made by the computer-aided classification process control system (KSAU SP) [2]. Due to growing automation of train separation processes, reliable knowledge of the characteristics of movement of mobile units along the tracks of marshalling yards is a must-have for automatic and telemetry control railway units.

With reference to the above, the problem of monitoring the speed of wagons' movement and unification on the tracks of the classification yards when conducting train separation at automated humps is now of great relevance.

By material and performance criteria, the problem solving in the classical way (installation of a group of axle counter transmitters all over the length of the classification yard tracks) is not efficient (the total classification yard track length is on average of above 50 km). To solve this problem it is necessary to develop a tool, which allows monitoring the cuts in the classification yard. Video surveillance cameras mounted on the yard lighting towers can be used as such tool (Pic. 2).

For automatic conversion of video signal into quantitative characteristics of the monitored cars (speed and position), it is proposed to use the intelligent video data recognition method which is a computer vision. It has been already well developed for the commercial railroad freight activities when identifying car numbers [7], when monitoring the railway track conditions [8], when providing the transportation safety [9] and for other activities.

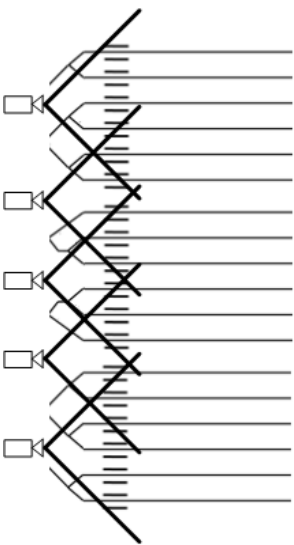
For solving the car movement monitoring problem in terms of computer vision [10] it is necessary to solve two sub-problems:

1. Key object recognition (segmentation);
2. Positioning of key objects within streaming video.

The further sections describe the basic steps toward a solution of the above problems, as well as provide alternative implementation methods.

**Key object segmentation**

Segmentation problem solution means the key object edge extraction against the environment background. When segmenting moving objects, the edges are determined for entities whose position is different in at least two consecutive frames [11]. Thus, the key object segmentation's first stage is to determine points whose position varies from frame to



**Pic. 2. Arrangement of Video Surveillance Cameras for monitoring.**

frame. For its implementation, this article uses the interframe difference (ID) method [12] that suggests to use the difference between the pixel intensities of two consecutive frames  $I_t$  и  $I_{t-1}$ . In this case, to identify moving points, it is necessary to choose the boundary value of the difference, above which the image area will be assigned to moving objects or to the background, if otherwise (Pic. 3b):

$$I(x,y)=\begin{cases} 1, & \text{if } |I_t(x,y)-I_{t-1}(x,y)|>\tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

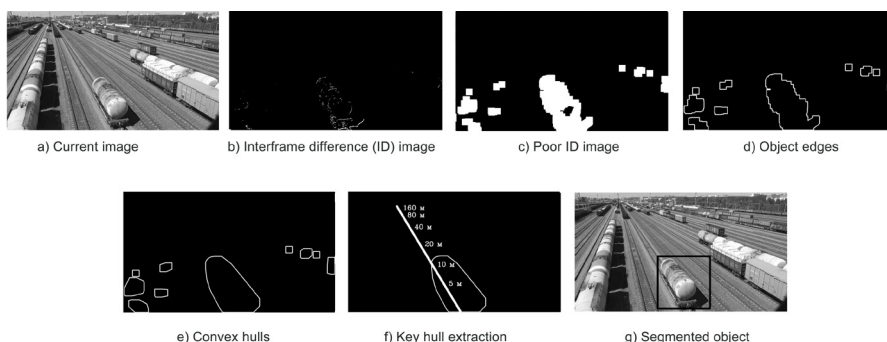
where x, y are pixels coordinates;  
 $\tau$  – boundary value of the pixel intensity difference.

The choice of  $\tau$  is based on the empirical calculation of the minimum value when background noise is still absent.

The next stage consists in object's edge extraction. For its implementation, this research uses the edge extraction algorithm suggested in [13]. The algorithm essence is to detect the moving object's edge (Pic. 3d) in a morphologically expanded interframe difference image (Pic. 3c), followed by their transformation to convex hulls (Pic. 3d).

The size of the morphological expansion structural block [14] was chosen equal to half the minimum distance (in pixels) between the track concerned and the next one to obtain non-overlapping object's edges. White pixels, which have even one adjacent pixel with zero intensity, are used as edge points. For obtaining





**Pic. 3. Segmentation of the key moving object (wagon) by interframe difference analysis.**

the edges as convex hulls, the research uses Jarvis's Algorithm forming a set of edge points  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , so that the angle between  $p_i p_i$  and  $p_i p_{i+1}$  straight lines is maximum.

The resulting edges characterizing the object location have to be classified as key and non-key ones. The edges meeting two following criteria would be considered as key:

1. The edge is located in the line of the analyzed classification yard track;
2. The edge sizes are comparable to the cut length value, known beforehand, and which is obtained from the corresponding hump yard control automation system.

The verification of compliance with first criterion is trivial and is self explanatory. The verification of compliance with second criterion requires matching the image pixels with actual coordinates of the yard tracks. To do this, it is possible to use the camera calibration formula stated in [15], which allows calculation of the actual distance on the track in meters using the image distance in pixels:

$$D = \frac{L \cdot K}{W / x - 1 + K}, \quad (2)$$

where  $D$  is required distance to the object, m;

$L$  – track length, m;

$W$  – track length, pixels;

$x$  – distance from the beginning of the track to the analyzed point in the image, pixels;

$K$  – camera slope coefficient calculated by the following formula:

$$K = \frac{W - M}{M}, \quad (3)$$

where  $M$  – distance from the beginning of the track to the midway, pixels.

Pic. 3g shows the analyzed hump yard track line traced by the expert along with the scale of distance in meters, obtained by formula (2). According to the data obtained from the computer-aided classification process control

system, the car length is 14 meters that corresponds to the marked object length on the calculated scale. Hence, the edge in Pic. 3f characterizes the key object and is the segmentation problem solution.

Pic. 3g shows the segmented key object marked with a rectangle of minimum sizes allowing to outline all its edges.

### Positioning of key objects within video streaming

Positioning task is to calculate the change in the position of an object with known initial coordinates relative to the surrounding background based on the known object's characteristics in the previous frame. Because of the use of a priori information about the object to be positioned as input data, this approach is more efficient and less time consuming than repeated segmentation of the key object in each new frame [16].

This research uses the image with the marked object position area (Pic. 3g) as a prior information on the object to be positioned.

Contrary to the segmentation algorithm, which allows, when using the basic approaches, to obtain an acceptable solution to the first research subproblem, positioning needs to select the efficient integrated approach since the basic Adaboost algorithm [17], which generates the similarity value of each pixel next to the rectangular area marked in the training image, is unsuitable for positioning (Pic. 4, first column).

Below is a comparison of three advanced positioning algorithms that allow to get the most acceptable results for positioning the cuts: Multiple Instance Learning, MIL [16], Minimum Output Sum of Squared Error, MOSSE [18], Discriminative Correlation Filter with Channel and Spatial Reliability, DCF-CSR [19].

The MIL algorithm is based on the same idea as the Adaboost. Though there is a great



difference between the two algorithms as that algorithm considers both the initial data and the adjacent image areas, which potentially are considered as an object’s location with a certain confidence value. This allows to refine the positioning in the case of incorrect determination of the object’s boundaries at the previous step.

The MOSSE algorithm searches for the area in the frame that is as similar as possible to the image from the set obtained by small affine transformations of the input image (the area with an object). As a search criterion of a new area with an object in the current frame, the authors offer to use the maximum correlation value  $G$  between image  $I$  that is a potential area with an object in the test image and an ideal filter  $h$  characterizing the input image in the Fourier domain:

$$G = F(I) \odot F(h)^*, \tag{4}$$

where  $F(\bullet)$  – fast Fourier transformation;

$\odot$  – step-by-step matrix multiplication;

$*$  – complex matrix conjugation.

The problem is confined to search an ideal filter  $h$ , the Fourier transformation of which satisfies the formula:

$$\min_{F(h)} \sum_i |F(I_i) \odot F(h)^* - F(g_i)|^2, \tag{5}$$

where  $I_i$  –  $i$ -th input image affine transformation;

$g_i$  – ideal response to  $i$ -th affine transformation.

The ideal response is shown as Gaussian-type function:

$$g = \exp\left(\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2.0}\right), \tag{6}$$

where  $x_c, y_c$  are coordinates of the area center;  
 $x, y$  – coordinates of the point in the image.

The DCF-CSR algorithm is one of the most advanced positioning algorithms. Similar to MOSSE, it uses correlation filters. A distinctive feature of the algorithm is the use of the spatial reliability map, which allows to ignore known noise by assigning each point with a value of belonging to the object to be positioned that result in formula (5) as follows:

$$\min_{F(h)} \left( \sum_i w_i |F(I_i) \odot F(h)^* - F(g_i)|^2 \right), \tag{7}$$

where  $w_i$  is mass of the corresponding filter based on degree of the affine transformation which it implements in the input image.

In term of accuracy, the DCF-CSR algorithm is the most efficient positioning

algorithm. For comparison between the other algorithms provision has been made for using the general-to-mean positioning area overlapping point number ratio of DCF-CSR. Comparison results are stated in Table 1.

**Table 1**

**Positional Precision Comparison**

Algorithm	Accuracy
Adaboost	0.53
MIL	0.91
MOSSE	0.67
DCF-CSR	1

Table 2 shows comparison of algorithm rate using Intel Core i5 4200U ((8 GB DDR3) including the OpenCV 4.0 libraries.

**Table 2**

**Positioning Speed Comparison**

Algorithm	FPS
Adaboost	24
MIL	15
MOSSE	45
DCF-CSR	7

For specifying the cut speed and mileage, the scale stated in Pic. 3f was used. The original and processed video with DCF-CSR positioning have been uploaded to YouTube<sup>2,3</sup>. The research results have been put to use as a pilot project in the downyard shunting at Insk classification yard of West Siberian Railway.

### Conclusion

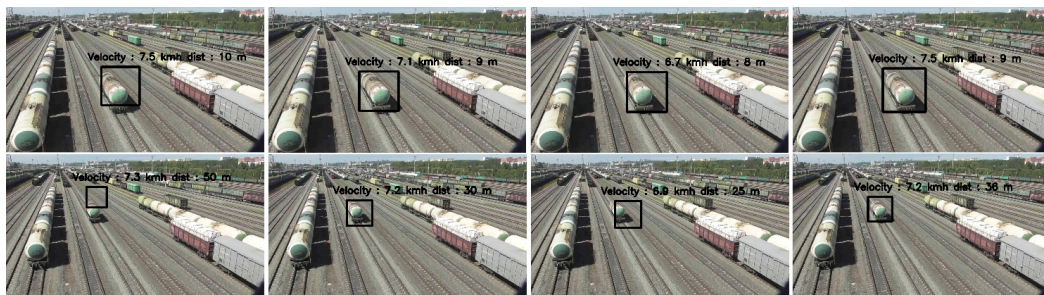
The article considers a problem of monitoring of railway vehicle units in the hump yard and presents the solution algorithm. The proposed development is well-timed in the context of the inefficiency of using traditional approaches existing at the hump yard. The paper describes the main criteria of the problem and presents the steps of a possible solution, as well as shows the result of monitoring the single cut moving in the yard.

As follows from the above research, the developed algorithm is the most urgently needed for use at the rail classification yards, as well as in other fields requiring monitoring for speed and location of the objects relative to the video camera position.

<sup>2</sup> Vehicle tracker NIIAS. [Electronic resource]: <https://youtu.be/x-IV7zwyp6k>.

<sup>3</sup> Video for vehicle tracking (NIIAS) [Electronic resource]: <https://youtu.be/tGm9mKFyQ4U>.





**Pic. 4. Comparison of positioning algorithms (the first column for Adaboost, the second column for MIL, the third column for MOSSE, the fourth column for DCFCSR).**

The result of this work is substantiation of the relevance of using computer vision in the field of railway classification processes. The implementation of the developed algorithms in the automation systems of railway classification processes (for example, KSAU SP) allows to objectify the received information about the state of the classification yard. As a result, this will create the possibility of a more precise adjustment of the targeted braking subsystem at the hump, reducing thus the number of dangerous collisions and avoiding appearance of «windows» between cuts on the classification tracks.

As further studies, it is planned to improve the presented algorithm for monitoring moving cuts containing two or more cars, as well as testing the developed approach under poor visibility (night time and adverse weather conditions).

## REFERENCES

1. Kovalyov, S. M., Kovalyov, V. S., Sukhanov, A. V. Intelligent approach to forecasting abnormal situation within the train separation process at hump yards. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Science and Technology Conference on Intelligent Railway Control Systems. Computer and Mathematical Simulation*. (ISUZhT-2016, Nov. 17–18, 2016, Moscow, Russia). Moscow, NIAS JSC, 2016, pp. 168–172.
2. Shabelnikov, A. N., Sokolov, V. N. KSAU SP-a new direction of automation of hump yards [KSAU SP-novoe napravlenie avtomatizatsii sortirovochnykh gorok]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2017, Iss. 8, pp. 2–4.
3. Hansmann, R. S., Zimmermann, U. T. Optimal sorting of rolling stock at hump yards. *Mathematics-key technology for the future*, 2007, Iss. 8, pp. 189–203.
4. Zhang, C. [et al]. Analysis of hump automation in China. *Traffic and Transportation Studies*, 2000, pp. 285–290.
5. Kobzev, V. A. Computer-Aided Classification Yard Control. *World of Transport and Transportation*, 2010, Iss. 5, pp. 60–66.
6. Shabelnikov, A. N. Improving the integrated automation system for controlling the classification process and hump yard equipment in the framework of the project «Digital classification yard» [Sovershenstvovanie kompleksnoi sistemy avtomatizatsii upravleniya sortirovochnym processom i gorochnykh tekhnicheskikh sredstv v ramkakh realizatsii proekta «tsifrovaya sortirovochnaya stantsiya»]. *Automation and telemechanics in railway transport: Collection of reports of 9<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference «TransZhAT-2018»*, Rostov-on-Don, 243 p.
7. Artemev, I. S. New Approach to Railway Vehicle Units' Identification. *Automatics, telecommunications, informatics*, 2016, Iss. 11, pp. 11–14.
8. Vasin, N. N., Diyazitdinov, R. R. Computer Vision System for Rail Track State Monitoring. *Comp'uternaya optika*, 2016, No. 3, pp. 410–415.
9. Grechukhin, I. A., Karkishenko, A. N. Intelligent Video Processing for Transportation Security. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2011, Iss. 4, pp. 45–47.
10. Mahalingam, T., Subramoniam, M. A robust single and multiple moving object detection, tracking and classification. *Applied Computing and Informatics*, 2018, Iss. 1, pp. 1–10.
11. Tokmakov, P., Schmid, C., Alahari, K. Learning to segment moving objects. *International Journal of Computer Vision*, 2017, Iss. 3, pp. 1–20.
12. Singla, N. Motion detection based on frame difference method. *International Journal of Information & Computation Technology*, 2014, Iss. 15, pp. 1559–1565.
13. Aksa, A., Öztürk, O., Özger, T. Real-time multi-objective hand posture/gesture recognition by using distance classifiers and finite state machine for virtual mouse operations. 2011. *7<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. IEEE2011, pp. 457–461.
14. Shapiro, L. G., Stockman, G. C. Computer Vision. BINOM publ., Lab of Knowledge, 2006, pp. 93–103.
15. Shubnikova, I. S., Palaguta, K. A. Analysis of methods and algorithms for identifying the parameters of the object and the distance to it using the image. *Proceedings of International Quality and Reliability Symposium [International symposium Nadezhnost i kachestvo]*, 2013, Vol. 1, pp. 352–355.
16. Babenko, B., Yang, M. H., Belongie, S. Visual tracking with online multiple instance learning. 2009. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE2009, pp. 983–990.
17. Yeh, Y. J., Hsu, C. T. Online selection of tracking features using AdaBoost. 2007. *16<sup>th</sup> International Conference on Computer Communications and Networks*. IEEE2007, pp. 1183–1188.
18. Bolme, D. S. [et al]. Visual object tracking using adaptive correlation filters. 2010. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE2010, pp. 2544–2550.
19. Lukezic, A. [et al]. Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 6309–6318.



## ЦИФРОВИЗАЦИЯ 112

Комплексная автоматизация, маркировка и идентификация логистических объектов. Техника, алгоритм и потенциальные выгоды.



## ВЫБОР МАРШРУТОВ 136

Новая методика разработки нефтеэкспортных маршрутов, позволяющая учитывать множество факторов, как транспортных, так и экономических.

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ КОРИДОРЫ 148

Их значение для региона Центральной Азии и роста её транзитного потенциала для соседних стран. Транспортные, а также технические, организационные и экономические решения.

## ЛОГИСТИКА 166

Перевозки СПГ для бункеровки судов: расчёты и особенности, в том числе, экологические и географические.

### ЭКОНОМИКА • ECONOMICS



## DIGITALISATION 125

Comprehensive automation, marking, coding and identification of logistics infrastructure and facilities: technique, algorithm and promising advantages.

## CHOICE OF ROUTES 142

New technique to develop routes for exporting oil products, that allows to consider multitude of factors, in the fields both of transportation and economics.

## INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDORS 158

The significance of international transport corridors for the Central Asia region and contribution to the growth of its transit capacity for neighbouring countries. Transportation, technical. Engineering, organisation, and economic solutions.

## LOGISTICS 174

Logistics of bunkering for LNG-powered ships: calculations and features, comprising geographical particularities.



## Цифровизация, автоматизация, идентификация и маркировка логистических объектов для решения задач клиентоориентированности



Оксана ПОКРОВСКАЯ

*Покровская Оксана Дмитриевна – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия\*.*

Логистический сегмент деятельности железнодорожных холдинговых компаний в условиях информатизации и цифровизации транспорта переживает период динамичного развития, требующего существенных улучшений технологий, процессов и процедур.

Целью данного исследования является поиск оптимальных решений в сфере автоматизации процедур идентификации, маркировки и проектирования железнодорожных логистических объектов. Использовались инструменты статистического, системного, экономического анализа, компьютерного моделирования.

Представлены результаты разработки предложений по автоматизации, идентификации, маркировке и проектированию железнодорожных логистических объектов для унификации и упрощения принятия технико-эксплуатационных и экономических решений. Их реализация позволит решать целый комплекс задач управле-

ния объектами терминально-складской инфраструктуры, а также будет способствовать расширению клиентской базы железнодорожных компаний, в рассмотренном случае – ОАО «РЖД», за счёт повышения доступности, простоты и клиентоориентированности информации о логистических объектах.

Разработана концепция автоматизированной системы управления терминальной сетью железнодорожного транспорта. Программные продукты обеспечат возможность расчёта ключевых параметров оценки, инвентаризации, контроля и рекламы логистических объектов. Возможно её применение в качестве основы для рекламы при формировании гибких коммерческих предложений. Внедрение концепции и сопровождающих её информационных решений позволит сформировать единую клиентоориентированную информационную среду и достичь 4–5 уровня логистического провайдинга.

**Ключевые слова:** железная дорога, железнодорожный бизнес, цифровая железная дорога, транспортно-логистическая деятельность, клиентоориентированность, идентификация, маркировка, логистический объект, терминальная сеть.

\*Информация об авторе:

**Покровская Оксана Дмитриевна** – доктор технических наук, профессор кафедры железнодорожных станций и узлов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия, insight1986@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 17.01.2019, принята к публикации 26.04.2019.

For the English text of the article please see p. 125.

Данное исследование выполнено в рамках гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в сфере железнодорожного транспорта (протокол от 07.09.2017 г. № 36 пр, утв. Президентом ОАО «РЖД» О. В. Белозеровым 11.10.2017 г.).



**К**рупнейшие транспортные компании мира трансформируются в транспортно-логистические холдинги. Логистический сегмент становится важным ресурсом повышения эффективности их деятельности. Успешным примером организации транспортно-логистической деятельности является опыт железнодорожных холдинговых компаний — «Дойче Бан» (DB), ОАО «РЖД».

Вместе с тем данное направление деятельности в условиях информатизации и цифровизации экономики и транспорта, внедрения новых технологий обработки информации, перехода взаимоотношений поставщиков услуг и клиентов в информационное пространство находится в динамичном развитии, требующем постоянного поиска новых методов совершенствования деятельности, технологий, процессов и процедур, позволяющих добиться существенных улучшений.

*Целью* данного исследования является автоматизация процедур идентификации, маркировки и проектирования железнодорожных логистических объектов для унификации и упрощения принятия технико-эксплуатационных и экономических решений при управлении объектами терминально-складской инфраструктуры, а также для расширения клиентской базы железнодорожных компаний (на примере ОАО «РЖД») за счёт повышения доступности, клиентоориентированности и простоты «подачи» информации об объектах терминально-складской инфраструктуры.

При проработке предложений применительно к деятельности ОАО «РЖД» учитывались приоритеты, указанные в [1, 2], а также в комплексном проекте «Цифровая железная дорога» [3].

Основные задачи, решаемые исследованием:

1) сформулировать концепцию и модельную структуру автоматизированной системы управления терминальной сетью железнодорожного транспорта;

2) согласно политике клиентоориентированности, реализуемой холдингом «РЖД», разработать систему маркировки и идентификации логистических объектов железнодорожного транспорта, понятную каждому участнику перевозочного процесса;

3) разработать программное обеспечение, в котором автоматизированы изложенные методики идентификации, маркировки и принимаемые по ним решения.

Реализация предложений позволила бы железнодорожной компании, в нашем случае — ОАО «РЖД», добиться целевого состояния, при котором были бы возможны:

- «выдача» клиентам в максимально сконцентрированном и ёмком виде параметров логистических объектов, значимых при заказе логистического сервиса;

- немедленное применение предложения как маркетинговой рекомендации в рекламных кампаниях, а также структурами железнодорожной компании при выработке гибких коммерческих предложений;

- подготовка «цифровой платформы» [3] и, в случае ОАО «РЖД», «условий для трансформации... в статус логистического провайдера 4 уровня» [1];

- увеличение протяжённости и глубины контролируемых компанией логистических цепей (не только «от станции до станции», но «от клиента до клиента»);

- полная автоматизация расчётных и методических процедур;

- рост «тотальной управляемости объектов терминально-складской инфраструктуры» [2], возможности оценки их деятельности, инвентаризации и отслеживания текущих параметров в режиме реального времени;

- простота и удобство применения в современных условиях ведения транспортно-логистического бизнеса;

- качественный тотальный контроль за логистическими объектами, и, как следствие, за всеми логистическими цепями, выстраиваемыми холдингом при организации перевозок грузов;

- расширение клиентской базы за счёт информативности и простоты сведений о логистических объектах;

- «рост инвестиционной привлекательности как работающих на опорной железнодорожной сети логистических объектов, так и проектов строительства и поэтапного развития терминально-складской инфраструктуры высокого качества, «тяготеющей» к грузовым железнодорожным стан-



циям» (согласно приоритетам, указанным в [1, 2]);

- реализация «цифровой трансформации» терминально-логистической деятельности компании путём «создания единой информационной среды» [3] для взаимодействия железнодорожного транспорта с клиентами и ведения единой базы данных о логистических объектах, упрощения процедур контроля, учёта и оценки деятельности железных дорог [4, с. 25];

- повышение конкурентоспособности предоставляемых ОАО «РЖД» терминально-логистических услуг в целом [5, с. 159].

В ходе исследования использовались общенаучные *методы*, инструменты статистического, системного, экономического анализа, компьютерного моделирования, программные средства.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Терминология

Введём ряд определений, которыми будем оперировать.

*Терминальной сетью* будем считать «...совокупность логистических объектов различного функционального типа и соединяющих их транспортных участков, которые обслуживаются унимодально или мультимодально, для рациональной организации процессов грузопереработки, перевозки и повышения добавленной стоимости товаров при доставке от клиента-грузоотправителя к клиенту-грузополучателю».

*Логистические объекты* — это «...объекты транспортно-складской инфраструктуры, которые по совокупности признаков сконцентрированы в пространственно определённом географическом районе и физически выполняющие широкий ассортимент операций комплексного терминально-логистического обслуживания различных клиентов и их грузов в системах доставки от начального грузоотправителя до конечного грузополучателя» [6, с. 70].

В качестве *железнодорожного логистического объекта* рассматривается объект терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта, который реализует функции узлового элемента терминальной сети как логистической системы и обеспечивает техническую и инфраструктурную поддержку при физическом

выполнении различных услуг (погрузки, выгрузки, хранения, распределения грузов, доведение грузов до конечного потребителя) при взаимодействии с другими участниками процесса перевозок [7, с. 18].

### Клиентоориентированные решения для терминально-логистической деятельности железнодорожной компании: идентификация и маркировка логистических объектов

Вносимые предложения, которые имеют во многом универсальный характер в отношении железнодорожных холдинговых компаний, в силу необходимости демонстрации их комплексного, системного характера, учитывающего специфику деятельности в конкретных рыночных условиях, рассматриваются применительно к ОАО «РЖД».

В первую очередь, предлагается применить принципы клиентоориентированности в информации о терминально-складских объектах холдинга, спрос на услуги которых сегодня устойчиво растёт. К сожалению, ОАО «РЖД» теряет потенциальных клиентов, которые «уходят» на private логистические объекты. Во многом такая ситуация «оттока» высокодоходных грузов с мест общего пользования обусловлена низкой клиентоориентированностью сведений о логистических объектах железных дорог и их функционале. Это не позволяет клиентам иметь полную информацию для принятия решений и существенно снижает доступность сведений о логистических объектах и о комплексном транспортно-логистическом сервисе холдинга в целом.

При этом общеизвестно, что основой клиентоориентированного сервиса является его доступность, гибкость, информативность и удобство, а также достаточный уровень «осведомлённости» клиентов о реализуемых услугах. Упрощение и «цифровизация» отношений с клиентами рассматривается с позиций организации социально-экономического и технологического процесса создания ценности для ОАО «РЖД» как поставщика высококачественных логистических услуг.

Требуется максимальное обновление и визуализация сведений о логистических объектах. Сделать это возможно с помощью маркировки, нумерации (кода), «класса» для каждого логистического объекта

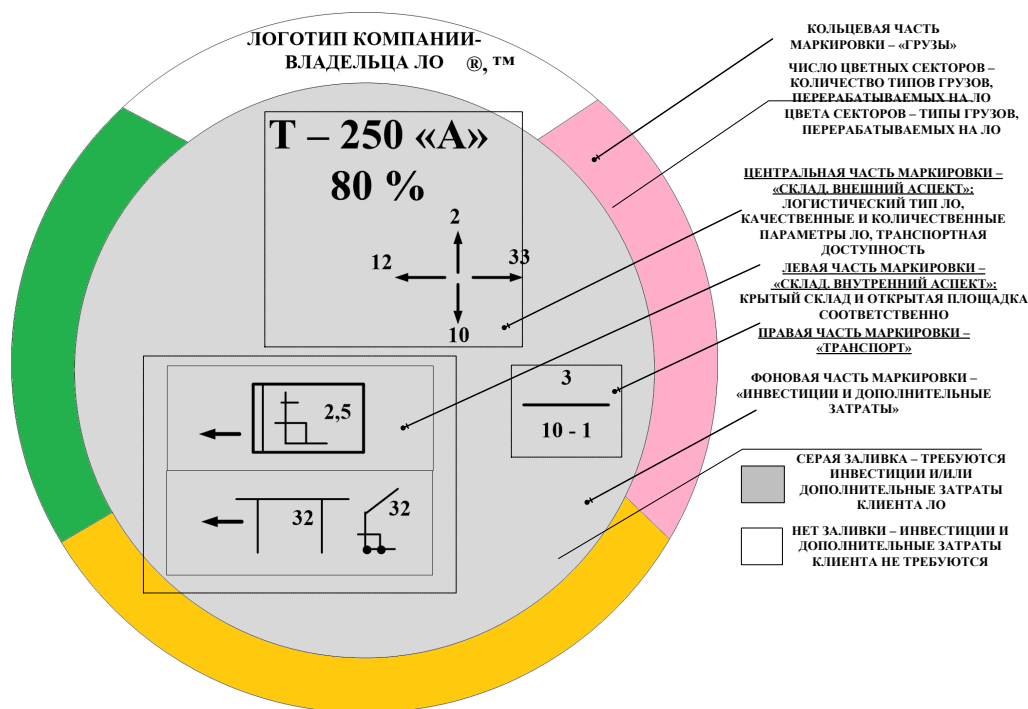


Рис. 1. Состав маркировочного знака логистического объекта.

с полным информационным покрытием. В современных условиях транспортно-логистического рынка становится необходимым переход «на общий язык» с клиентами. Например, в фармацевтической промышленности «ацетилсалициловая кислота» имеет более простое, потребительское название – «аспирин».

В частности, предложено закрепить за каждой железнодорожной станцией, открытой для грузовых операций, *логистический класс, индивидуальный идентификационный номер и маркировочный знак*. Такая система обозначений даст клиентам ключевую информацию о логистическом сервисе, предоставляемом каждым логистическим объектом – складом, терминально-складским комплексом и прочими структурами, имеющимися на станции.

*Логистический класс* логистического объекта железных дорог представляет собой арабскую цифру от 1 до 9, определённую по балльной методике экспертным путём по всем логистическим функциям и операциям, выполняемым на станции, с учётом их комплексности. Логистический класс станции должен присваиваться экспертным путём (коммерческо-ревизионной службой, независимыми экспертами,

клиентами) по балльной методике и размещаться в общем доступе.

Предлагаемый «логистический класс», в отличие от общепринятой системы классности и кодирования объектов станций [8–11], отражает функциональные и технико-технологические особенности терминально-складской инфраструктуры, расположенной на станции, а также ассортимент транспортного, складского и комплексного логистического сервиса. Иными словами, логистический класс напрямую связан с параметрами, максимально значимыми для клиента холдинга при принятии решения о пользовании услугами того или иного логистического объекта [12, с. 117].

*Маркировочный знак логистического объекта* – это краткая, но содержательная надпись, по которой легко определяется классность объекта (это полезно для арендаторов, несведущих в классности логистической инфраструктуры). Для составления маркировочного знака в реальных условиях ведения бизнеса автором была разработана автоматизированная программа.

Можно полагать, что на цветовом фоне удобно наносить надписи непосредственно на фасадах складских помещений, а также



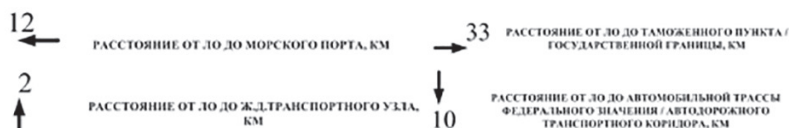


Рис. 2. Обозначения в центральной части маркировки.

использовать совместно с номером идентификации, в том числе — в рекламных целях. Маркировка позволит владельцу терминально-складской инфраструктуры (холдингу «РЖД») сэкономить на рекламе — увидев и прочитав её, клиент «найдёт» объекты самостоятельно.

На рис. 1 показан типичный состав такого маркировочного знака.

Маркировка логистического объекта в общем случае состоит из пяти зон (надписей):

Часть 1. «Грузы». Число цветных секторов указывает на число грузов, которые может перерабатывать данный логистический объект. Цвет каждого сектора указывает на тип груза.

Часть 2. «Склад». Т — транспортный терминал; 250 — общая полезная площадь хранения грузов на логистическом объекте, кв. м; А — классность складских зданий на ЛО, класс «А»; 80 % — «покрытие» стандартных транспортно-складских услуг дополнительным логистическим обслуживанием, в %. На рис. 2 описаны прочие обозначения части 2 маркировки.

Часть 3. «Склад (Технико-компоновочное решение)»: указатель типа примыкания железнодорожного пути к крытому складскому комплексу на логистическом объекте; указатель типа применяемого на крытых складах логистического объекта (вверху) стеллажного оборудования; указатель типа применяемого на логистическом объекте внутрискладского погрузочно-разгрузочного оборудования. На маркировке изображается компоновка крытых складов и открытых площадок. В случае, если внутри крытых складов для однотипных грузов применяется несколько типов оборудования, указывается только один, преимущественный, тип. Также приводятся: указатель типа открытой площадки (внизу); указатель полезной грузоподъёмности используемого погрузочно-разгрузочного оборудования логистического объекта на открытых площадках.

Часть 4. «Транспорт». 3 — средняя продолжительность оборота вагона в логистическом объекте, час; 10 — число вагонов в одной характерной подаче, вагонов; 1 — интервал подач, час.

Часть 5. «Инвестиции». Есть заливка — требуются дополнительные инвестиции (затраты клиента), нет заливки — не требуются. «Логотип» компании-владельца логистического объекта является дополнительной надписью и может отсутствовать. Условно маркировочный знак можно разделить на пять частей: «фоновая» (ч. 5), «кольцевая» (ч. 1), «центральная» (ч. 2), «левая» (ч. 3) и «правая» (ч. 4). Преимущественно используются натуральные показатели, наиболее удобные для клиента (по материалам «Логистического руководства» [13, с. 98]).

Идентификационный номер представляет собой гибкое актуальное коммерческое предложение для клиента, которое может быть реализовано в нескольких вариантах. Два варианта представления идентификационных номеров даны в развёрнутом для владельца (вариант 1, «расширенный») и в кратком клиентском виде (вариант 2, «клиентский»). При составлении системы идентификационной нумерации использовались результаты, полученные в исследованиях профессорами Маликовым О. Б. [14], Куренковым П. В. и другими исследователями [15–19], а также в ранее опубликованных работах автора [20–27].

#### Вариант 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
№ сетевого района	Порядковый № ЛО					Разделитель	ТИП ЛО	СТАВКА АРЕНДЫ СКЛАДА	ТИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СЕРВИСА	резерв для 10	ЗАТРАТЫ КЛИЕНТА	ТИП Ж.Д. ОБЪЕКТА НА ЛО	резерв для 13
8	5	8	0	0	1	-	Т	Н	Э	Л	0	К	П

где — для варианта «расширенный»:

Часть 1. «Сетевой район» (две позиции). 85 — номер сетевого района, в соответствии с единой сетевой разметкой.



Часть 2. «Номер объекта» (4 позиции). 8001 — порядковый номер объекта в сетевом районе. «Разделитель» (1 позиция).

Часть 3. «Тип ЛО» (одна позиция). Т — транспортный терминал (тип логистического объекта по авторской классификации: Р — грузовой район, грузовая площадка, С — склад, терминально-складской комплекс, Ц — распределительный центр, Л — логистический центр, У — транспортно-логистический узел, М — мультимодальный транспортно-логистический центр; Н — буква латинского алфавита, по интервалу стоимости).

Часть 4. «Ставка аренды» (одна позиция). Ставка хранения на ЛО, евро/1 единица хранения в сутки (1 паллета, 1 контейнер, 1 тонна груза) — 31–50 евро/кв. метр.

Часть 5. «Дополнительный сервис» (одна позиция). Э, Л — указание на выполняемые на логистическом объекте услуги: Э — экспедирование, Л — лизинг и др. «Резерв» (для части 5, одна позиция).

Часть 6. «Затраты клиента» (одна позиция). Указание на необходимость дополнительных затрат (на аренду грузовой техники, оформление документации, персонал, ремонт оборудования и здания, собственно оборудование...): 0 — Нет (1 — есть).

Часть 7. «Тип железнодорожного ЛО» (для части 7, одна позиция): К, П — в соответствии с инструкцией по кодированию объектов станций и грузов на железных дорогах, расширенный ещё тремя видами объектов; с учётом: типа складирования, логистической роли объекта, типа груза (К — контейнерный пункт, П — пункт перегрузки/перевалки) (согласно проекту «Логистического руководства железнодорожного транспорта», разработанного автором, [13, с. 88–98]).

**Вариант 2**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
СКЛАД		СЕРВИС		ЭКСПЛУАТАЦИЯ				СТОИМОСТЬ			
Тип склада	Площадь хранения	Тип схемы ПРР	Уровень сервиса	Груз, ч/ве/ваг.	Лп/ваг, усл. ваг.			Стоимость ПРР, евро/груз. ед.		Стоимость пользования инфраструктурой, евро/ваг.	
А	М	1	5	0	5	7	1	2	2	1	0

где — для варианта «клиентский»:

Часть 1. «Склад». 1 — условный измеритель, типология складов на ЛО (превалирующий тип) по международной классификации складских зданий и помещений,

буква латинского алфавита А, В, С, D (по известной международной классификации компании Knight Frank); 2 — условный измеритель, общая полезная площадь хранения на ЛО: М — Medium (1400–1799 кв. м); 3 — условный измеритель, компоновка погрузочно-разгрузочной схемы (подход железнодорожного пути/путей, тип используемого/используемых ПРМ), 1 — с использованием козловых кранов.

Часть 2. «Сервис». 4 — S — пакет сервиса (Small): стандартные услуги (погрузка-выгрузка, приём-выдача, оформление документации, хранение, услуги «от двери до двери», «последняя миля»).

Часть 3. «Эксплуатация». 5, 6 (две позиции) — натуральный измеритель, средняя продолжительность погрузки (выгрузки) одного вагона на ЛО, ч., 7, 8 (две позиции) — натуральный измеритель, максимальная длина состава, подаваемого под погрузку-выгрузку, условных вагонов.

Часть 4. «Стоимость». 9, 10 (две позиции) — плата за выполнение погрузочно-выгрузочных работ с 1 единицей груза (паллета, тонна, контейнер), евро/ед.; 11, 12 (две позиции) — плата за пользование инфраструктурой (аренда места), евро/ваг. (согласно проекту «Логистического руководства для железнодорожного транспорта», разработанного автором, [13, с. 79–88]).

Тип складского помещения приводится согласно требованиям международных классификаций, например, [28–29]. Очевидно, что впоследствии для общесетевого применения потребуется создание базы данных идентификационных номеров и маркировочных знаков. Автором получены свидетельства Роспатента на программное обеспечение маркировки, идентификации и проектирования логистических объектов. Возможно создание также цифрового паспорта логистического объекта, вид которого дан на рис. 3.

**РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИОРИТЕТОВ «ЦИФРОВОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ» ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

В связи с ростом потребностей клиентов и развитием IT-технологий политика ОАО «РЖД» нуждается в реформировании сво-



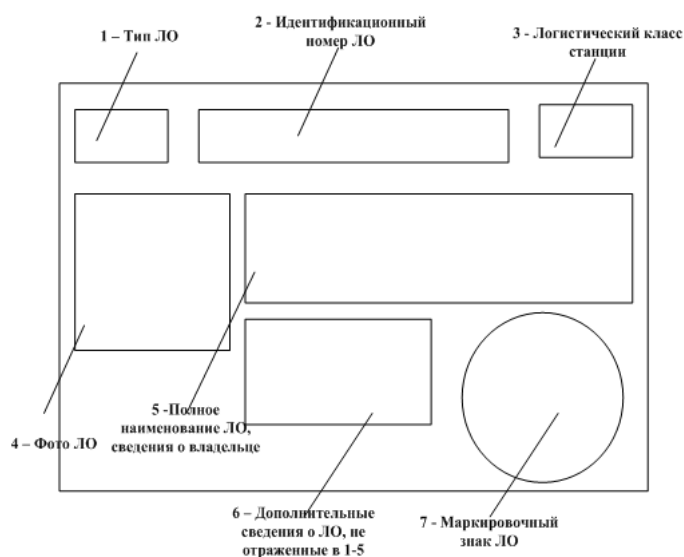


Рис. 3. Структура электронного паспорта ЛО в едином информационном поле ОАО «РЖД».

ей деятельности в направлении цифровизации и инновационного развития. В 2017 году холдинг «РЖД» в рамках участия в программе «Цифровая экономика» запустил проект «Цифровая железная дорога» по разработке и внедрению цифровых технологий в ключевые бизнес-процессы и услуги компании. Проект представляет собой совокупность «...информационных технологий, процессов и стандартов взаимодействия, соответствующих цифровой модели бизнеса» [3].

Концепция инновационного развития железнодорожного транспорта предполагает переход «от платформоцентрического подхода управления к сетевому» — то есть, от развития информационных платформ и систем к их интеграции в единое информационное поле [30, 31]. Это позволит перевозчикам, грузоотправителям, грузополучателям, собственникам подвижного состава и инфраструктуры координировать действия и принимать оперативные решения на основе полной и достоверной информации о ходе процесса.

Сегодня компании холдинга «РЖД» обеспечивают комплексное логистическое обслуживание клиентов, включая обеспечение складского обслуживания, консалтинга, логистики, мультимодальных перевозок и др.

Для современной науки и практики очевидно, что цифровые сервисы — драй-

веры мирового экономического роста. По оценке Глобального института McKinsey к 2025 г. увеличение ВВП Китая до 22 %, а США до 19 % произойдет за счёт Интернет-технологий. При этом, как утверждают эксперты «Росбизнесконсалтинга», эффект цифровизации транспорта РФ увеличит ВВП к 2025 г. на 4,1–8,9 трлн руб., до 34 % ожидаемого роста ВВП [33, с. 10].

Согласно [3], цифровые услуги — это «...комплекс организационно-технических и методологических мероприятий в сфере информационных технологий по предоставлению клиентам автоматизированной функциональности сервиса». Концепция направлена на создание для клиентов автоматизированного сервиса, с помощью которого заказ и оформление перевозок будет проще. Это позволит увеличить объёмы перевозок, а, следовательно, и доход от реализации цифрового «околотранспортного» сервиса.

Основные направления: создание единой дорожной карты на сети РЖД, «Интернета вещей», технологии больших данных, интеллектуальных систем, мобильных приложений. Известно, что достижение рентабельности за счёт ценовой политики не всегда возможно. Поэтому, помимо базовой услуги по перевозке, ОАО «РЖД» развивает дополнительный сервис как способ привлечения и удержания клиентов.

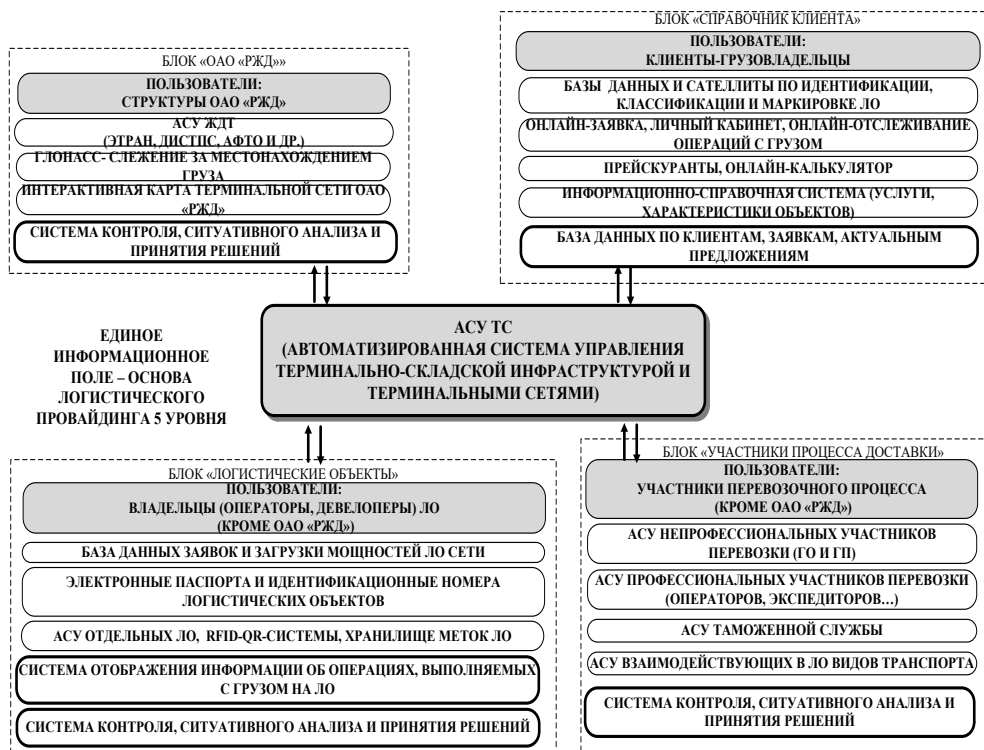


Рис. 4. Общая архитектура Автоматизированной системы управления «Терминальная сеть».

В программе клиентоориентированности есть элементы Концепции «Цифровая железная дорога». Приведём примеры: «обратная связь с клиентом»; «каталогизация услуг», «единая база данных — «Интернет вещей» для обмена информацией между перевозчиком и клиентом»; «расширение географии перевозок»; «доступность информационных услуг и порталов»; «совершенствование систем слежения и контроля»; «комплексность услуг» (составлено по материалам [1–3]).

Для реализации основных направлений по созданию «Цифровой железной дороги» и внедрения принципов клиентоориентированности холдингом «РЖД» в 2018 г. создано ООО «Цифровая логистика» для разработки и реализации цифровых сервисов холдинга РЖД с использованием электронной торговой площадки «Грузовые перевозки».

Рассмотрим в свете реализуемой политики «цифровизации» бизнеса проект автоматизированной системы управления «Терминальная сеть», которая может стать «цифровой платформой» для реализации терминально-логистической бизнес-активности ОАО «РЖД».

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ «ТЕРМИНАЛЬНАЯ СЕТЬ»

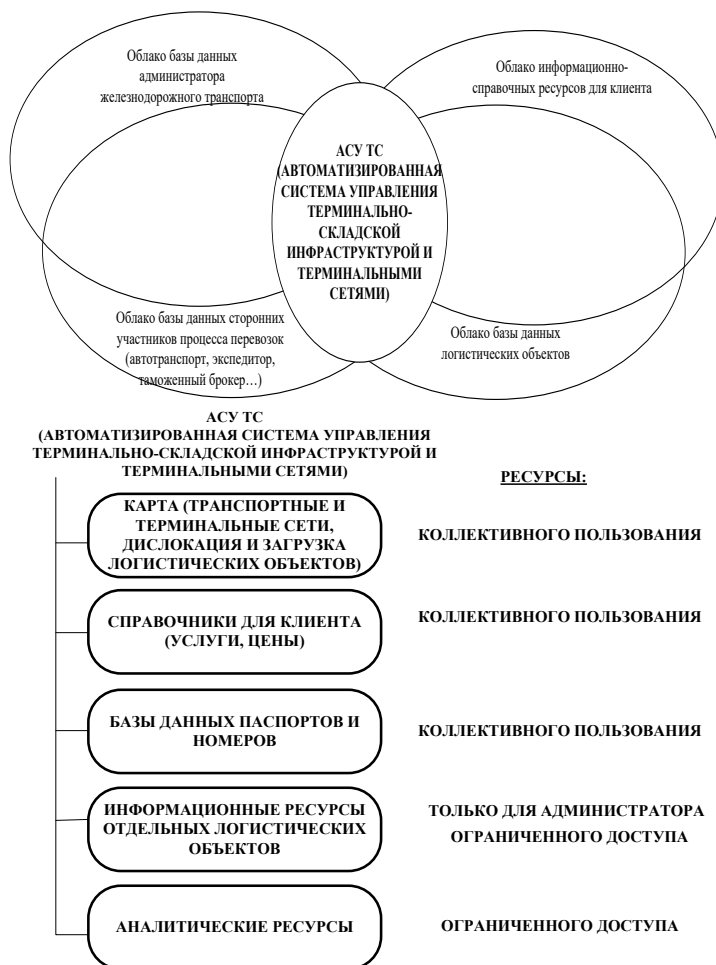
АСУ «Терминальная сеть» — это «цифровая платформа» для ведения терминально-логистического бизнеса холдингом «РЖД» «со скоростью клика», которая представляет собой общероссийскую сетевую базу данных (возможен формат «облака» или «сателлита» для известных систем, например, единой сетевой разметки и классности станций) как клиентоориентированный онлайн-сервис для заказчиков и поставщиков логистического сервиса.

Автором была разработана принципиальная структура такой единой системы управления логистическими объектами — «Автоматизированная система управления «Терминальная сеть» (рис. 4).

Возможный модульный состав автоматизированной системы управления «Терминальная сеть» показан на рис. 5.

В развитие предложений по идентификации и маркировке логистических объектов возможно составление «интерактивной карты» работающих на опорной железнодорожной сети логистических объектов для учёта их текущего состояния, ключевых





**Рис. 5. Состав информационно-справочных и аналитических ресурсов Автоматизированной системы управления «Терминальная сеть» (сокращение: АСУ ТС – Автоматизированной системы управления «Терминальная сеть»).**

параметров, а также их эффективной загрузки, мощности и визуализации их числа и дислокации на территории сетевых районов. Такая карта с «обратной связью» может быть полезна и при решении «вопросов этапного развития и/или проектирования терминальной сети ОАО «РЖД» (по приоритетам, указанным в [1–3]), а также при решениях об инвестировании объектов.

Предлагаемая автоматизированная система управления терминально-складской инфраструктурой и терминальной сетью ОАО «РЖД», интегрированная с объектами взаимодействия, позволит анализировать работу логистических объектов и всей сети, вести визуальный контроль оперативной обстановки по загрузке терминальных мощностей, обрабатывать заявки на логистический сервис «в одно окно».

Предпосылкой её создания следует считать веление времени: сегодня холдингу «РЖД» объективно необходим единый интерфейс, приемлемый для всех участников процесса перевозок. Всё это может и должно стать функциональным инструментом при решении проблем взаимодействия участников процесса перевозок и создать информационное обеспечение выхода ОАО «РЖД» на новый уровень логистического провайдинга (4–5 уровень логистики), предполагающий наличие единой электронной среды логистического оператора, сокращение областей видимости данных и снижение нагрузки на систему «электронная транспортная накладная» (ЭТРАН).

Можно полагать, что внедрение автоматизированной системы управления «Терминальная сеть» повысит эффективность



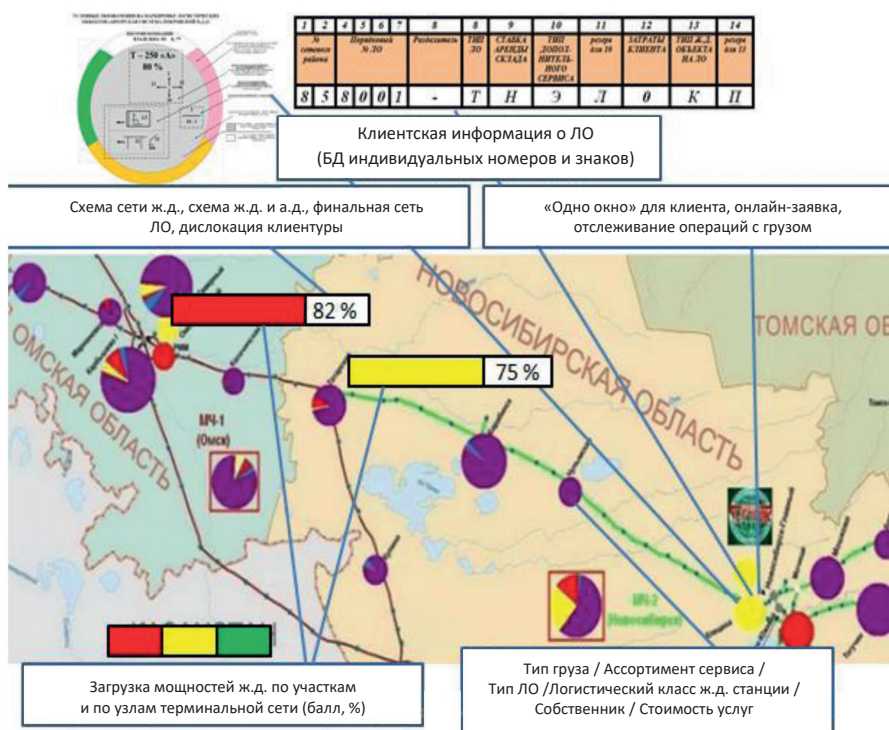


Рис. 6. Общий вид возможной интерактивной карты Автоматизированной системы управления «Терминальная сеть» (сокращения: ЛО – логистический объект, БД – база данных).

управленческих решений и ведения онлайн-контроля терминально-складской бизнес-активности холдинга «РЖД» в целом. В свою очередь, это обеспечит принятие адекватных решений по организации транспортно-логистических систем доставки грузов через железнодорожную терминальную сеть.

Состав интерактивной карты представлен на рис. 6.

В состав системы должны входить следующие блок-элементы: «Информационно-справочные ресурсы» для клиента; «Системы управления», имеющие прямой доступ к автоматизированным системам управления железнодорожного транспорта и других участников процесса перевозок; «База данных о логистических объектах» (маркировочные знаки, идентификационные номера и электронные паспорта логистических объектов); «Интерактивная карта терминальной сети» ОАО «РЖД», отражающая существующее состояние и размещение логистических объектов (в том числе тяготеющих к сети железных дорог), визуализация её возможностей (техническая оснащённость, ключевые параметры, ассортимент логистического сервиса), её загрузки (пол-

ноты использования), а также проекты перспективного развития с учётом капиталоемкости и приоритетности реализации; «Другая информация» – для администраторов – представителей железнодорожного перевозчика, которые могут редактировать информацию о логистических объектах в режиме реального времени, реализуя принципы клиентоориентированности и работы «в одно окно».

Автоматизированная система управления «Терминальная сеть» должна обладать такими признаками, как:

- сетевой характер,
- единство управления и вертикально-интегрированная структура,
- возможность просмотра и редактирования базы данных в режиме реального времени.

При этом её применение должно быть ориентировано на клиента для работы «в одно окно», а также на служебное применение в оперативных целях ОАО «РЖД» для анализа ситуации и корректировки сведений об объектах.

Для клиентов автоматизированная система управления «Терминальная сеть» позволит выбрать подходящий по парамет-

рам и услугам терминально-складской объект и ту грузовую станцию, на которой он расположен. После возможно не только получение исчерпывающей информации о ЛО и оформление заказа, но и подбор пакета дополнительных услуг по комплексному логистическому «сопровождению» грузодвижения.

Для ОАО «РЖД» автоматизированная система управления «Терминальная сеть» позволит оценивать уровень логистического обслуживания как по всей протяжённости сети железных дорог, так и по её отдельным полигонам, а также планировать развитие собственной терминальной сети на основе автоматизированного расчёта логистических показателей.

Вышеизложенное позволяет полагать, что сформулированные в исследовании предложения соответствуют основным критериям, предъявляемым к свойствам предоставляемой клиенту информации, которые отражены в [30; 31, с. 11].

## ПРИМЕНИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

К основным результатам исследования можно отнести:

1) автоматизированные решения по идентификации, маркировке и проектированию железнодорожных логистических объектов для унификации и упрощения принятия технико-эксплуатационных и экономических решений;

2) концепцию формирования и структуры автоматизированной системы управления терминальной сетью железнодорожного транспорта.

По итогам проведённой работы подготовлен проект «Логистического руководства» для железнодорожного транспорта в виде монографии [13]. Проект:

1) включает методику расчёта и оценки логистических показателей работы терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта;

2) содержит типологию и параметрические ряды логистических объектов;

3) может использоваться как основа для государственного стандарта в сфере терминально-логистической деятельности и логистического нормирования на железнодорожном транспорте.

Таким образом, реализация внесённых предложений позволит превратить компании ОАО «РЖД» «упущенную» выгоду в *реальную*, равную не менее 133 млрд руб. в год. В работе [32, с. 450] установлено, что «упущенная» выгода ОАО «РЖД» от потери потенциальных клиентов, которые пользуются услугами частных логистических объектов, не входящих в терминально-складскую инфраструктуру холдинга, составляют не менее 133 млрд руб./год.

В России на сети железных дорог действуют порядка пяти тысяч различных по функционалу, типу и формату бизнеса логистических объектов, на инфраструктурной базе которых компания ОАО «РЖД» предоставляет широкий ассортимент терминально-логистических услуг [1]. Следует отметить, что в 2017 году доля таких услуг в портфеле холдинга «РЖД» составляла примерно 20 % [2].

С одной стороны, холдинг «РЖД» разграничивает сферы деятельности и имеет два обособленных подразделения в своей структуре: по управлению перевозками и по управлению терминально-складским комплексом. С другой, стремится обеспечить комплексное обслуживание грузов и грузовладельцев.

При трансформации компании «РЖД» из перевозочной и инфраструктурной в транспортно-логистическую устранение этого противоречия приобретает для науки и практики особую актуальность. Ситуация усложняется необходимостью решения целого ряда разноплановых задач по совершенствованию технологии комплексного обслуживания клиентов на терминально-логистической инфраструктуре и по привлечению новых высокодоходных грузопотоков на терминальную сеть в совокупности.

Результаты исследования могут применяться транспортно-логистическими компаниями для решения целого спектра прикладных задач:

1) идентификации ЛО с учётом конструкции, вида складирования, размеров, технической оснащённости и др.;

2) выбора клиентом ЛО с учётом его функциональных возможностей и др.;

3) оценки проектов строительства и реконструкции объектов терминально-складской инфраструктуры железных дорог;

Таблица 1

Результат	Возможная сфера использования
1. Программный комплекс «Классификация логистических объектов»	унификация терминологии и требований к логистическим объектам, применимая и в практике сделок по складской недвижимости; простота и удобство применения для транспортно-логистической компании и клиента; складская логистика, управление цепями поставок, управление процессами перевозок через терминальную сеть, развитие терминально-складской инфраструктуры.
2. Программный комплекс «Идентификация и маркировка логистических объектов»	гибкие коммерческие предложения клиентам в концентрированной и простой форме об объектах; новый формат рекламной кампании услуг транспортно-логистического холдинга; упрощение взаимодействия участников процесса перевозок, автоматизация присвоения универсальной нумерации и доступа к базе данных терминально-складской инфраструктуры.
3. Общая концепция и архитектура автоматизированной системы управления «Терминальная сеть»	создание IT-платформы для подготовки выхода транспортно-логистической компании на уровень логистического провайдера 4–5 PL; создание единой общесетевой базы систематизированных данных о работающих на сети железных дорог объектах терминально-складской инфраструктуры (паспорта, номера, знаки); совершенствование работы «в одно окно» по принципу клиентоориентированности.
4, 5. Проекты стандарта и логистического руководства	стандартизация и унификация параметров терминально-складских объектов, классификационного подхода и терминологического аппарата в сегменте грузового бизнеса транспортно-логистической компании, методическое обеспечение проектирования логистических объектов; в дальнейшем — разработка эффективных программ стратегического развития отрасли.

4) оценки логистической деятельности терминальной сети компании в целом;

5) контроля и аудита работы терминальной сети;

6) проектирования ЛО с оптимальными параметрами;

7) планирования работы железнодорожного транспорта, что обеспечит рост доходов от логистической деятельности в целом.

## КЛЮЧЕВЫЕ ВЫВОДЫ

1. Эффективность изложенных предложений заключается в привлечении новых клиентов на железнодорожный транспорт, «переключении» с автомобильного транспорта потенциальных грузопотоков высокодоходных грузов за счёт гибких коммерческих предложений в максимально удобном, упрощённом виде, повышения их информативности. Применение предложений может быть реализовано при подготовке рекламных предложений и рассылке предложений клиентам. Это в полной мере «...повысит конкурентоспособность железнодорожного перевозчика на транспортно-логистическом рынке» [1], а также позволит сформировать «единую клиентоориентированную информационную среду как основное

условие для логистического провайдинга 4 и 5 уровня» [2, 3], к достижению которого сегодня стремятся многие железнодорожные компании.

2. Полученные результаты направлены на подготовку цифровой платформы и автоматизацию принятия решений по сквозному, комплексному управлению объектами терминальной сети. В свою очередь, это позволит расширить клиентскую базу и повысить эффективность работы логистического блока железнодорожных компаний. Это достигается за счёт упрощения взаимодействия с клиентами, предоставления информации о логистических объектах и услугах в сконцентрированном и адаптированном под интересы клиента формате. Такими новыми, клиентоориентированными, форматами подачи информации могут стать: «логистический класс» станции, «маркировочный знак» и «идентификационный номер» логистического объекта, а также «интерактивная цифровая платформа», обеспечивающая частичное раскрытие информации и активное участие клиентов.

3. Обзор потенциальных сфер применения полученных результатов сведён в таблицу 1.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства РФ 22.11.2008 г. № 1734-р. [Электронный ресурс]: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer\\_id=5104&STRUCTURE\\_ID=704](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704). Доступ 17.01.2019.
2. Концепция создания терминально-логистических центров на территории РФ. — М., 2012. [Электронный ресурс]: [http://cargo.rzd.ru/dbmm/download?vp=5&load=y&col\\_id=121&id=74208](http://cargo.rzd.ru/dbmm/download?vp=5&load=y&col_id=121&id=74208). Доступ 17.01.2019.
3. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога». [Электронный ресурс]: <https://www.samgups.ru/units/unir/Proekt%20konceptcii%20cifr.%20dorogi.pdf>. Доступ 17.01.2019.
4. Куренков П., Сафронова А., Кахриманова Д. Логистика международных интермодальных грузовых перевозок // Логистика. — 2018. — № 3. — С. 24–27.
5. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры // Мир транспорта. — 2018. — № 1. — С. 152–163.
6. Покровская О. Д. Классификация объектов железнодорожной терминально-складской инфраструктуры // Вестник УрГУПС. — 2017. — № 1. — С. 70–83.
7. Покровская О. Д., Маликов О. Б. Методика построения сетевого графа структуры логистического объекта // Мир транспорта. — 2017. — № 1. — С. 18–27.
8. Тарифное руководство № 1. Часть 1 (Правила применения тарифов). — Прейскурант № 10-01: Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые РЖД. [Электронный ресурс]: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3Fid%3D6188%26layer\\_id%3D5104%26STRUCTURE\\_ID%4704738](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3Fid%3D6188%26layer_id%3D5104%26STRUCTURE_ID%4704738). Доступ 17.01.2019.
9. Тарифное руководство № 4 (ред. от 28.11.2008 г., с изм. от 18.11.2010 г.). Книга 2. Часть 1. Алфавитный список железнодорожных станций.
10. Тарифное руководство № 4 (ред. от 28.11.2008 г., с изм. от 18.11.2010 г.). Книга 3. Тарифные расстояния между транзитными пунктами.
11. Инструкция по кодированию объектов станций, наименований грузоотправителей, грузополучателей и грузов на железных дорогах (утв. 15.05.1970 г. № ЦМ/2706, по сост. на авг. 2014).
12. Ермолаев К. Н., Афанасенко И. Д., Покровская О. Д. и др. Экономика России: прошлое, настоящее, будущее: Монография / Под общ. ред. Н. А. Адамова. — М.: ИТКОР, 2014. — 248 с.
13. Покровская О. Д. Логистическое руководство: математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта: Монография. — Казань: Бук, 2017. — 281 с.
14. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок. — М.: УМЦ по образованию на ж.д. транспорте, 2014. — 536 с.
15. Титова Т. С., Ахтямов Р. Г. Система управления техносферной безопасностью. — СПб.: ПГУПС, 2017. — 23 с.
16. Титова Т. С. Методология комплексной оценки влияния новых технологий на геоэкологическую обстановку // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2005. — № 5. — С. 2.
17. Котляренко А. Ф., Куренков П. В. Логистизация информационных технологий на транспортных стыках (в морских портах и погранпереходах) // Транспорт: Экспедирование и логистика. — 2002. — № 3. — С. 11–22.
18. Котляренко А. Ф., Куренков П. В. Взаимодействие на транспортных стыках при внешнеторговых перевозках // Железнодорожный транспорт. — 2002. — № 2. — С. 48–52.
19. Куренков П. В., Котляренко А. Ф. Взаимодействие грузовладельца с причастными подразделениями при экспортно-импортных железнодорожных перевозках через морские порты // Бюллетень транспортной информации. — 1997. — № 6. — С. 34–38.
20. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности // «РЖД-Партнер». [Электронный ресурс]: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/news/sbityi-pritsel- klientoorientirovannosti-414174/>. Доступ 20.06.2016.
21. Покровская О. Д., Маликов О. Б. Классификация, иерархия и идентификация объектов терминально-складской инфраструктуры // Транспорт: наука, техника, управление. — 2017. — № 8. — С. 13–21.
22. Воскресенский И. В., Покровская О. Д. Алгоритмизация комплексного расчёта параметров терминальной сети региона // Транспорт Урала. — 2011. — № 1. — С. 10–13.
23. Самуйлов В. М., Покровская О. Д., Воскресенская Т. П. Интеграция региональной терминально-логистической сети в международные транспортные коридоры // Инновационный транспорт. — 2013. — № 1. — С. 33–37.
24. Самуйлов В. М., Покровская О. Д. Практика и эффективность формирования транспортно-логистических кластеров // Вестник УрГУПС. — 2016. — № 4. — С. 76–88.
25. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientifica // Italian Science Review. — 2016. — 1(34). — pp. 112–116.
26. Покровская О. Д., Коровяковский Е. К. Логистика терминалов: перспективное направление логистики // Известия ПГУПС. — 2015. — № 3. — С. 155–164.
27. Воскресенская Т. П., Покровская О. Д. Методика и алгоритмизация принятия решений по формированию терминальной сети в регионе // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2010. — № 3. — С. 74–84.
28. Классификация, разработанная Международной консалтинговой компанией Knight Frank. [Электронный ресурс]: <http://www.stroi-baza.ru/articles/one.php?id=667>. Доступ 17.01.2019.
29. Классификация складских объектов в табличной форме. [Электронный ресурс]: [http://www.pro-sklad.com/articles/articles\\_268.html](http://www.pro-sklad.com/articles/articles_268.html). Доступ 17.01.2019.
30. Корпоративные компетенции ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]: <http://www.pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=899804>. Доступ 17.01.2019.
31. Политика клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок. — Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.07.2016 г. № 1489 р. [Электронный ресурс]: [http://www.consultant.ru/law/ref/ju\\_dict/word/udovletvorennost\\_klienta/](http://www.consultant.ru/law/ref/ju_dict/word/udovletvorennost_klienta/). Доступ 17.01.2019.
32. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем железнодорожного транспорта / Дис... док. техн. наук. — СПб.: ПГУПС, 2018. — 377 с.
33. Цифровая Россия: новая реальность. [Электронный ресурс]: <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/russia/our%20insights/digital%20russia/digital-russia-report.ashx>. Доступ 17.01.2019. ●





# Digitalization, Informatization, Identification and Labeling of Logistics Facilities for the Purposes of Enhanced Customer Focusing



*Pokrovskaya, Oksana D., Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia\*.*

**Oksana D. POKROVSKAYA**

## ABSTRACT

Following the digitalization and informatization trends in transport sector the logistics segment of the activities of railway holding companies has entered a period of dynamic development, requiring considerable improvement of technology, processes and proceedings.

The objective of the research is to search for optimal decisions in the field of automation and informatization of the procedures of identification, labelling, and designing of railway logistics facilities. The research used tools of statistics, system and economic analysis, computer simulation.

The results present development of proposals for automation, identification, labeling and designing of railway logistics facilities to unify and simplify decision-making in technical, operational and economic fields. Their implementation will

allow to solve a whole range of tasks for managing terminal-warehouse infrastructure facilities and will also help to expand the customer base of railway companies, e.g. of JSC Russian Railways, by increasing availability, simplicity and customer focus of information on logistics facilities.

The developed concept of an automated control system for the railway terminal network suggests that respective software products will provide an opportunity to calculate key evaluation, inventory, control and advertising parameters of logistics facilities. It can be used as a basis for developing flexible commercial offers. The introduction of the concept and accompanying information solutions will allow to create a single customer-oriented information environment and to achieve 4<sup>th</sup>–5<sup>th</sup> levels of providing of logistics services (4PL; 5PL).

**Keywords:** railways, railway business, digital railway, transport and logistics activities, customer focus, identification, labeling, logistics facility, terminal network.

\*Information about the author:

**Pokrovskaya, Oksana D.** – D.Sc. (Eng), professor of the department of railway stations and hubs of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, insight1986@inbox.ru.

Article received 17.01.2019, accepted 26.04.2019.

For the original Russian text please see p. 112.

This research was carried out as part of a grant from JSC Russian Railways for development of scientific and pedagogical schools in the field of railway transport (protocol dated 07.09.2017 No. 36 pr, approved by the President of JSC Russian Railways O. V. Belozarov on 11.10.2017).

**Introduction.** The largest transport companies in the world are transformed into transport and logistics holding companies. The logistics segment is becoming an important resource for improving efficiency of their activities. A successful example of organization of transport and logistics activities is shown through the practices of the railway holding companies – Deutsche Bahn (DB), JSC Russian Railways.

At the same time, this area of activity under the conditions of informatization and digitalization of the economy and transport, introduction of new information processing technologies, transition of relationships between service providers and customers into the information space is subject to dynamic development, requiring an ongoing search for new methods to improve activities, technologies, processes and procedures that allow to achieve significant improvements.

The *objective* of this study is to automate identification, labeling and designing procedures for railway logistics facilities to unify and simplify process of making technical, operational and economic decisions when managing terminal-warehouse infrastructure facilities, as well as to expand the client base of railway companies (using the example of JSC Russian Railways) by increasing availability, customer focus and simplicity of presentation of information about terminal-warehouse infrastructure facilities.

When developing the proposals with respect to the activities of JSC Russian Railways, the priorities indicated in [1, 2], as well as in the comprehensive project «Digital railway» [3] were taken into account.

The main tasks solved by the study were:

1) to formulate the concept and modular structure of an automated control system for the terminal network of railway transport;

2) in accordance with the customer focus policy implemented by the Russian Railways holding company, to develop a system for labeling and identification of logistics facilities for railway transport, understandable to each participant in the transportation process;

3) to develop software in which the stated methods of identification, labeling and decision-making are automated.

The implementation of the proposals would allow the railway company, in our case, JSC Russian Railways, to achieve the desired state that will comprise a set of possibilities:

- presentation to customers in the most concentrated and capacious form of the parameters of logistics facilities that are significant when ordering a logistics service;

- immediate application of the proposal as a marketing recommendation in advertising campaigns, as well as by the railway company structures in development of flexible commercial offers;

- development of a «digital platform» [3] and, in the case of JSC Russian Railways, of «conditions of achieving... of the status of a logistics provider of level 4» [1];

- increasing the length and depth of the logistics chains controlled by JSC Russian Railways (not only «from station to station», but «from client to client»);

- full automation of payment, clearing and methodological procedures;

- growth of «total controllability of terminal-warehouse infrastructure facilities» [2], of the ability to evaluate their activities, to monitor and track current parameters in real time;

- simplicity and ease of use in modern conditions of the transport and logistics business; and as a consequence:

- high-quality total control over the logistics facilities, and, as a consequence, over all the logistics chains built by the holding company for transportation of goods,

- expanding the customer base due to the informativity and simplicity of information about logistics facilities,

- «growth of investment attractiveness of both logistics facilities operating on a supporting railway network, and of construction projects and the phased development of high-quality terminal-warehouse infrastructure» gravitating «to cargo railway stations» (according to the priorities indicated in [1, 2]);

- implementation of «digital transformation» of the terminal and logistics activities of the company by «creating a unified information environment» [3] for interaction of railway transport with customers and maintaining a unified database of logistics facilities, simplifying procedures for monitoring, recording and evaluating the activities of railways [4, p. 25];

- increasing the competitiveness of the terminal-logistics services provided by JSC Russian Railways on the whole [5, p. 159];

The study used general scientific *methods*, tools of statistical, systemic, economic analysis, computer modeling, as well as the developed software.

### **Terminology**

We introduce a number of definitions that we will further use.

We consider a *terminal network* as «...a set of logistics facilities of various functional types and the transport sections connecting them, which are served unimodally or multimodally, for rational organization of the processes of cargo handling, transportation and increasing the added value of goods during delivery from a consignor to a consignee».

*Logistics facilities* are «...objects of transport and storage infrastructure that are concentrated in a spatially defined geographical area and physically render a wide range of integrated terminal and logistics services for various customers and their cargoes in delivery systems from an initial shipper to a final consignee» [6, p. 70].

The object of the terminal-warehouse infrastructure of railway transport, which implements the functions of a nodal element of the terminal network as a logistics system and provides technical and infrastructural support for physical implementation of various services (loading, unloading, storage, distribution of goods, bringing goods to final consumer) when interacting with other participants in the transportation process is considered as a *railway logistics facility* [7, p. 18].

### **Customer-focused solutions for terminal and logistics activities of a railway company: identification and labeling of logistics facilities**

The proposed proposals, which are in many respects universal in relation to railway holding companies, due to the need to demonstrate their integrated, systemic nature, taking into account the specifics of activities in particular market conditions, are considered in relation to JSC Russian Railways.

First of all, it is proposed to apply the principles of customer focus in information about terminal-warehouse facilities of the holding company, the demand for services of which is now steadily increasing. Unfortunately, JSC Russian Railways is losing potential customers who «leave» towards private logistics facilities. In many ways, this situation of «outflow» of highly profitable cargo from public

logistics facilities due to the low customer orientation of the information about the logistics facilities of railways and their functionality. This does not allow customers to have complete information for making decisions and significantly reduces availability of information about logistics facilities and of comprehensive transportation and logistics services provided by the holding company on the whole.

At the same time, it is well known that the basis of a customer-oriented service is its accessibility, flexibility, information content and convenience, as well as a sufficient level of «awareness» of customers about the services provided. The simplification and «digitalization» of relations with customers should be considered from the point of view of socio-economic and technological process of creating value for JSC Russian Railways as of a supplier of high-quality logistics services.

Maximum updating and visualization of information about logistics facilities is required. This can be done with the help of labeling, numbering (code), assigning of a «class» for each logistics facility, with full information coverage. In modern conditions of the transport and logistics market, it becomes necessary to switch «to a common language» with customers, following the example of the pharmaceutical industry: «acetylsalicylic acid» has a simpler, consumer name — «aspirin».

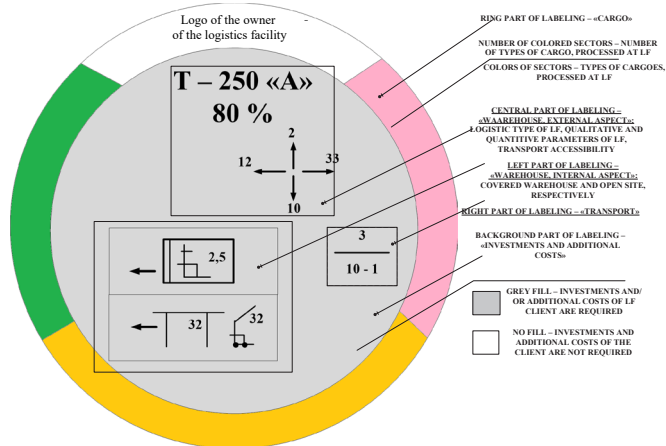
In particular, it was proposed to assign a *logistic class*, an individual identification number and a mark to each railway which is open for cargo operations. Such a naming system will give customers key information about the logistics service provided by each logistics facility: a warehouse, terminal-warehouse complex and other structures available at the station.

A *logistic class* of a logistic facility of railways is an Arabic numeral from 1 to 9, determined by a point method by experts for all logistic functions and operations performed at the station, taking into account their complexity. The logistic class of a station should be assigned by experts (commercial-audit service, independent experts, customers) according to the point method and placed in the public domain.

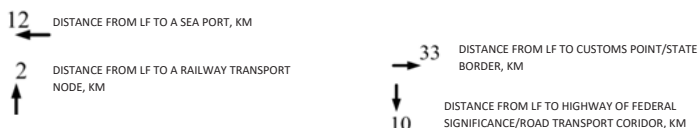
The proposed «*logistic class*», in contrast to the generally accepted classification and coding system for station facilities [8–11], reflects functional, technical and technological features of the terminal-warehouse infrastructure located



**Pic. 1. The composition of a mark of a logistics facility.**



**Pic. 2. Designations in the central part of labeling.**



at the station, as well as the range of transport, warehouse and integrated logistics services. In other words, the logistic class is directly related to the parameters that are most significant for a client when he is making a decision on the use of the services of a particular logistics facility [12, p. 117].

A *mark* of a logistic facility is a short, but meaningful inscription that can easily determine a class of a facility (this is useful for tenants who are not familiar with the classes of the logistics infrastructure). To compose a mark in real business conditions, the author has developed an automated program.

It can be assumed that it is convenient to make inscriptions against a color background directly on the facades of the warehouse, and also use it together with the identification number, including for advertising purposes. Labeling will allow the owner of the terminal-warehouse infrastructure (Russian Railways holding company) to save on advertising: having seen and read it, the client will «find» it on his own.

Pic. 1 shows a typical composition of such a mark.

Labeling of a logistics facility in the general case consists of 5 zones (labels):

Part 1. «Cargo». The number of colored sectors indicates the number of different cargoes that this logistics facility can process. The color of each sector indicates the type of cargo.

Part 2. «Warehouse». T – transport terminal; 250 – total usable area of cargo storage at the

logistics facility, sq. m; A – classes of warehouse buildings at LF, class «A»; 80 % – «coverage» of standard transport and storage services with additional logistics services, %. Pic. 2 describes other designations of part 2 of labeling.

Part 3. «Warehouse (Technical and Layout Solution)»: a pointer to the type of railway track adjoining to the indoor warehouse complex at the logistics facility; indicator of the type of logistic facility used in covered warehouses (above) of shelving equipment; a pointer to the type of intra-warehouse handling equipment used at the logistics facility. The labeling shows the layout of indoor warehouses and outdoor areas. In case that several types of equipment are used inside covered warehouses for the same goods, only one, preferred type is indicated. There are also: indication of the type of open area (bottom); an indicator of payload capacity of the used loading and unloading equipment of a logistics facility in open areas.

Part 4. «Transport». 3 – average duration of car turnover at the logistics facility, hours; 10 – number of cars in one characteristic delivery, cars; 1 – delivery interval, hour.

Part 5. «Investment». If it is color filled, then additional investments are required (customer expenses), if it is not color filled then investments are not required. The «logo» of the company, owner of the logistics facility is an additional inscription and may be absent. Conventionally, the mark can be divided into 5 parts: «background» (part 5), «ring» (part 1), «central» (part 2), «left» (part 3) and «right» (part 4) parts.



The natural indicators that are most convenient for the client are mainly used (based on the materials of the «Logistic Guide» [13, p. 98]).

*Identification number* is a flexible, up-to-date commercial offer for the client, which can be implemented in several versions. Two options for presenting identification numbers are given in expanded form for the owner (option 1, «expanded») and in a brief client form (option 2, «client»). When compiling the identification numbering system, we used the results obtained in studies by professors O. B. Malikov [14], P. V. Kurenkov and other researchers [15–19], as well as in previously published works of the author [20–27].

Option 1

1	2	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	13	14
№ of the network district				Serial number № LF				Divider	LF TYPE	WAREHOUSE RENT RATE	TYPE OF ADDITIONAL SERVICE	reserve for 10	reserve for 13
8	5	8	0	0	1	-	T	H	F	L	0	C	Tr

where – for «expanded» option:

Part 1. «Network District» (two positions). 85 – number of the network district, in accordance with a single network markup.

Part 2. «Facility Number» (4 positions). 8001 – serial number of the facility in the network area. «Divider» (1 position).

Part 3. «LF Type» (one position). T – transport terminal (type of logistic facility according to the author’s classification: D – cargo area, cargo area, W – warehouse, terminal-warehouse complex, C – distribution center, L – logistics center, N – transport and logistics node, M – multimodal transport and logistics center; H – letter of the Latin alphabet, according to the cost interval).

Part 4. «Rent Rate» (one position). Storage rate on LF, euro/1 storage unit per day (1 pallet, 1 container, 1 ton of cargo) – 31–50 euro/sq. meter.

Part 5. «Additional Service» (one position). F, L – an indication of the services performed at the logistics facility: F – forwarding, L – leasing, etc., and «Reserve» (for part 5, one position).

Part 6. «Customer Costs» (one position). Indication of the need for additional costs (for the rental of trucks, paperwork, personnel, repair of equipment and buildings, equipment ...): 0 – NO (1 – YES).

Part 7. «Type of Railway LF» (one position): K, P – in accordance with the Instructions for coding of station and cargo objects on railways, expanded by three more types of facilities; taking into account: type of storage, logistic role of a facility, type of cargo (C – container point, Tr – transshipment point) (according to the draft «Logistic Guide for Railway Transport» developed by the author, [13, pp. 88–98]).

Option 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
WAREHOUSE		SERVICE		OPERATION				COST			
Warehouse type	Useful area of storage	Type of LUM scheme	Level of service	Tengo, h/car		Lmax, concar		Cost of LUM, euro/cargo unit		Cost of use of infrastructure, euro/car	
A	M	1	S	0	5	7	1	2	2	1	0

where – for option «client»:

Part 1. «Warehouse». 1 – conditional index, typology of warehouses at LF (prevailing type) according to the international classification of warehouse buildings and premises, the letter of the Latin alphabet A, B, C, D (according to Knight Frank’s well-known international classification), 2 – conditional index, total usable storage area at LF: M– medium (1400–1799 sq. m), 3 – conditional index, layout of the loading and unloading scheme (railway/track approach, type of used/used LUM), 1 – using a gantry crane.

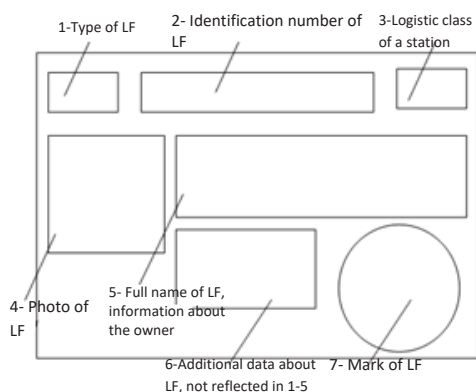
Part 2. «Service». 4 – S – service package (Small): standard services (loading-unloading, reception-delivery, documentation, storage, door-to-door services, «last mile»).

Part 3. «Operation». 5, 6 (two positions): natural index, average duration of loading (unloading) of one car at LF, h; 7, 8 (two positions): natural index, maximum length of the train supplied for loading and unloading, conventional cars.

Part 4. «Cost». 9, 10 (two positions): payment for loading and unloading with 1 unit of cargo (pallet, ton, container), euro/unit; 11, 12 (two positions): payment for the use of infrastructure (renting a place), euro/car (according to the project «Logistic Guide for Railway Transport» developed by the author, [13, pp. 79–88]).

A warehouse type is given in accordance with the requirements of international classifications, for example, [28–29]. Obviously, subsequently, for network-wide application, a database of identification numbers and marks will be required. The





**Pic. 3. The structure of the electronic passport of LF in a single information environment of JSC Russian Railways.**

author obtained certificates of Rospatent [Russian Federal Service for Intellectual Property] for *software* for labeling, identification and design of logistics facilities. It is also possible to create a digital passport of a logistics facility, the view of which is shown in Pic. 3.

#### **Implementation of priorities of «Digital Railway» in management of logistics facilities**

Following the growing needs of customers and development of IT technologies, the policy of JSC Russian Railways needs to reform its activities in view of digitalization and innovative development. In 2017, Russian Railways holding company, as part of «Digital Economy program», launched «Digital Railway» project to develop and implement digital technologies in key business processes and services of the company. The project is a combination of «...information technology, processes and standards of interaction, consistent with the digital business model» [3].

The concept of innovative development of railway transport involves the transition «from a platform-centric management approach to a network-centric» – that is, from development of information platforms and systems to their integration into a single information environment [30, 31]. This will allow carriers, consignors, consignees, owners of rolling stock and infrastructure to coordinate actions and make operational decisions based on complete and reliable information about the process.

Today, Russian Railways holding company provide comprehensive logistics services to customers, including provision of warehouse

services, consulting, logistics, multimodal transportation services, etc.

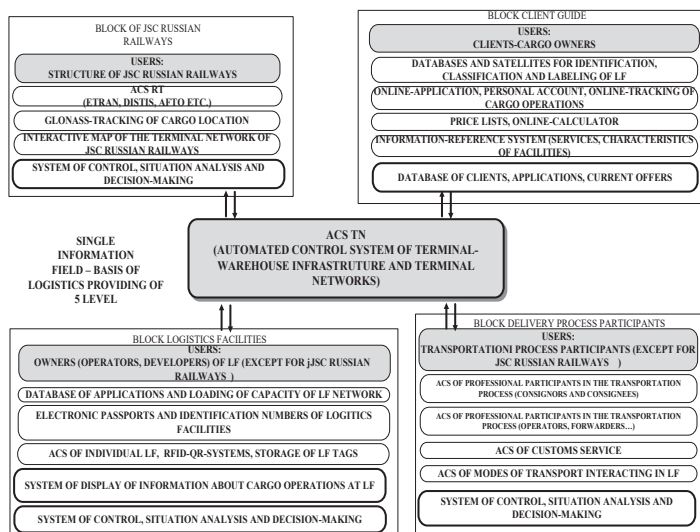
For modern science and practice, it is obvious that digital services are the drivers of global economic growth. According to the McKinsey Global Institute, by 2025, up to 22 % of China's GDP growth will be generated by Internet technologies, and in the United States this figure will be of up to 19 %. At the same time, according to Rosbusinessconsulting experts, the effect of digitalization of transport of the Russian Federation will increase GDP by 4,1–8,9 trillion rubles by 2025, to ensure up to 34 % of expected GDP growth [33, p. 10].

According to [3], digital services are «...a set of organizational, technical and methodological measures in the field of information technology to provide customers with automated service functionality». The concept is aimed at creating an automated service for customers, with which it will be easier to order and arrange transportation. This will increase the volume of transportation, and, consequently, income from implementation of digital transport related services.

Key areas will comprise: creating a unified infrastructure map on Russian Railways network, the «Internet of things», big data technology, smart systems, and mobile applications. It is known that achieving profitability through pricing is not always possible. Therefore, in addition to the basic transportation service, JSC Russian Railways is developing an additional service as a way to attract and retain customers.

The program of enhancing focus on customers contains some elements of Digital Railway concept. We can quote «customer feedback»; «cataloging of services», «a single database – «Internet of things» for exchange of information between the carrier and the client»; «expansion of the geography of transportation»; «accessibility of information services and portals»; «improving tracking and control systems»; «comprehensive services» (compiled based on materials [1–3]).

In order to implement the main guidelines for creation of «Digital Railway» and to implement the principles of customer focus, Russian Railways holding company established LLC Digital Logistics in 2018 to develop and implement digital services of Russian Railways holding company using «Cargo Transportation» electronic trading platform.



**Pic. 4. General architecture of the Automated control system Terminal Network.**

Let's consider from the point of view of the implemented policy of «digitalization» of business, a project of automated control system «Terminal Network», which can become a «digital platform» for implementation of terminal-logistic business activity of JSC Russian Railways.

#### **Automated control system «Terminal Network»**

ACS «Terminal Network» is a «digital platform» for conducting terminal and logistics business by Russian Railways holding company «at a click speed», which is an all-Russian network database (a «cloud» or «satellite» format is possible for well-known systems, for example, for common network marking and assigning stations with classes) as a customer-oriented online service for customers and logistics service providers.

The author has developed the basic structure of such a unified system of management of logistics facilities – «Automated control system «Terminal Network», Pic. 4.

A possible modular composition of the automated control system «Terminal Network» is shown in Pic. 5 (at the next page).

To develop proposals for identification and labeling of logistics facilities, it is possible to draw up an «interactive map» of logistics facilities operating on a supporting railway network to take into account their current status, key parameters, as well as their effective load, capacity and visualization of their number and location in the network regions. Such a map with «feedback» can be useful in resolving «issues of staged development and/

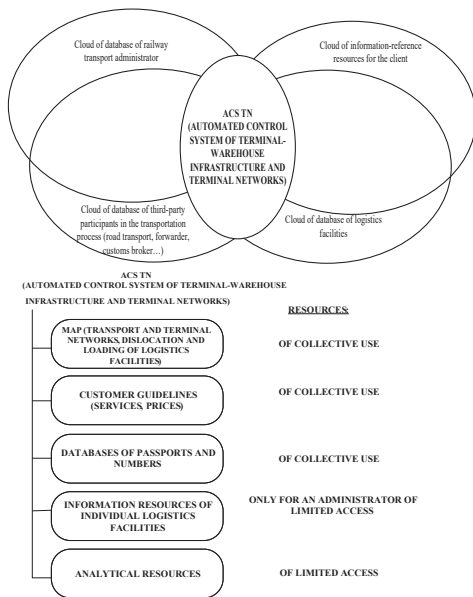
or design of the terminal network of JSC Russian Railways» (according to the priorities specified in [1–3]), as well as in decisions on investing in facilities.

The proposed automated control system for the terminal-warehouse infrastructure and the terminal network of JSC Russian Railways, integrated with the objects of interaction, will allow to analyze operation of logistics facilities and the entire network, conduct visual monitoring of the operational environment for loading terminal capacities, and process requests for a logistics services through a «single window».

The prerequisite of its creation should be considered as the imperative of time: today Russian Railways holding company objectively needs a single interface acceptable to all participants in the transportation process. All this can and should become a functional tool in solving the problems of interaction between participants in the transportation process and create information support for JSC Russian Railways to reach a new level of logistics provider (4<sup>th</sup> or/and 5<sup>th</sup> level of logistics), which assumes the existence of a single electronic environment for the logistics operator, reduction of data visibility and of the load on the electronic bill of lading system (ETRA).

It can be assumed that introduction of «Terminal Network» automated control system will increase the effectiveness of management decisions and online monitoring of the terminal-warehouse business activity of Russian Railways holding company as a whole. In turn, this will ensure making adequate decisions on organization of transport and





**Pic. 5. Composition of reference and analytical resources of the Automated control system «Terminal Network» (abbreviation: ACS TN – Automated control system «Terminal Network»).**

logistics systems for delivery of goods through the railway terminal network.

The layout of the interactive map is shown in Pic. 6.

The system should include the following *block elements*: «*Information and reference resources*» for the client; «*Control systems*» with direct access to automated control systems for railway transport actors and other participants in the transportation process; «*Database of logistic facilities*» (marks, identification numbers and electronic passports of logistics facilities); «*Interactive map of the terminal network*» of JSC Russian Railways, reflecting the current state and location of logistics facilities (including those gravitating to the railway network), visualizing its capabilities (technical equipment, key parameters, assortment of logistics services), its loading (completeness of use), as well as long-term development projects taking into account capital intensity and priority of implementation; «*Other information*» – for administrators – representatives of the railway carrier who can edit information about logistics facilities in real time, implementing the principles of customer focus and «a single window» operations.

Automated control system «Terminal network» should have such features as:

- network character;

- unity of management and vertically integrated structure;
- ability to view and edit the database in real time.

At the same time, its application should be focused on the client, operating in «a single window» mode, as well as on the use for operational purposes by JSC Russian Railways to analyze the situation and adjust information about objects.

The automated control system «Terminal Network» will allow clients to choose a terminal and storage facility that is suitable by parameters and services and a cargo station at which it is located. After that, it is possible not only to obtain exhaustive information about LF and place an order, but also to select a package of additional services for integrated logistics «support» of cargo movement.

For JSC Russian Railways, the automated control system «Terminal Network» will make it possible to evaluate the level of logistics services both for the entire length of a railway network and for its individual sectors, as well as to plan development of its own terminal network based on the automated calculation of logistics indicators.

The foregoing suggests that the proposals formulated in the study correspond to the main criteria governing the properties of the information provided to the client, which are reflected in [30; 31, p. 11].

### **Applicability of results and potential effectiveness**

The main results of the study include:

1) automated solutions for identification, labeling and design of railway logistics facilities to unify and simplify making technical, operational and economic decisions;

2) concept of development and structure of an automated control system of the terminal network of railway transport.

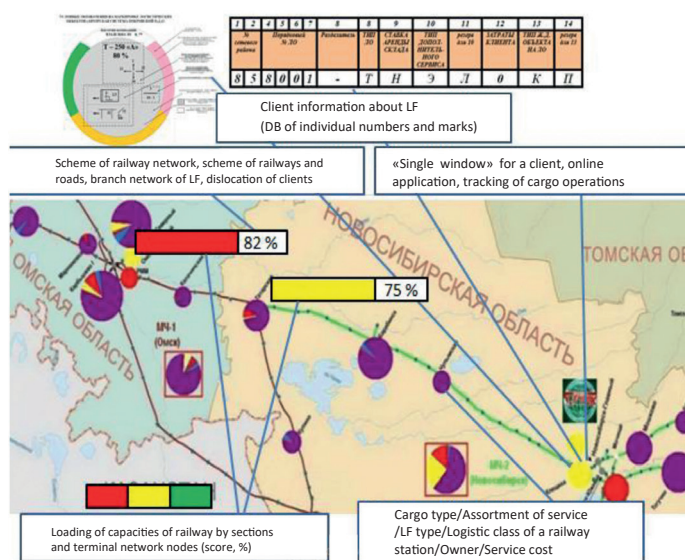
Based on the results of this work, a draft «*Logistic Guide*» for railway transport was developed in the form of a monograph [13]. The draft:

1) includes a methodology for calculating and evaluating the logistics performance of the terminal and warehouse infrastructure of railway transport;

2) contains a typology and parametric series of logistics facilities;

3) can be used as the basis for the state standard in the field of terminal and logistics





**Pic. 6. General view of a possible interactive map of the Automated control system «Terminal Network» (abbreviations: LF – logistics facility, DB – database).**

activities and logistic regulation in railway transport.

Thus, implementation of the proposals will make it possible for the JSC Russian Railways to turn the «lost» profit into *real*, equal to at least 133 billion rubles a year. In [32, p. 450] it was established that the «lost» profit of JSC Russian Railways from the loss of potential customers who use the services of private logistics facilities that are not part of the holding's terminal-warehouse infrastructure is equal to at least 133 billion rubles/year.

In Russia, about 5 thousand logistics facilities with different functionalities, types and formats of business operate on the railway network, on the infrastructure base of which JSC Russian Railways provides a wide range of terminal and logistics services [1]. It should be noted that in 2017 the share of such services in the portfolio of Russian Railways holding was approximately of 20 % [2].

On the one hand, Russian Railways holding company delimits areas of activity and has two separate divisions in its structure: transportation management and terminal and warehouse complex management. On the other hand, it seeks to provide comprehensive services for goods and cargo owners.

When Russian Railways holding company is transformed from a transportation and infrastructure company to a transport and logistics one, solution to this contradiction becomes especially relevant for science and

practices. The situation is complicated by the need to solve a number of diverse problems in improving the technology of integrated customer service at the terminal and logistics infrastructure and in attracting new highly profitable cargo flows to the terminal network in total.

The results of the study can be used by transport and logistics companies to solve a wide range of applied problems:

- 1) identification of LF taking into account design, type of storage, size, technical equipment, etc.;
- 2) LF choice by a client taking into account its functionality, etc.;
- 3) assessment of construction and renewal projects of terminal and warehouse infrastructure of railways;
- 4) assessment of the logistics activities of the terminal network of the company as a whole;
- 5) control and audit of the terminal network;
- 6) design of LF with optimal parameters;
- 7) planning of work of railway transport, which will ensure the growth of income from logistics activities in general.

### Key conclusions

1. The effectiveness of the proposals presented is explained through attracting new customers to the railway transport, «switching» from road to railway transport of potential cargo flows of highly profitable goods due to flexible commercial offers in the most convenient, simplified form, increasing their informativity.



Table 1

Result	Possible sphere of application
1. The software package «Classification of logistics facilities»	unification of the terminology and requirements for logistics facilities, applicable in the practice of transactions in warehouse real estate; simplicity and ease of use for the transport and logistics company and the client; warehouse logistics, supply chain management, transportation process management through the terminal network, development of terminal-warehouse infrastructure.
2. The software package «Identification and labeling of logistics facilities»	flexible commercial offers to customers in a concentrated and simple form about the facilities; new format of an advertising campaign for transport and logistics holding services; simplification of interaction of participants in the transportation process, automation of assignment of universal numbering and access to the database of terminal-warehouse infrastructure.
3. The general concept and architecture of the automated control system «Terminal Network»	creation of an IT platform for preparing the transport and logistics company to reach the level of the logistics provider 4–5 PL; creation of a unified network-wide database of systematized data on terminal-warehouse infrastructure facilities operating on the railway network (passports, numbers, signs); improvement of the «in one window» operation based on the principle of customer focus.
4, 5. Drafts of the standard and logistics guidelines	standardization and unification of parameters of terminal-warehouse facilities, classification approach and terminology apparatus in the cargo business segment of the transport and logistics company, methodological support for design of logistics facilities; in the future – development of effective programs for strategic development of the industry.

Application of suggestions can be implemented through development of promotional offers and distribution of offers to customers. This fully «...will increase the competitiveness of a railway carrier in the transport and logistics market» [1], and will also allow creation of a «single customer-oriented information environment as the main condition for level 4 and 5 logistics providers» [2, 3], the objective many railway companies are seeking today to achieve.

2. The results obtained are aimed at developing a digital platform and automating decision-making on end-to-end, integrated management of terminal network facilities. In turn, this will expand the customer base and increase the efficiency of the logistics block of railway companies. This is achieved thanks to: simplification of interaction with customers, provision of information about logistics facilities and services in a concentrated and adapted format for the interests of the client. Such new, customer-oriented formats of information delivery can be: the «logistic class» of the station, the «mark» and «identification number» of the logistic facility, as well as the «interactive digital platform», which provides partial disclosure of information and active participation of clients.

3. Range of potential areas of application of the results is shown in Table 1.

## REFERENCES

1. Transport strategy of the Russian Federation for the period until 2030. Approved by the order of the Government of the Russian Federation on 22.11.2008 No. 1734-r [Transportnaya strategiya RF na period do 2030 g. Urv. rasporyazheniem Pravitelstva RF 22.11.2008 № 1734-r]. [Electronic resource]: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer\\_id=5104&STRUCTURE\\_ID=704](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704). Last accessed 17.01.2019.
2. The concept of creating terminal and logistics centers in the Russian Federation [Kontseptsiya sozdaniya terminalno-logisticheskikh tsentrov na territorii RF]. Moscow, 2012. [Electronic resource]: [http://cargo.rzd.ru/dbmm/download?vp=5&load=y&col\\_id=121&id=74208](http://cargo.rzd.ru/dbmm/download?vp=5&load=y&col_id=121&id=74208). Last accessed 17.01.2019.
3. The concept of implementation of the comprehensive scientific and technical project «Digital Railway» [Kontseptsiya realizatsii kompleksnogo nauchno-tekhnicheskogo proekta «Tsifrovaya zheleznyaya doroga»]. [Electronic resource]: <https://www.samgups.ru/units/unir/Proekt%20konceptcii%20cif.%20dorogi.pdf>. Last accessed 17.01.2019.
4. Kurenkov, P., Safronova, A., Kakhriyanova, D. Logistics of international intermodal cargo transportation [Logistika mezhdunarodnykh intermodalnykh gruzovykh perevozok]. Logistika, 2018, Iss. 3, pp. 24–27.
5. Pokrovskaya, O. D. About terminology of terminal warehouse infrastructure objects. World of Transport and Transportation, Vol. 16, 2018, Iss. 1, pp. 152–163.
6. Pokrovskaya, O. D. Classification of railway terminal-warehouse infrastructure facilities [Klassifikatsiya ob'ektov zheleznodorozhnoi terminalno-skladskoi infrastruktury]. Bulletin of Ural State Transport University, 2017, Iss. 1, pp. 70–83.
7. Pokrovskaya, O. D., Malikov, O. B. Method of constructing a network graph of the logistic object structure. World of Transport and Transportation, Vol. 15, 2017, Iss. 1, pp. 18–27.
8. Tariff Guide No. 1. Part 1 (Rules for application of tariffs). Price List No. 10-01: Tariffs for transportation

of goods and infrastructure services carried out by Russian Railways [Tarifnoe rukovodstvo № 1. Chast' 1 (Pravila primeneniya tarifov). — Preiskurant № 10-01: Tarify na perevozki грузов i uslugi infrastruktury, vypolnyaemie RZD]. [Electronic resource]: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3Fid%3D6188%26layer\\_id%3D5104%26STRUCTURE\\_ID%4704738](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3Fid%3D6188%26layer_id%3D5104%26STRUCTURE_ID%4704738). Last accessed 17.01.2019.

9. Tariff Guide No. 4 (as amended on 28.11. 2008, as amended on 18.11.2010). Book 2. Part 1. Alphabetical list of railway stations [Tarifnoe rukovodstvo № 4 (red. ot 28.11.2008, s izm. ot 18.11.2010). Kniga 2. Chast' 1. Alfavitniy spisok zheleznodorozhnykh stantsii].

10. Tariff Guide No. 4 (as amended on 28.11. 2008, as amended on 18.11.2010). Book 3. Tariff distances between transit points [Tarifnoe rukovodstvo № 4 (red. ot 28.11.2008, s izm. ot 18.11.2010). Kniga 3. Tarifnie rasstoyaniya mezhdu transitnymi punktami].

11. Instructions for coding station facilities, names of consignors, consignees and goods on railways (approved on 15.05.1970 No. TsM/2706, as of August 2014) [Instruktsiya po kodirovaniyu ob'ektov stantsii, naimenovaniy gruzootpravitelei, gruzopoluchatelei i gruzov na zheleznnykh dorogakh (utv. 15.05.1970 № TsM/2706, po sost. na avg. 2014)].

12. Ermolaev, K. N., Afanasenko, I. D., Pokrovskaya, O. D. [et al]. The Russian economy: past, present, future: Monograph [Ekonomika Rossii: proshloe, nastoyashchee, budushchee: Monografiya]. Ed. by N. A. Adamov. Moscow, ITKOR publ., 2014, 248 p.

13. Pokrovskaya, O. D. Logistic management: mathematical foundations of terminalistics, labeling, classification and identification of logistic facilities of railway transport: Monograph [Logisticheskoe rukovodstvo: matematicheskie osnovy terminalistiki, markirovka, klassifikatsiya i identifikatsiya logisticheskikh ob'ektov]. Kazan, Buk publ., 2017, 281 p.

14. Malikov, O. B. Transportation and warehousing of goods in supply chains [Perevozki i skladirovanie tovarov v tsepyakh postavok]. Moscow, TMC for education on railway transport, 2014, 536 p.

15. Titova, T. S., Akhtyamov, R. G. The control system of technosphere safety [Sistema upravleniya tekhnosfernoi bezopasnost'yu]. St. Petersburg, PGUPS, 2017, 23 p.

16. Titova, T. S. Methodology of comprehensive assessment of the impact of new technologies on the geo-ecological situation [Metodologiya kompleksnoi otsenki vliyaniya novykh tekhnologii na geoekologicheskuyu obstanovku]. Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport, 2005, Iss. 5, p. 2.

17. Kotlyarenko, A. F., Kurenkov, P. V. Logistics of information technologies at transport junctions (in seaports and border crossings) [Logistizatsiya informatsionnykh tekhnologii na transportnykh stykakh (v morskikh portakh i pogranperekhodakh)]. Transport. Ekspedirovanie i logistika, 2002, Iss. 3, p. 11–22

18. Kotlyarenko, A. F., Kurenkov, P. V. Interaction at transport junctions during foreign trade transportation [Vzaimodeistvie na transportnykh stykakh pri vneshnetorgovykh perevozkakh]. Zheleznodorozhnyi transport, 2002, Iss. 2, pp. 48–52.

19. Kurenkov, P. V., Kotlyarenko, A. F. Interaction of the cargo owner with the involved units during export-import rail transportation through sea ports [Vzaimodeistvie gruzovladeltsa s prichastnymi podrazdeleniyami pri eksportno-importnykh zheleznodorozhnykh perevozkakh cherez morskije porty]. Byulleten transportnoi informatsii, 1997, Iss. 6, pp. 34–38.

20. Pokrovskaya, O. D. «Wrong sight» of customer focus [«Sbitiy pritsel» klientoorientirovannosti]. «RZD-Partner». [Electronic resource]: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/news/sbitiy-pritsel-klientoorientirovannosti-414174/>. Last accessed 20.06.2016.

21. Pokrovskaya, O. D., Malikov, O. B. Classification, hierarchy and identification of terminal-warehouse infrastructure objects [Klassifikatsiya, ierararkhiya i identifikatsiya ob'ektov terminalno-skladskoi infrastruktury]. Transport: nauka, tekhnika, upravlenie, 2017, Iss. 8, pp. 13–21.

22. Voskresensky, I. V., Pokrovskaya, O. D. Algorithmization of the complex calculation of the terminal network parameters of the region [Algoritimizatsiya kompleksnogo rascheta parametrov terminalnoi seti regionala]. Transport Urala, 2011, Iss. 1, pp. 10–13.

23. Samuilov, V. M., Pokrovskaya, O. D., Voskresenskaya, T. P. Integration of the regional terminal and logistics network into international transport corridors [Integratsiya regionalnoi terminalno-logisticheskoi seti v mezhdunarodnie transportnie koridory]. Innovatsionnyi transport, 2013, Iss. 1, pp. 33–37.

24. Samuilov, V. M., Pokrovskaya, O. D. Practice and effectiveness of formation of transport and logistics clusters [Praktika i effektivnost formirovaniya transportno-logisticheskikh klasterov]. Bulletin of Ural State Transport University, 2016, Iss. 4, pp. 76–88.

25. Pokrovskaya, O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientifica. Italian Science Review, 2016, Iss. 1(34), pp. 112–116.

26. Pokrovskaya, O. D., Korovyakovskiy, E. K. Logistics of terminals: a promising area of logistics [Logistika terminalov: perspektivnoe napravlenie logistiki]. Izvestiya PGUPS, 2015, Iss. 3, pp. 155–164.

27. Voskresenskaya, T. P., Pokrovskaya, O. D. Methods and algorithmization of decision-making on formation of a terminal network in the region [Metodika i algoritimizatsiya prinyatiya reshenii po formirovaniyu terminalnoi seti v regione]. Bulletin of Ural State Transport University, 2010, Iss. 3, pp. 74–84.

28. Classification developed by the international consulting company Knight Frank [Klassifikatsiya, razrabotannaya Mezhdunarodnoi konsaltingovoi kompaniei Knight Frank]. [Electronic resource]: <http://www.stroi-baza.ru/articles/one.php?id=667>. Last accessed 17.01.2019.

29. Classification of warehouse facilities [Klassifikatsiya skladskikh ob'ektov v tablinoi forme]. [Electronic resource]: [http://www.pro-sklad.com/articles/articles\\_268.html](http://www.pro-sklad.com/articles/articles_268.html). Last accessed 17.01.2019.

30. Corporate competencies of JSC Russian Railways [Korporativnie kompetentsii OAO «RZD»]. [Electronic resource]: <http://www.pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=899804>. Last accessed 17.01.2019.

31. Russian Railways holding company's customer focus policy in the field of cargo. Approved by the order of JSC Russian Railways dated 26.07.2016 No. 1489 r [Politika klientoorientirovannosti kholdinga «RZD» v oblasti gruzovykh perevozk. Utv. rasporyazheniem OAO «RZD» ot 26.07.2016 № 1489 r]. [Electronic resource]: [http://www.consultant.ru/law/ref/ju\\_dict/word/udovletvorennost\\_klienta/](http://www.consultant.ru/law/ref/ju_dict/word/udovletvorennost_klienta/). Last accessed 17.01.2019.

32. Pokrovskaya, O. D. Comprehensive assessment of transport-warehouse systems of railway transport. D.Sc. (Eng) thesis [Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta. Dis... dok. tekhn. nauk]. St. Petersburg, PGUPS publ., 2018, 377 p.

33. Digital Russia: a new reality [Tsifrovaya Rossiya: novaya realnost']. [Electronic resource]: <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/russia/our%20insights/digital%20russia/digital-russia-report.ashx>. Last accessed 17.01.2019.







# Стратегическое развитие поставок нефтегрузов из России в Палестину



Георгий ГОГРИЧАНИ



Антон ЛЯШЕНКО

*Гогричани Георгий Венедиктович –  
АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.  
Ляшенко Антон Николаевич – Министерство  
экономического развития России, Москва, Россия\*.*

В последние десятилетия наблюдается значительное расширение мировой торговли нефти, что способствует развитию соответствующей транспортной инфраструктуры, совершенствованию и углублению деловых связей на мировых энергетических рынках и ускорению их глобализации. Россия играет всё более важную роль в сфере экспорта нефти и нефтепродуктов, тем самым оказывает серьёзное влияние на физические объёмы внешнеторговых операций, цены, уровень спроса и предложения. При этом очевиден интерес к российской нефти с учётом использования сформированной или планируемой транспортной инфраструктуры. Несмотря на характерные значительные колебания цен, которые обусловлены различными факторами экономического, геополитического, политического характера, очевидно сохранение общих тенденций повышения цен на нефть на фоне ожидаемого увеличения спроса на жидкое топливо. Данное заключение можно сделать, исходя из издержек по добыче энергоресурсов, организации логистической составляющей, возрастания соответствующих политических рисков, согласно конкурентным реалиям. В этой связи приобретает особую значимость выбор оптимального транспортного маршрута.

Целью исследования является апробация разработанного авторами алгоритма решения многокритериальной задачи по выбору рационального пути

доставки топлива в рамках логистических цепей от нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) до потребителя.

Апробация проводится на примере разработки гипотетических поставок нефтегрузов из России в государство Палестина. Используются методы экономического анализа, решения многокритериальной задачи, экспертных оценок. Представление задач в многокритериальной постановке с применением разработанного детерминированного метода позволяет в каждом конкретном случае объективно найти лучшее практическое решение. В результате проведённого анализа из четырёх вариантов подтверждена возможность использования предложенного алгоритма решения многокритериальной задачи для выбора оптимального маршрута.

Разработанный теоретический подход позволяет: объективно выделить лучшее предложение из возможных; повысить качество полученного результата не только по цифровым значениям принятых критериев, но и в результате учёта их значимости; уточнить промежуточные данные путём использования линейного и нелинейного интерполирования; рассмотреть возможные финансовые, временные и иные риски; ставить и решать задачи с учётом гипотетических путей перевозок жидкого топлива и сравнивать полученные результаты с существующими схемами.

*Ключевые слова:* транспорт, логистика, мультимодальные перевозки, объективный метод, доставка нефтегрузов, вариации путей, рациональный маршрут транспортировки.

\*Информация об авторах:

**Гогричани Георгий Венедиктович** – доктор технических наук, профессор, руководитель консультационного Центра АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия, [press@vniizht.ru](mailto:press@vniizht.ru).

**Ляшенко Антон Николаевич** – ведущий консультант Департамента Азии, Африки и Латинской Америки Минэкономразвития России, Москва, Россия, [an-lyashenko@yandex.ru](mailto:an-lyashenko@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 27.12.2018, принята к публикации 05.06.2019.

For the English text of the article please see p. 142.



**В** процессе роста мировой торговли нефтью в связи с появлением новых поставщиков и потребителей, возникновением новых коммерческих связей расширяется число маршрутов от пунктов нефтепереработки и погрузки к конечным потребителям.

В работах [1–4] по транспортно-экспедиторскому обеспечению поставок нефтегрузов как на экспорт, так и на внутренний рынок, отражена приоритетная направленность на инновации в транспортной инфраструктуре, совершенствование управления, обеспечение доступности транспортных услуг. Одновременно с вышеперечисленными трудами нужно отметить зарубежные работы в нефтесегменте, в том числе в области учёта рисков, логистики нефтяных маршрутов [5–9].

В результате сложились объективные предпосылки формирования единого подхода для определения в мультимодальных перевозках оптимальных решений не только по стоимостным и временным факторам, что само по себе очень важно, но и с учётом других показателей, в том числе возможных рисков.

Во многих случаях требуется предусматривать сложную логистическую цепь поставки с использованием нескольких видов транспорта. Так, практическими мультимодальными полигонами, на примере стран Ближнего Востока, можно считать Сирийскую Арабскую Республику, Государство Палестина.

В этих условиях большое значение приобретает поиск надёжного метода расчёта оптимального маршрута, учитывающего ряд критериев, в том числе времени и стоимости.

Ранее авторами был разработан алгоритм решения подобной многокритериальной задачи [10–14].

В исследовании, описываемом в настоящей статье, алгоритм был применён в целях его апробации к решению задачи практического выбора маршрута при организации поставок с использованием нескольких видов транспорта и многовариантного маршрута. Работа посвящена решению многокритериальной задачи по выбору рационального пути гипотетической доставки топлива в соответствии с логистическими цепями от нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) Афипиский (близ порта Новороссийск)



Рис. 1. План возможных маршрутов.

в Государство Палестина. При рассмотрении указанного направления поставки нефти и нефтепродуктов в Палестину могут осуществляться четырьмя возможными маршрутами с участием нескольких видов транспорта. Отметим, что в настоящее время Государство Палестина занимает верхние места по ценовой политике в продаже энергоресурсов, в частности бензина, который по своей стоимости превышает цены на территории Российской Федерации примерно в три раза.

Рассматриваются следующие планируемые маршруты транспортировки топлива из Российской Федерации на территорию Государства Палестина (рис. 1):

1. Перевозка топлива морским транспортом в порт Тартус и далее автотранспортом через территорию Сирийской Арабской Республики.
2. Маршрут по морю до порта Акаба и далее через Иорданию автомобильным транспортом.
3. Доставка нефти по морю в порт Хайфа и затем по территории Израиля автотранспортом.
4. Доставка нефти по морю в порт Александрия (Египет), далее автотранспортом.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе по разработанному алгоритму [10; 12] представлено решение многокритериальной задачи по определе-



нию рационального маршрута доставки топлива массой  $M_T = 3\,000$  тонн по одному из рассматриваемых четырёх транспортных путей. На рис. 1 показан логистический полигон, включающий территорию от НПЗ Афипский близ порта Новороссийск до пункта назначения — Государства Палестина.

Каждый из путей  $S_1, \dots, S_4$  (вариантов перевозки) состоит из участков:

$S_1$  — ж.д., терминал  $T_1$ , море,  $T_2$ , авт.д.;

$S_2$  — ж.д., терминал  $T_1$ , море,  $T_3$ , авт.д.;

$S_3$  — ж.д., терминал  $T_1$ , море,  $T_4$ , авт.д.;

$S_4$  — ж.д., терминал  $T_1$ , море,  $T_5$ , авт.д.

Длины участков путей  $S_1, \dots, S_4$  следующие:

$S_1$  — ж.д. = 130 км, море = 3 241 км, авт.д. = 605 км;

$S_2$  — ж.д. = 130 км, море = 2 622 км, авт.д. = 333 км;

$S_3$  — ж.д. = 130 км, море = 3 294 км, авт.д. = 147 км;

$S_4$  — ж.д. = 130 км, море = 3 051 км, авт.д. = 989 км;

В качестве рассматриваемых критериев перевозки топлива приняты:

$k_1$  — стоимость перевозки топлива конкретным видом транспорта, руб.;

$k_2$  — чистое время перевозки топлива конкретным видом транспорта, час;

$k_3$  — стоимость перевалки топлива в терминалах с учётом видов транспорта, руб.;

$k_4$  — время перевалки топлива между видами транспорта, в терминалы и обратно час;

$k_5$  — риск при перевозке топлива конкретным видом транспорта, балл;

$k_6$  — риск при перевалке топлива, балл;

$k_7$  — время нахождения тонны топлива в терминале, сут.;

$k_8$  — стоимость нахождения тонны топлива в терминале, руб.;

$k_9$  — риск по доставке топлива в договорное время, балл.

Решение задачи распространяется на широкую номенклатуру жидкого топлива, в которую входят сырая нефть, мазут, дизельное топливо, бензин. Стоимость логистических услуг в зависимости от вида топлива варьируется в пределах 5–10 % и тем самым практически эквивалентна, что даёт возможность сделать обобщённый вывод по определению эффективного маршрута транспортировки жидкого топлива от места отправ-

ления до места назначения в отношении всей рассматриваемой номенклатуры грузов. Для решения принимаются усреднённые входные данные, так как применяемый подход в данном случае нацелен на эффективный выбор маршрута заказчиком груза или экспедиторскими компаниями. Ставки и информационные данные взяты из коммерческой транспортной среды и могут варьироваться в зависимости от политики компании, внешнеполитической среды, экономических факторов, торгово-экономических отношений с государствами, чьи территории включены в цепь поставок.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения задачи приняты следующие числовые значения для расчёта критериев.

Стоимость перевозки 1 тонны жидкого топлива (критерий  $k_1$ ) на 1 км:

- по железной дороге: 11,3 руб. (на территории России с Афипского НПЗ);

- по автомобильной дороге: для варианта  $S_1$  — 56 руб.,  $S_2$  — 42 руб.,  $S_3$  — 76 руб.,  $S_4$  — 49 руб.;

- морским транспортом: для варианта  $S_1$  — 21 руб.,  $S_2$  — 19 руб.,  $S_3$  — 26 руб.,  $S_4$  — 17 руб.

При определении стоимости доставки топлива по автомобильной дороге принято, что в процессе перевозки по направлениям  $S_1$ – $S_4$  задействовано 50 автоцистерн грузоподъёмностью 30 тонн топлива каждая. Из условия заданной массы перевозки 3 000 тонн определяется необходимое количество автомашин при одной ходке для перевозки топлива ( $3\,000/30 = 100$ ). По полученному результату определяется необходимое количество рейсов для 50 автомашин. Из практических соображений назначаются 50 автоцистерн по 2 кругорейса. Из полученного результата определяется стоимость перевозки заданной массы топлива автотранспортом, учитывающая порожний пробег автоцистерны (табл. 1).

Для расчёта числового значения критерия  $k_2$  скорость движения по железной дороге задаётся 60 км/час, по автомобильной — 50 км/час, по морю — 30 км/час. При этом учитывается необходимость осуществления принятых авторейсов от пункта отправления до пункта прибытия и обратно. По заданной скорости транспорта по

автодороге (50 км/час) определяется необходимое время для перевозки всей массы топлива  $S_1 = (605 \text{ км} \cdot 3) / 50 \text{ км} = 36,3$  часа;  $S_2 = 19,98$  часов;  $S_3 = 8,82$  часов;  $S_4 = 59,34$  часов.

Принимается, что стоимость перевалки топлива (критерий  $k_3$ ) в терминале  $T_1$  составит 190 руб. в ходе каждого процесса за одну тонну. Одновременно происходят два процесса — поступление жидкого топлива в терминал и загрузка нефтегруза в танкер. Аналогичные процессы происходят по каждому терминалу с вариацией видов транспорта. Стоимость перевалки топлива в терминалы и из них (суммарно два процесса) составляет для терминала  $T_2$  — 220 руб. за тонну, для терминала  $T_3$  — 340 руб., для терминала  $T_4$  — 420 руб. за тонну, для терминала  $T_5$  — 380 руб. за тонну.

Время перевалки топлива (критерий  $k_4$ ) из железнодорожных цистерн в терминал для принятой массы топлива  $M_T = 3000$  тонн составит 2 часа, из терминала в танкер — 5 часов.

По направлению Сирии перевалка с морского транспорта в нефтяной резервуар — 7 часов, из нефтяного резервуара на автомобильный транспорт — 5 часов.

По направлениям Иордания, Израиль, Египет время перевалки с морского транспорта в терминал принимается за 3 часа, из терминала на автомобильный транспорт — 3 часа. При этом время нахождения топлива в терминале  $T_1$  — 2 суток,  $T_2$  — 4 суток,  $T_3$  — 2 суток,  $T_4$  — 3 суток,  $T_5$  — 5 суток.

Цифровое значение критерия  $k_5$  (риск при перевозке) рассчитывается с учётом балла  $k_s^{(i)}$  в отношении конкретного вида транспорта, массы  $M_T$  топлива (3000 тонн) и расстояния  $l$  перевозки:

$$D_{k_5} = \frac{k_s^{(i)}}{M_T l}. \quad (1)$$

В соответствии с алгоритмом решения принимается, что чем выше степень риска (в пределах от 0 до 1), тем ниже его цифровое значение  $k_s^{(i)}$ . Приняты следующие значения  $k_s^{(i)}$ :

а) морской транспорт  $k_{s(M)}^{(i)} = 0,96$ ;

б) железнодорожный транспорт  $k_{s(Ж)}^{(i)} = 0,9$ ;

в) автомобильный транспорт  $k_{s(A)}^{(i)} = 0,8$ .

Значение риска при перевалке топлива для вариантов  $S_1, \dots, S_4$  перевозки топлива рассчитывается по выражению:

$$D_{k_6} = \frac{k_6^{(2)}}{M_T}. \quad (2)$$

При этом  $k_6$  принимается:

а) при перевалке с морского на автомобильный транспорт  $k_{6(MA)}^{(2)} = 0,9$ ;

б) при перевалке с железнодорожного транспорта в терминал  $k_{6(ЖТ)}^{(2)} = 0,88$ ;

в) при перевалке из терминала на морской транспорт  $k_{6(TM)}^{(2)} = 0,86$ ;

г) при перевалке с морского транспорта в терминал  $k_{6(MT)}^{(2)} = 0,86$ .

д) при перевалке из терминала на автомобильный транспорт  $k_{6(AT)}^{(2)} = 0,89$ .

Время нахождения топлива в терминале порта Новороссийск  $T_1$  (критерий  $k_7$ ) принимается за 2 суток, в терминале порта Тартус  $T_2$  — 4 суток, в терминале порта Акаба  $T_3$  — 2 суток, в терминале порта Хайфа  $T_4$  — 3 суток, в терминале порта Александрия  $T_5$  — 5 суток.

Стоимость содержания топлива в терминалах:  $T_1 = 120$  руб. в сутки (критерий  $k_8$ ),  $T_2 = 87$  руб.,  $T_3 = 110$  руб.,  $T_4 = 150$  руб.,  $T_5 = 130$  руб.

Риски по доставке топлива в конечные пункты рассчитываются по выражению:

$$D_{k_9} = [\sum l_{1...m} / k_{l...m}]^{-1}, \quad (3)$$

где  $l_{1...m}$  — длины составляющих участков путей по каждому рассматриваемому варианту доставки топлива. Здесь чем больше  $l$ , тем меньше цифровое значение и, тем самым, больше риск.

В соответствии с алгоритмом разработанного метода построена таблица 1, где помещены все цифровые значения  $D$  рассматриваемых критериев для вариантов перевозок  $S_1, \dots, S_4$  жидкого топлива.

В соответствии с алгоритмом применяемого метода по значениям таблицы 1 строится таблица 2 суммарных значений каждого числового значения критериев по каждому варианту  $S_1, \dots, S_4$ . Далее с использованием цифровой информации таблицы 2 определяются места  $M$  каждого варианта  $S$  по каждому критерию, что заносится в таблицу 3 (в квадратных скобках). При этом лучшему месту присваивается большая цифра (максимальное значение — 4).

В связи с тем, что рассматриваемые выше критерии не равноценны между собой по



Таблица 1

Значения критериев для вариантов  $S_1, \dots, S_4$

Числовые значения критериев	Варианты														
	$S_1$					$S_2$					$S_3$				
	ж.д.	$T_1$	море	$T_2$	авт.д.	ж.д.	$T_1$	море	$T_3$	авт.д.	ж.д.	$T_1$	море	$T_4$	авт.д.
$D_{k1}$	4407000	–	204183000	–	152460000	4407000	–	149454000	–	62937000	4407000	–	256932000	–	50274000
$D_{k2}$	2,2	–	108,03	–	36,3	2,2	–	87,4	–	19,98	2,2	–	109,8	–	8,82
$D_{k3}$	1140000					1140000					1140000				
$D_{k4}$	2 5 7 5					2 5 3 3					2 5 3 3				
$D_{k5}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$		$9,87 \cdot 10^{-8}$		$4,41 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$		$1,22 \cdot 10^{-7}$		$8,01 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$		$9,7 \cdot 10^{-8}$		$1,8 \cdot 10^{-6}$
$D_{k6}$			$2,9 \cdot 10^{-4}$					$2,9 \cdot 10^{-4}$					$2,9 \cdot 10^{-4}$		
			$2,8 \cdot 10^{-4}$					$2,8 \cdot 10^{-4}$					$2,8 \cdot 10^{-4}$		
			$2,8 \cdot 10^{-4}$					$2,8 \cdot 10^{-4}$					$2,8 \cdot 10^{-4}$		
			$2,9 \cdot 10^{-4}$					$2,9 \cdot 10^{-4}$					$2,9 \cdot 10^{-4}$		
$D_{k7}$	2		4			2		2			2		3		
$D_{k8}$	720000		1044000			720000		660000			720000		1350000		
$D_{k9}$	0,00023					0,00030					0,00027				

Таблица 2

Общие значения критериев для вариантов  $S_1, \dots, S_4$

Числовые обозначения коэффициентов значимости	Варианты			
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$D_{k1}$	361050000	216798000	311613000	378082500
$D_{k2}$	146,53	109,58	120,82	163,24
$D_{k3}$	1800000	2160000	2400000	2280000
$D_{k4}$	19	13	13	13
$D_{k5}$	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$	$4,22 \cdot 10^{-6}$	$2,68 \cdot 10^{-6}$
$D_{k6}$	0,00116	0,000116	0,000116	0,000116
$D_{k7}$	6	4	5	7
$D_{k8}$	1764000	1380000	2070000	2670000
$D_{k9}$	0,00023	0,00030	0,00027	0,00022

своей значимости, то вводится коэффициент значимости  $k_m$  этих критериев методом экспертных оценок (в пределах 0–1). При этом чем критерий значимее, тем соответствующий коэффициент  $k_m$  ближе к единице. В частном случае значения разных  $k_m$  могут совпадать.

Ниже даны коэффициенты значимости  $k_m$  всех критериев, с учётом которых определяются уточнённые значения  $M$  мест рассматриваемых вариантов, где  $M_i = M_i k_{mi}$ . В рассматриваемой задаче приняты следующие значения  $k_m$  для критериев:

Критерии									
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$
$k_m$	1	0,85	0,75	0,8	0,2	0,25	0,7	0,75	0,7

Таким образом, окончательные места  $M$  для каждого из вариантов  $S_1, \dots, S_4$  по каждому критерию определяются путём умножения значения  $M$  на коэффициент значимости соответствующего критерия.

Окончательные результаты  $m$  по выбору лучшего варианта доставки топлива по

комплексу критериев получаем путём сложения всех  $M$  отдельно по каждому варианту  $S$ , т.е.  $M_i = M_i(k_m)$ , где  $i_1, \dots, 9$ . Большее значение  $m$  соответствует лучшему варианту доставки топлива по принятым в задаче критериям.

Лучшим вариантом  $S$  перевозок является вариант  $S_2$ , т.к. соответствующее этому варианту  $m$  имеет максимальное значение.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом в результате решения многокритериальной задачи определён лучший по принятым критериям вариант перевозки жидкого топлива от НПЗ Афипский (Россия) в Палестину, состоящий из перевозки топлива по железной дороге до порта «Новороссийск» (для всех рассматриваемых вариантов), далее через два терминала морем до порта Акаба (Иордания), далее по автомобильной дороге до Государства Палестина. Рассчи-



Таблица 3

Уточнённые места  $M$  (в квадратных скобках) вариантов  $S_1, \dots, S_4$  с учётом коэффициентов значимости « $k_m$ » критериев

	Варианты			
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$M_{k1}$	$[2] \cdot 1 = 2$	$[4] \cdot 1 = 4$	$[3] \cdot 1 = 3$	$[1] \cdot 1 = 1$
$M_{k2}$	$[3] \cdot 0,85 = 2,55$	$[4] \cdot 0,85 = 3,4$	$[3] \cdot 0,85 = 2,55$	$[1] \cdot 0,85 = 0,85$
$M_{k3}$	$[4] \cdot 0,75 = 3$	$[3] \cdot 0,75 = 2,25$	$[1] \cdot 0,75 = 0,75$	$[2] \cdot 0,75 = 1,5$
$M_{k4}$	$[1] \cdot 0,8 = 0,8$	$[2] \cdot 0,8 = 1,6$	$[2] \cdot 0,8 = 1,6$	$[2] \cdot 0,8 = 1,6$
$M_{k5}$	$[2] \cdot 0,2 = 0,4$	$[3] \cdot 0,2 = 0,6$	$[4] \cdot 0,2 = 0,8$	$[1] \cdot 0,2 = 0,2$
$M_{k6}$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$
$M_{k7}$	$[2] \cdot 0,7 = 1,4$	$[4] \cdot 0,7 = 2,8$	$[3] \cdot 0,7 = 2,1$	$[1] \cdot 0,7 = 0,7$
$M_{k8}$	$[3] \cdot 0,75 = 2,25$	$[4] \cdot 0,75 = 3$	$[2] \cdot 0,75 = 1,5$	$[1] \cdot 0,75 = 0,75$
$M_{k9}$	$[2] \cdot 0,70 = 1,4$	$[4] \cdot 0,70 = 2,8$	$[3] \cdot 0,70 = 2,1$	$[1] \cdot 0,70 = 0,70$
$m$	14,05	20,70	14,65	7,55

танный вариант максимально удовлетворяет всем предъявленным требованиям (критериям).

Предложенный алгоритм может быть использован для схожих задач, связанных с проработкой маршрутов иных видов поставок и использованием нескольких видов транспорта и выбором из их числа оптимального на основе нескольких критериев с учётом коэффициентов значимости.

1. Разработанная теория позволяет эффективно выделить лучшее предложение из возможных в мультимодальных перевозках жидкого топлива при рассмотрении множества критериев, в том числе противоречивых.

2. Теория позволяет повысить качество полученного результата не только по цифровым значениям принятых критериев, но и в результате учёта значимости различных критериев между собой по влиянию их на рассматриваемый процесс.

3. Для повышения при необходимости качества получаемых результатов расчёта предусмотрена возможность уточнения промежуточных данных путём использования линейного и нелинейного интерполирования.

4. Процесс определения лучших схем мультимодальных перевозок жидкого топлива сопровождается рассмотрением возможных финансовых, временных и иных рисков путём учёта соответствующих критериев в расчёте.

5. Теория позволяет ставить и решать задачи с учётом гипотетических путей перевозок жидкого топлива и сравнивать полу-

ченные результаты с существующими схемами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Николашин В. М., Аникин Б. А. Логистика. — М.: Инфра-М, 1997. — 327 с.
2. Сергеев В. И. Менеджмент в Бизнес-Логистике. — М.: Информационно-издательский дом «Филин», 1997. — 772 с.
3. Щербанин Ю. А. Логистика в нефтегрузовой отрасли и международные потоки. — М.: «МГИМО», 2017. — 172 с.
4. Щербанин Ю. А. Транспортно-логистическое обеспечение перевозок углеводородного сырья и нефтегазотрейдинг. — М.: «МГИМО», 2017. — 440 с.
5. Aven T. Misconceptions of risk. — John Wiley and Sons, Inc., 2010. — 248 p.
6. Aven T. Risk Analysis. Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities. — John Wiley and Sons Inc., April 2008. — 204 p.
7. Aven T., Vinnem J. E. Risk Management: With applications from the offshore petroleum industry. — Springer, 2007. — 211 p.
8. Beaumont E. A., Forester N. H. Exploring for oil and gas trap. — The American Association of Petroleum Geologists, 1999. — pp. 1–100.
9. Shapiro J. F. Modeling the Supply Chain. Thomson Learning, 2001. — 586 p.
10. Гогричиани Г. В. Объективное определение по результатам сравнений (испытаний) перспективного объекта при неограниченном множестве рассматриваемых противоречивых критериев // Вестник ВНИИЖТ. — 2006. — № 6. — С. 14–15.
11. Гогричиани Г. В., Ляшенко А. Н. Рационализация перевозки жидкого топлива // Мир транспорта. — 2012. — № 3. — С. 130–135.
12. Гогричиани Г. В., Ляшенко А. Н. Выбор места расположения нефтяного терминала по комплексу противоречивых критериев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2017. — № 2. — С. 35–39.
13. Ляшенко А. Н. Выбор береговых терминалов для хранения жидкого топлива // Мир транспорта. — 2014. — № 3. — С. 84–91.
14. Ляшенко А. Н. Метод выбора рационального пути по комплексу критериев при перевозке жидкого топлива // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2014. — № 2. — С. 41–43. ●





# Strategic Development of Oil Shipments from Russia to Palestine



Georgy V. GOGRICHIANI



Anton N. LYASHENKO

*Gogrichiani, Georgy V., Railway Research Institute, Moscow, Russia.*

*Lyashenko, Anton N., Ministry of Economic Development of the Russian Federation, Moscow, Russia\*.*

## ABSTRACT

Recent decades have seen a significant expansion of world oil trade, which contributes to development of appropriate transport infrastructure, improvement and deepening of business ties in world energy markets and acceleration of their globalization. Russia plays an increasingly important role in export of oil and oil products, thereby seriously affecting physical volumes of foreign trade operations, prices, and the level of supply and demand. At the same time, interest in Russian oil is obviously taking into account the use of the existing or planned transport infrastructure. Despite the featured significant fluctuations in prices, which are caused by various factors of economic, geopolitical, and political nature, it is obvious that the general tendencies towards increase in oil prices remain against the background of the expected increase in demand for liquid fuel. This conclusion can be made on the basis of the costs of extracting energy resources, organizing the logistics component, of growing relevant political risks, according to competitive realities. In this regard, selection of an optimal transport route is of particular importance.

The objective of the study is to test the algorithm developed by the authors for solving the multicriteria

problem of choosing a rational route of fuel delivery within the framework of logistics chains from an oil refinery to a consumer. Testing is carried out at the example of development of hypothetical oil shipments from Russia to the State of Palestine. The use of the methods of economic analysis, multicriteria problem solving, expert assessments, representation of tasks in a multi-criteria setting using the developed deterministic method allows in each case to objectively find the best practical solution. The results of the analysis based on a sample of four options, have confirmed the possibility of using the proposed algorithm for solving the multicriteria problem to select the optimal route.

The developed theory allows to objectively select the best proposal among possible variants; to improve the quality of the result obtained not only by the digital values of the accepted criteria, but also by taking into account the significance of different criteria among themselves by their influence on the process under consideration; to refine the intermediate data by using linear and nonlinear interpolation; to consider possible financial, time and other risks; to pose and solve problems taking into account hypothetical ways of transporting liquid fuel and compare the results with existing schemes.

**Keywords:** transportation, logistics, multimodal transportation, objective method, oil cargo delivery, track variations, rational transportation route.

\*Information about the authors:

**Gogrichiani, Georgy V.** – D.Sc. (Eng), professor, head of the consulting center of Railway Research Institute (JSC VNIIZHT), Moscow, Russia, [press@vniizht.ru](mailto:press@vniizht.ru).

**Lyashenko, Anton N.** – leading consultant of the Department of Asia, Africa and Latin America of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation, Moscow, Russia, [an-lyashenko@yandex.ru](mailto:an-lyashenko@yandex.ru).

Article received 27.12.2018, accepted 05.06.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 136.



**Pic. 1. Scheme of possible routes.**

**Background.** In the process of growth in world oil trade following emergence of new suppliers and consumers, emergence of new commercial ties, the number of routes from oil refining and loading points to final consumers is expanding.

The works [1–4] on freight forwarding of oil deliveries both to export and to the domestic market, are focused on innovations in transport infrastructure, improving management, and ensuring the availability of transport services. Simultaneously with the above-mentioned works, it is worth noting works of researchers of many countries in oil segment, referring to accounting, logistics of oil routes [5–9].

As a result, objective prerequisites were met to develop a single approach to find optimal solutions in multimodal transportation not only through cost and time factors, which is very important in itself, but also taking into account other indicators, including possible risks.

In many cases, a complex supply chain using several modes of transport is required. Amidst the Middle East countries we can quote the Syrian Arab Republic and the State of Palestine as being examples of fields of multimode transportation practices.

Under these conditions, search for a reliable method for calculating the optimal route, taking into account a number of criteria, including time and cost, is of great importance.

Previously, the authors developed an algorithm for solving such a multicriteria problem [10–14].

In the study described in this article, the algorithm was applied in order to test it to solve the problem of practical route selection when organizing deliveries using several modes of transport and having several route options. The work is devoted to solving the multicriteria problem of choosing a rational way for a hypothetical fuel delivery within the logistic chains from Afipsky oil refinery (near the port of Novorossiysk) to the State of Palestine. When considering this itinerary of supply of oil and oil products to Palestine, there are four possible routes involving several modes of transport. It should be noted that currently the State of Palestine occupies the top places in the pricing policy in trade of energy resources, in particular gasoline, and its value exceeds the price in the Russian Federation by three times.

The following planned routes for transporting fuel from the Russian Federation to the territory of the State of Palestine are considered (Pic. 1):

1. Transportation of fuel by sea to the port of Tartus and further by road through the territory of the Syrian Arab Republic;
2. The route by sea to the port of Aqaba and further through Jordan by road;
3. Oil delivery by sea to the port of Haifa and then through Israel by road;
4. Oil delivery by sea to the port of Alexandria, then by road.

**Objective.** The objective of the research was to test the algorithm developed by the authors for solving the multicriteria problem of



choosing a rational route of fuel delivery within the framework of logistics chains from an oil refinery to a consumer.

**Methods.** The authors use general scientific methods, economic analysis, multicriteria problem solving, expert assessments, representation of tasks in a multicriteria setting using the developed deterministic method.

### Results.

#### Formulation of the problem

In the present work, according to the developed algorithm [10; 12], a solution of the multicriteria problem for determining the rational route for delivery of fuel with a mass of  $M_f = 3000$  tons along one of four transport routes under consideration is presented. Pic. 1 shows a logistics range that includes the territory from Afipsky oil refinery near the port of Novorossiysk to the destination point in the State of Palestine.

Each of routes  $S_1, \dots, S_4$  (transportation options) consists of sections:

$S_1$  – railway, terminal  $T_1$ , sea,  $T_2$ , road;

$S_2$  – railway, terminal  $T_1$ , sea,  $T_3$ , road;

$S_3$  – railway, terminal  $T_1$ , sea,  $T_4$ , road;

$S_4$  – railway, terminal  $T_1$ , sea,  $T_5$ , road.

The length of track sections  $S_1, \dots, S_4$  are as follows:

$S_1$  – railway = 130 km, sea = 3241 km, road = 605 km;

$S_2$  – railway = 130 km, sea = 2622 km, road = 333 km;

$S_3$  – railway = 130 km, sea = 3294 km, road = 147 km;

$S_4$  – railway = 130 km, sea = 3051 km, road = 989 km;

The following criteria have been adopted for transportation of fuel:

$k_1$  – cost of fuel transportation by a specific mode of transport, rubles;

$k_2$  – net fuel transportation time by a specific mode of transport, hour;

$k_3$  – cost of transshipment of fuel in the terminals, taking into account the types of transport, rubles;

$k_4$  – time of transshipment of fuel between modes of transport, to the terminals and back hour;

$k_5$  – risk during transportation of fuel by a specific mode of transport, point;

$k_6$  – risk during fuel transshipment, point;

$k_7$  – time of stay of a ton of fuel in the terminal, days;

$k_8$  – cost of stay of a ton of fuel in the terminal, rubles;

$k_9$  – risk of fuel delivery at the agreed time, point.

The solution to the problem extends to a wide range of liquid fuels, which include crude oil, fuel oil, diesel fuel, gasoline. The cost of logistics services, depending on the type of fuel, varies between 5–10 % and is therefore almost equivalent, which makes it possible to draw a generalized conclusion on determining the effective route for transporting liquid fuel from the place of departure to the destination with respect to the entire cargo range under consideration. For a decision, averaged input data is accepted, since the applied approach in this case is aimed at effective choice of a route by a customer of cargo or forwarding companies. Rates and informational data were compiled from the commercial transport environment and may vary depending on a company's policy, foreign policy environment, economic factors, trade and economic relations with the states whose territories are included in the supply chain.

#### The solution of the problem

To solve the problem, the following numerical values for calculating the criteria are adopted.

Cost of transportation of 1 ton of liquid fuel (criterion  $k_1$ ) per 1 km:

- along a railway: 11,3 rubles (on the territory of Russia from Afipsky oil refinery);

- along a road: for option  $S_1$  – 56 rubles,  $S_2$  – 42 rubles,  $S_3$  – 76 rubles,  $S_4$  – 49 rubles;

- by sea transport: for option  $S_1$  – 21 rubles,  $S_2$  – 19 rubles,  $S_3$  – 26 rubles,  $S_4$  – 17 rubles.

When determining cost of delivering fuel by road, it was assumed that 50 tank trucks with a capacity of 30 tons of fuel each were involved in the transportation process in directions  $S_1$ – $S_4$ . From the condition of a given mass of transportation of 3000 tons, the required number of cars is determined with one go for transportation of fuel ( $3000/30 = 100$ ). Based on the result, the required number of trips for 50 cars is determined. For practical reasons, 50 trucks making each 2 round trips are considered. From the result obtained, the cost of transporting a given mass of fuel by road is determined, taking into account the empty mileage of the tank truck (Table 1).

To calculate the numerical value of the criterion  $k_2$ , speed of movement by railway is set to 60 km/h, by road – 50 km/h, by sea – 30 km/h. This takes into account the need for



implementation of accepted road trips from the point of departure to the point of arrival and back. Given the speed of transport on the road (50 km/h), the necessary time is determined for transportation of the entire mass of fuel  $S_1 = (605 \text{ km} \cdot 3) / 50 \text{ km} = 36,3$  hours;  $S_2 = 19,98$  hours;  $S_3 = 8,82$  hours;  $S_4 = 59,34$  hours.

It is assumed that the cost of transshipment of fuel (criterion  $k_3$ ) in terminal  $T_1$  will be 190 rubles during each process per one ton. At the same time, two processes are taking place – liquid fuel entering the terminal and oil cargo being pumped into the tanker. Similar processes occur at each terminal with a variation in modes of transport. The cost of transshipment of fuel to and from the terminals (two processes in total) is 220 rubles for the terminal  $T_2$  per ton, for the terminal  $T_3$  – 340 rubles, for the terminal  $T_4$  – 420 rubles per ton, for the terminal  $T_5$  – 380 rubles per ton.

Time of fuel transshipment (criterion  $k_4$ ) from railway tanks to the terminal for the accepted mass of fuel  $M_f = 3000$  tons will be 2 hours, from the terminal to the tanker – 5 hours, then:

If a destination is in Syria, transshipment from sea transport to the oil tank is 7 hours, from the oil tank to road transport it is of 5 hours.

If destination points are in Jordan, Israel, Egypt, time of transshipment from sea transport to the terminal is 3 hours, from the terminal to road transport – 3 hours. At the same time, fuel stay in the terminal  $T_1$  – 2 days,  $T_2$  – 4 days,  $T_3$  – 2 days,  $T_4$  – 3 days,  $T_5$  – 5 days.

The numerical value of the criterion  $k_5$  (risk during transportation) is calculated taking into account the score  $k_s^{(i)}$  for a particular type of transport, fuel mass  $M_f$  (3 000 tons) and distance  $l$  of transportation:

$$D_{k_5} = \frac{k_s^{(i)}}{M_f l}, \quad (1)$$

In accordance with the considered suggested algorithm, it is accepted that the higher is the degree of risk (ranging from 0 to 1), the lower is its digital value. The following values of  $k_s^{(i)}$  are accepted:

- a) sea transport  $k_{s(S)}^{(i)} = 0,96$ ;
- b) railway transport  $k_{s(R)}^{(i)} = 0,9$ ;
- c) road transport  $k_{s(Ro)}^{(i)} = 0,8$ .

The value of risk during transshipment of fuel for options  $S_1, \dots, S_4$  of fuel transportation is calculated by the expression:

$$D_{k_6} = \frac{k_6^{(2)}}{M_f}, \quad (2)$$

In this case  $k_6$  is accepted:

a) during transshipment from sea to road transport  $k_{6(SRo)}^{(2)} = 0,9$ ;

b) during transshipment from railway transport to the terminal  $k_{6(RT)}^{(2)} = 0,88$ ;

c) during transshipment from the terminal to sea transport  $k_{6(TS)}^{(2)} = 0,86$ ;

d) during transshipment from sea transport to the terminal  $k_{6(ST)}^{(2)} = 0,86$ .

e) during transshipment from the terminal to road transport  $k_{6(TRo)}^{(2)} = 0,89$ .

Time of stay of fuel in the terminal of the port of Novorossiysk  $T_1$  (criterion  $k_7$ ) is 2 days, in the terminal of the port of Tartus  $T_2$  – 4 days, in the terminal of the port of Aqaba  $T_3$  – 2 days, in the terminal of the port of Haifa  $T_4$  – 3 days, in the terminal of the port of Alexandria  $T_5$  – 5 days.

The cost of maintaining fuel in the terminals:  $T_1 = 120$  rubles per day (criterion  $k_8$ ),  $T_2 = 87$  rubles,  $T_3 = 110$  rubles,  $T_4 = 150$  rubles,  $T_5 = 130$  rubles.

Risks associated with the delivery of fuel to final points are calculated by the expression:

$$D_{k_9} = [ \sum l_{1...m} / k_{l...m} ]^{-1}, \quad (3)$$

where  $l_{1...m}$  – lengths of the pathways for each considered option of fuel delivery. Here, the larger is  $l$ , the smaller is the digital value and therefore the greater is the risk.

In accordance with the algorithm of the developed method, Table 1 is constructed, where all the digital values  $D$  of the considered criteria are located for transportation options  $S_1, \dots, S_4$  of liquid fuel.

In accordance with the algorithm of the applied method the values of Table 1 are used to construct Table 2 of total values of each numerical value of the criteria for each option  $S_1, \dots, S_4$ . Further, using the digital information in Table 2, the places  $M$  of each option  $S$  are determined for each criterion, those values are put in Table 3 (in square brackets). In this case, the best place is assigned to a larger number (maximum value – 4).

Due to the fact that the criteria considered above are not equivalent to each other in their significance, a coefficient of significance  $k_m$  of those criteria is introduced by the method of expert estimates (within 0–1 range). Moreover, the more



Table 1

Values of D criteria for options S<sub>1</sub>, ..., S<sub>4</sub>

Numerical values of criteria	Options																							
	S <sub>1</sub>					S <sub>2</sub>					S <sub>3</sub>					S <sub>4</sub>								
	rail- way	T <sub>1</sub>	sea	T <sub>2</sub>	road	rail- way	T <sub>1</sub>	sea	T <sub>3</sub>	road	rail- way	T <sub>1</sub>	sea	T <sub>4</sub>	road	rail- way	T <sub>1</sub>	sea	T <sub>5</sub>	road				
D <sub>k1</sub>	4407000	–	204183000	–	152460000	4407000	–	149454000	–	62937000	4407000	–	256932000	–	50274000	4407000	–	155601000	–	218074500				
D <sub>k2</sub>	2,2	–	108,03	–	36,3	2,2	–	87,4	–	19,98	2,2	–	109,8	–	8,82	2,2	–	101,7	–	59,34				
D <sub>k3</sub>	1140000 660000					1140000 1020000					1140000 1260000					1140000 1140000								
D <sub>k4</sub>	2 5 7 5					2 5 3 3					2 5 3 3					2 5 3 3								
D <sub>k5</sub>	2,3•10 <sup>-6</sup>		9,87•10 <sup>-8</sup>		4,41•10 <sup>-7</sup>		2,3•10 <sup>-6</sup>		1,22•10 <sup>-7</sup>		8,01•10 <sup>-7</sup>		2,3•10 <sup>-6</sup>		9,7•10 <sup>-8</sup>		1,8•10 <sup>-6</sup>		2,3•10 <sup>-6</sup>		1,05•10 <sup>-7</sup>		2,7•10 <sup>-7</sup>	
D <sub>k6</sub>	2,9•10 <sup>-4</sup>					2,9•10 <sup>-4</sup>					2,9•10 <sup>-4</sup>					2,9•10 <sup>-4</sup>								
	2,8•10 <sup>-4</sup>					2,8•10 <sup>-4</sup>					2,8•10 <sup>-4</sup>					2,8•10 <sup>-4</sup>								
	2,8•10 <sup>-4</sup>					2,8•10 <sup>-4</sup>					2,8•10 <sup>-4</sup>					2,8•10 <sup>-4</sup>								
	2,9•10 <sup>-4</sup>					2,9•10 <sup>-4</sup>					2,9•10 <sup>-4</sup>					2,9•10 <sup>-4</sup>								
D <sub>k7</sub>	2		4			2		2			2		3			2		5						
D <sub>k8</sub>	720000		1044000			720000		660000			720000		1350000			720000		1950000						
D <sub>k9</sub>	0,00023					0,00030					0,00027					0,00022								

Table 2

Total values D of criteria for options S<sub>1</sub>, ..., S<sub>4</sub>

Numerical designations of significance coefficients	Options			
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
D <sub>k1</sub>	361050000	216798000	311613000	378082500
D <sub>k2</sub>	146,53	109,58	120,82	163,24
D <sub>k3</sub>	1800000	2160000	2400000	2280000
D <sub>k4</sub>	19	13	13	13
D <sub>k5</sub>	2,85 • 10 <sup>-6</sup>	3,23 • 10 <sup>-6</sup>	4,22 • 10 <sup>-6</sup>	2,68 • 10 <sup>-6</sup>
D <sub>k6</sub>	0,00116	0,000116	0,000116	0,000116
D <sub>k7</sub>	6	4	5	7
D <sub>k8</sub>	1764000	1380000	2070000	2670000
D <sub>k9</sub>	0,00023	0,00030	0,00027	0,00022

significant is the criterion, the corresponding coefficient  $k_m$  is closer to unity. In the particular case, the values of different  $k_m$  may coincide.

The significance coefficients  $k_m$  of all criteria are given below, they are taken into account to specify more exact values of M places of the considered options, where  $M_i = M_i \cdot k_{mi}$ . In the considered problem, the following  $k_m$  values are accepted for the criteria:

Criteria									
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>
k <sub>m</sub>	1	0,85	0,75	0,8	0,2	0,25	0,7	0,75	0,7

Thus, the final places M for each of the options S<sub>1</sub>, ..., S<sub>4</sub> following each criterion are determined by multiplying the value of M by the coefficient of significance of the corresponding criterion.

The final results m for choosing the best option for fuel delivery according to a set of criteria are obtained by adding all M separately for each option S, i.e.  $M_i = M_i(k_m)_i$ , where  $i_{1,...,9}$ . A larger value of m corresponds to the best option for fuel delivery according to the criteria adopted in the task.

The best option for S transportation is option S<sub>2</sub>, as m corresponding to this option has a maximum value.

**Conclusion.** Thus, as a result of solving the multicriteria problem, the best option for transporting liquid fuel from Afipsky oil refinery (Russia) to Palestine was determined according to accepted criteria, consisting of transporting fuel by rail to the port of Novorossiysk (for all options considered), then through two terminals by sea to the port of Aqaba (Jordan), then by road to the State

Table 3

Clarified places  $M$  (in square brackets) of options  $S_1, \dots, S_4$  taking into account significance coefficients « $k_m$ » of criteria

	Options			
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$M_{k1}$	$[2] \cdot 1 = 2$	$[4] \cdot 1 = 4$	$[3] \cdot 1 = 3$	$[1] \cdot 1 = 1$
$M_{k2}$	$[3] \cdot 0,85 = 2,55$	$[4] \cdot 0,85 = 3,4$	$[3] \cdot 0,85 = 2,55$	$[1] \cdot 0,85 = 0,85$
$M_{k3}$	$[4] \cdot 0,75 = 3$	$[3] \cdot 0,75 = 2,25$	$[1] \cdot 0,75 = 0,75$	$[2] \cdot 0,75 = 1,5$
$M_{k4}$	$[1] \cdot 0,8 = 0,8$	$[2] \cdot 0,8 = 1,6$	$[2] \cdot 0,8 = 1,6$	$[2] \cdot 0,8 = 1,6$
$M_{k5}$	$[2] \cdot 0,2 = 0,4$	$[3] \cdot 0,2 = 0,6$	$[4] \cdot 0,2 = 0,8$	$[1] \cdot 0,2 = 0,2$
$M_{k6}$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$	$[1] \cdot 0,25 = 0,25$
$M_{k7}$	$[2] \cdot 0,7 = 1,4$	$[4] \cdot 0,7 = 2,8$	$[3] \cdot 0,7 = 2,1$	$[1] \cdot 0,7 = 0,7$
$M_{k8}$	$[3] \cdot 0,75 = 2,25$	$[4] \cdot 0,75 = 3$	$[2] \cdot 0,75 = 1,5$	$[1] \cdot 0,75 = 0,75$
$M_{k9}$	$[2] \cdot 0,70 = 1,4$	$[4] \cdot 0,70 = 2,8$	$[3] \cdot 0,70 = 2,1$	$[1] \cdot 0,70 = 0,70$
$m$	14,05	20,70	14,65	7,55

of Palestine. The calculated option maximally satisfies all the requirements (criteria).

The proposed algorithm can be used for similar tasks related to elaboration of routes of other types of deliveries and to the use of several modes of transport and choice of the optimal one based on several criteria, taking into account significance coefficients.

1. The developed theory allows to objectively increase the best option possible in multimodal transportation of liquid fuel when considering many criteria, including contradictory ones.

2. The theory makes it possible to improve the quality of the result obtained not only by the digital values of the accepted criteria, but also by taking into account the significance of different criteria among themselves by their influence on the process under consideration.

3. To improve, if necessary, the quality of the obtained calculation results, it is possible to refine the intermediate data by using linear and nonlinear interpolation.

4. The process of determining the best schemes for multimodal transportation of liquid fuel is accompanied by consideration of possible financial, temporary and other risks by taking into account the relevant criteria in the calculation.

5. The theory allows to pose and solve problems taking into account hypothetical ways of transporting liquid fuel and compare the results with existing schemes.

REFERENCES

1. Nikolashin, V. M., Anikin, B. A. Logistics [Logistika]. Moscow, Infra-M publ., 1997, 327 p.

2. Sergeev, V. I. Management in business logistics [Menedzhment v Biznes-Logistike]. Moscow, Information and publishing house «Filin», 1997, 772 p.

3. Shcherbanin, Yu. A. Logistics in the oil industry and international flows [Logistika v neftegruzovoi otrasli i mezhdunarodnie potoki]. Moscow, MGIMO publ., 2017, 172 p.

4. Shcherbanin, Yu. A. Transport and logistics support for transportation of hydrocarbons and oil and gas trading [Transportno-logisticheskoe obespechenie perevozok uglevodorodnogo syriya i neftegazotzeidng]. Moscow, MGIMO publ., 2017, 440 p.

5. Aven, T. Misconceptions of risk. John Wiley and Sons, Inc., 2010, 248 p.

6. Aven, T. Risk Analysis. Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities. John Wiley and Sons Inc., April 2008, 204 p.

7. Aven, T., Vinnem, J. E. Risk Management: With applications from the offshore petroleum industry. Springer, 2007, 211 p.

8. Beaumont, E. A., Forester, N. H. Exploring Exploring for oil and gas trap. The American Association of Petroleum Geologists, 1999, pp. 1–100.

9. Shapiro, J. F. Modeling the Supply Chain. Thomson Learning, 2001, 586 p.

10. Gogriciani, G. V. Objective determination by the results of comparisons (tests) of a promising object with an unlimited number of conflicting criteria considered [Ob'ektivnoe opredelenie po rezul'tatam sravnenii (ispytanii) perspektivnogo ob'ekta pri neogranichenom mnozhestve rassmatrivaemykh protivorechivyykh kriteriev]. Vestnik VNIIZhT, 2006, No. 6, pp. 14–15.

11. Gogriciani, G. V., Lyashenko, A. N. Rationalization of liquid fuel traffic. World of Transport and Transportation, Vol. 10, 2012, Iss. 3, pp. 130–135.

12. Gogriciani, G. V., Lyashenko, A. N. The choice of location of the oil terminal by a set of conflicting criteria [Vybor mesta raspolozheniya neftyanogo terminala po kompleksu protivorechivyykh kriteriev]. Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syriya, 2017, Iss. 2, pp. 35–39.

13. Lyashenko, A. N. Selection of coastal terminals for storage of liquid fuel. World of Transport and Transportation, Vol. 12, 2014, Iss. 3, pp. 84–91.

14. Lyashenko, A. N. The method of choosing a rational path according to a set of criteria for transportation of liquid fuel [Metod vybora ratsionalnogo puti po kompleksu kriteriev pri perevozke zhidkogo topliva]. Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syriya, 2014, Iss. 2, pp. 41–43.





## Формирование единого и внешне интегрированного транспортного пространства в Центральной Азии



Умидилла ИБРАГИМОВ

Махмуджон ТОХИРОВ

Грамотно выстроенная стратегия формирования и развития международных транспортных коридоров, проходящих через страны Центральной Азии, обеспечивает экономическое развитие не только расположенных в этом регионе государств, но и других стран-участниц перевозок.

Вместе с тем, в практике формирования международных транспортных коридоров существует ряд проблем: несоответствие нормативно-правовых актов участвующих сторон, различия технических стандартов, неунифицированность железнодорожной колеи, длительность таможенного оформления.

Цель работы заключалась в исследовании транспортных коридоров Центральной, Западной и Южной Азии и существующих для их развития инфраструктурных, организационных и технологических ограничений. Использовались методы экономического, статистического, инженерного анализа.

**Ключевые слова:** транспорт, транспортные коридоры, железнодорожные коридоры, Узбекистан, строительство железных дорог, конкурентоспособное направление, интермодальные перевозки, удельный тариф, стоимость перевозки, контейнер, раздвижные колёсные пары.

\*Информация об авторах:

**Ибрагимов Умидилла Назриллаевич** – кандидат технических наук, начальник управления обеспечения информационной безопасности и информационного развития АО «Узбекистон темир йуллари», Ташкент, Узбекистан, [almaz-umid@mail.ru](mailto:almaz-umid@mail.ru).

**Тохилов Махмуджон Муроджон угли** – студент Российского университета транспорта, Москва, Россия / Ташкент, Узбекистан, [mahmudjon.tohirov.99@mail.ru](mailto:mahmudjon.tohirov.99@mail.ru).

*Ибрагимов Умидилла Назриллаевич – АО «Узбекистон темир йуллари», Ташкент, Узбекистан.  
Тохилов Махмуджон Муроджон угли – Российский университет транспорта, Москва, Россия / Ташкент, Узбекистан\*.*

Рассмотрены проблемы в формировании международных транспортных коридоров и их решение с помощью организации перевозок единым оператором Узбекистана.

Изучено современное состояние транспортных коридоров, связывающих Центральную, Западную, Южную Азию и Китай со странами Евросоюза, в том числе, вопросы формирования железнодорожных коридоров Китай–Евросоюз. В этом контексте анализируется ряд правовых, организационных, технологических факторов, а также инфраструктурных ограничений на примере железнодорожной линии на участке Кашгар (Китай)–Ош (Кыргызстан), до строительства которой предлагается использовать на этом участке перевозки другими видами транспорта.

Также выдвинуты идеи создания транспортно-логистической ассоциации ШОС и разработки конструкции универсальных вагонов с раздвижными колёсными парами, адаптированных к эксплуатации на железных дорогах различной колеи.

Статья поступила в редакцию 15.10.2018, актуализирована 19.08.2019, принята к публикации 30.08.2019.

For the English text of the article please see p. 158.



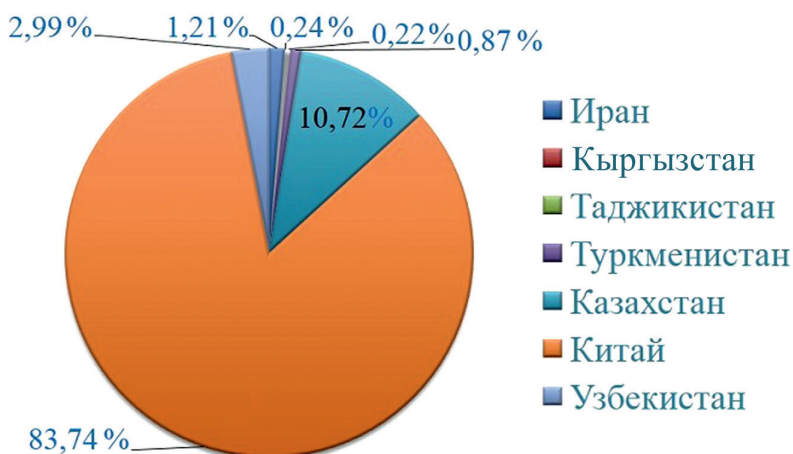


Рис. 1. Доля государств формирования грузопотоков в объёме перевозок грузов в международном сообщении, проходящем через территорию государств Центральной Азии.

## ВВЕДЕНИЕ

Возможности и направления развития отдельно взятых стран во многом определяются географическим положением. В мире насчитывается более 40 государств, не имеющих прямого доступа к морским перевозкам и тем самым отрезанных от наиболее дешёвого вида транспортных сообщений. Восемь из 11 стран Центральной и Западной Азии не имеют выхода к морю и испытывают из-за этого схожие проблемы. Вместе с тем, у них имеются потенциал и возможности для участия в международных транспортных коридорах [1].

Как отметил один из авторов исследования в выступлении на состоявшейся в 2018 году в Ташкенте международной конференции «Центральная Азия в системе международных транспортных коридоров: стратегические перспективы и нереализованные возможности», «грамотно выстроенная стратегия формирования и развития международных транспортных коридоров обеспечивает экономическое развитие не только государств Центральной Азии, но и других стран-участниц перевозок».

Вместе с тем, в практике формирования международных транспортных коридоров существует ряд проблем: несоответствие нормативно-правовых основ различных стран-участниц перевозочного процесса; различные технические стандарты; отсутствие унифицированной железнодорожной

колеи на всём пути следования, а также простои транзитных грузов на границах из-за длительного процесса таможенного оформления.

Цель исследования заключалась в исследовании транспортных коридоров Центральной, Западной и Южной Азии и существующих для их развития инфраструктурных, организационных и технологических ограничений.

Использовались методы экономического, статистического, инженерного анализа.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЫНКА ПЕРЕВОЗОК

В настоящее время в общем объёме перевозок грузов в международном сообщении по азиатским странам лидирующие позиции занимает Китай (рис. 1).

Как известно, в настоящее время порядка 83 % всех грузов, направляемых из Китая, основной страны генерации транзитного грузопотока через страны Центральной Азии, в Европу перевозятся морским транспортом.

Вместе с тем, существуют значимые предпосылки развития наземных трансконтинентальных торговых маршрутов, определяемые следующими факторами:

- ограниченная пропускная способность Суэцкого канала;
- военно-политическая ситуация в Бабель-Мандебском проливе, через который корабли попадают в Суэцкий канал;





Рис. 2. Существующие маршруты из Китая в Европу с участием железнодорожных инфраструктур Казахстана и России.

Таблица 1

Расчёт прогнозного объёма перевозок через МГСП Достык–Алашанькоу (Казахстан–Китай) до 2035 г.

Год	ВВП стран, млрд USD									Объём пере- возок, тыс. тонн
	Казах- стан X <sub>1</sub>	Китай X <sub>2</sub>	Япония X <sub>3</sub>	Герма- ния X <sub>4</sub>	Россия X <sub>5</sub>	Австра- лия X <sub>6</sub>	Корея X <sub>7</sub>	Индо- незия X <sub>8</sub>	Узбеки- стан X <sub>9</sub>	
Прогноз*										
2020	315	13014	6454	3770	2758	1839	1443	1378	94	41281
2021	333	13782	6518	3819	2868	1883	1487	1458	102	45598
2022	352	14595	6584	3869	2983	1928	1533	1543	110	50264
2023	372	15456	6649	3919	3102	1974	1581	1632	119	55306
2024	393	16368	6716	3970	3226	2022	1630	1727	128	60755
2025	415	17334	6783	4022	3355	2070	1681	1827	139	66645
2026	439	18356	6851	4074	3489	2120	1733	1933	150	73012
2027	464	19439	6919	4127	3629	2171	1786	2045	162	79893
2028	490	20586	6989	4181	3774	2223	1842	2164	175	87331
2029	518	21801	7058	4235	3925	2276	1899	2290	189	95371
2030	548	23087	7129	4290	4082	2331	1958	2422	204	104062
2031	579	24449	7200	4346	4245	2387	2018	2563	220	113457
2032	612	25892	7272	4402	4415	2444	2081	2711	238	123613
2033	647	27419	7345	4459	4592	2503	2145	2869	257	134591
2034	684	29037	7419	4517	4775	2563	2212	3035	277	146458
2035	723	30750	74933	4576	4966	2624	2280	3211	299	159286

Источник: [www.pwc.co.uk/economics](http://www.pwc.co.uk/economics).

• загруженность главных портов Евразии;

• динамичное развитие экономик Западного Китая, Индии и Пакистана.

В настоящее время существуют маршруты из Китая в Европу с участием железнодорожных инфраструктур Казахстана и России (рис. 2). Их главными преимуществами являются низкая стоимость

перевозки грузов, отсутствие таможенных пошлин в пространстве Таможенного Союза, а также невысокие временные издержки на пограничных переходах. Отрицательными же сторонами, особенно на маршруте, проходящем по Транссибу, являются более долгий срок доставки грузов и длинные тарифные расстояния.

годы	млн тонн
2017	6,6
2020	9,2
2025	16
2030	26,8
2035	42,4

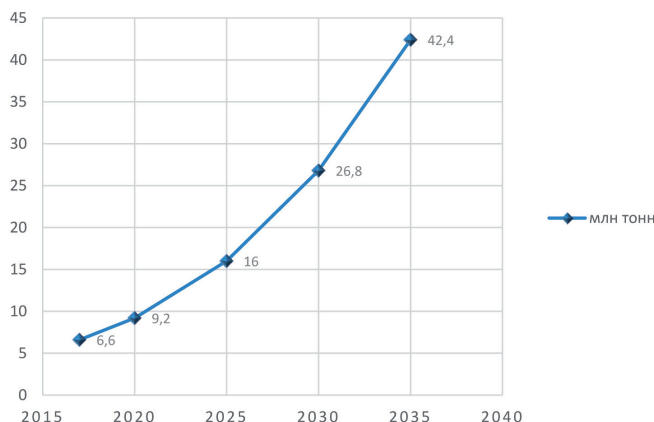


Рис. 3. Прогноз объема транзитных грузов, следующих по коридору Китай–Казахстан.

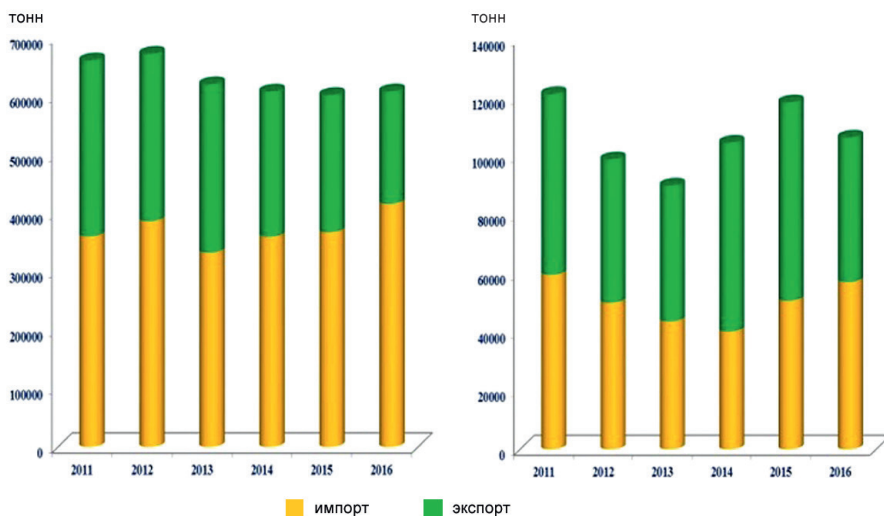


Рис. 4. Современное состояние перевозок из Южной Азии в страны Европейского Союза.

Другой транспортный коридор, проходящий по Казахстану, имеет морскую составляющую. Кроме этого, грузы транзитом поступают в действующие пограничные переходы Достык–Алашанькоу и Хоргос–Алтынколь. Однако, в ближайшем будущем пропускная способность этих линий может не соответствовать динамике объема перевозок между Китаем и Европой (таблица 1).

Всего по межгосударственным стыковым пунктам (МГСП) Китай–Казахстан к 2020 году прогнозируется следование более 9 млн тонн транзитных грузов в Центральнo-Азиатские страны и в страны ЕС. К 2035 году ожидается увеличение этого объема по сравнению

с 2020 годом более чем в четыре раза (рис. 3).

Вследствие этого возрастёт необходимость в альтернативных сухопутных маршрутах, по которым можно будет доставлять грузы в Европу и обратно.

#### КОРИДОР ПАКИСТАН–АФГАНИСТАН–УЗБЕКИСТАН

Взаимный торговый оборот двух наиболее экономически развитых стран Южной Азии – Индии и Пакистана – со странами ЕС показывает стабильный рост (рис. 4, 5), что также является фактором появления спроса на альтернативные виды транспорта: авиа-, авто- и железнодорожный.



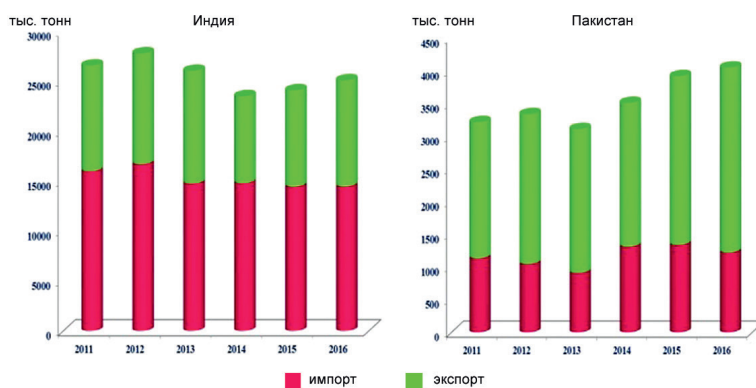


Рис. 5. Динамика экспортно-импортных перевозок морским транспортом стран ЕС с Индией и Пакистаном.



Рис. 6. Проект железнодорожной линии Мазари-Шариф–Хульм–Пули-Хумри–Доши–Сурабай–Джелалабад–Торкхам (Пакистан).

Наряду с этим необходимо отметить, что в 2017 году Индия и Пакистан стали полноправными членами ШОС, что может стать стимулом для развития торговли и роста транспортных связей [2].

Коридор Пакистан–Афганистан–Узбекистан мог бы рассматриваться как возрождение древнего «Великого Индийского пути». Одним из вариантов решения проблемы отсутствия железнодорожного соединения Индии и Пакистана с Центральной Азией и другими государствами может стать строительство железнодорожной линии Мазари-Шариф–Хульм–Пули-Хумри–Доши–Сурабай–Джелалабад–Торкхам (Пакистан) с ответвлением от Сурабая до Кабула. Значение действующей железнодорожной станции Торкхам (Пакистан) состоит в выходе через неё к крупному порту в Аравийском море и со-

единении с железнодорожной сетью Индии.

Строительство новой железнодорожной линии может вызвать интерес России, стран ЕС и других стран, а также в плане продвижения Евразийского экономического пространства на юг и использования данного маршрута для транзитных перевозок. В конце XIX века Россией уже рассматривался проект Индо-Волжской железной дороги.

Однако строительство данной линии усложняется наличием некоторых проблем, например, неопределённостью геополитической ситуации в Афганистане и дороговизной строительства отдельных железнодорожных участков.

В то же время, до строительства железнодорожной линии, можно использовать существующую международную автотрассу.



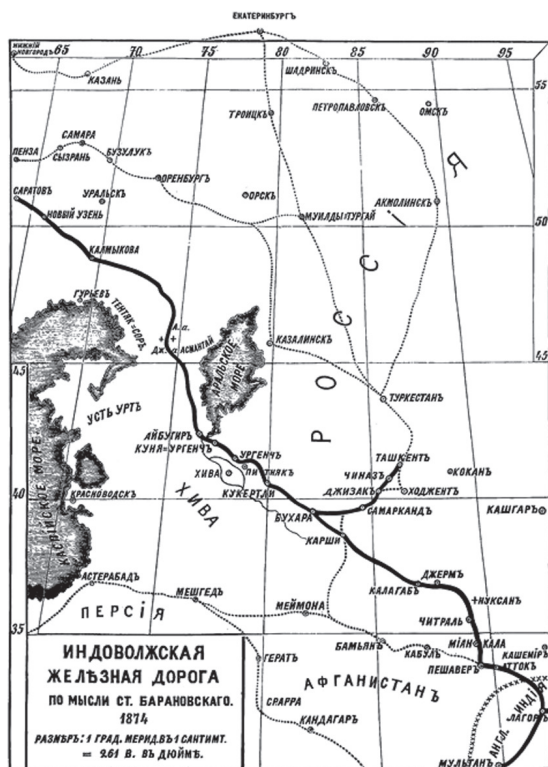


Рис. 7. Проект Индо-Волжской железной дороги Барановского (1874 г.).

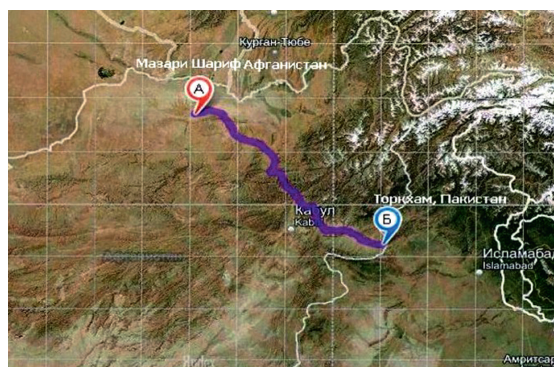


Рис. 8. Автомобильная дорога Мазари-Шариф (Афганистан)–Торкхам (граница Пакистана).

Создание логистических центров на станции Мазари-Шариф (Афганистан) и на станции Торкхам (Пакистан) для организации интермодальных перевозок (железнодорожным и автомобильным транспортом) позволит привлечь интерес к перевозкам грузов по этому направлению [3].

Протяжённость этого участка составляет 673 км. А протяжённость всей дороги от Пешавара до Термеза (включая и железнодорожную часть) составляет 748 км (тарифное расстояние «Мазари-Шариф–Хайратон» составляет 75 км).

Создание маршрута может стать экономически выгодным для Узбекистана, в том числе в случае, если до строительства железной дороги будут использоваться авто-

перевозки по тарифам, эквивалентным железнодорожным (таблицы 2, 3, 4) [5].

В то же время без соединения железных дорог Китая и Узбекистана через Кыргызстан конкурировать с железнодорожным направлением Казахстан–Туркменистан–Иран предполагаемому железнодорожному направлению Мазари-Шариф–Герат будет очень сложно.

## КОРИДОР КИТАЙ–КЫРГЫЗСТАН–УЗБЕКИСТАН

Такой коридор мог бы рассматриваться как одно из ответвлений древнего «Великого шёлкового пути».

Китай и Индия на протяжении долгого времени были заинтересованы в выходе по



**Таблица 2**  
**Стоимость смежных перевозок 40-футового контейнера, гружёного генеральным грузом, по маршруту «Каракалпакстан—Пешавар» с разделением на три составляющих участка с различными тарифами**

Маршрут следования	Тарифное расстояние (км)	Стоимость доставки 40-футового контейнера (дол.)
Пешавар—Мазари-Шариф	673 км	1950
Мазари-Шариф—Галаба	75 км	500
Галаба—Каракалпакстан	1735 км	3900

кратчайшим сухопутным дорогам в Европу. Эти две великие страны не связаны между собой железнодорожным транспортом, а железные дороги Индии и Пакистана не имеют выхода к железным дорогам Центральной Азии и других регионов [4].

В случае успешной реализации проекта строительства железнодорожной линии Китай—Кыргызстан—Узбекистан сформируется ещё один коридор, связывающий Центральную Азию с Китаем.

За начало маршрута взята станция Кашгар, так как вблизи города Кашгар (Каши) находится один из наиболее динамично развивающихся районов на западе Китая. Формируемый коридор намного короче существующих.

В то же время, до строительства железнодорожной линии можно использовать существующую международную автотрассу от действующего логистического центра Андижан до Кашгара, по которой с февраля 2018 года начато курсирование грузовых автомобилей. По данному маршруту следуют грузы из Узбекистана в Китай и обратно [7].

Представлен расчёт взимания стоимости автоперевозки по тарифам, эквивалентным железнодорожным, которые гораздо дешевле автомобильных. Вычислена разница размера дотации перевозок между автомобильным и железнодорожным транспортом. Результат говорит о выгодности перевозок за счёт гипотетической переориентации соответственно 10, 20, 30 % грузов (рис. 10), перевозимых сейчас через МГСП Китая и Казахстана.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Развитие транспортных коридоров по территории Центральной Азии приведёт к формированию единой транспортной системы и послужит толчком к поиску дополнительных выходов продукции на международные рынки.

Кроме того, порты Ирана выходят в Персидский залив и для доставки грузов к Суэцкому каналу необходимо огибать Аравийский полуостров, и пересекать Аравийское море, чтобы попасть к портам Индийского океана.

В этих условиях строительство железнодорожной линии от Мазари-Шарифа до Герата

**Таблица 3**  
**Ожидаемые доходы от перевозок транзитных грузов по территории Узбекистана**

Год	Доходы от перевозок транзитных грузов по железным дорогам Узбекистана, млн долл.	Плата за перевозку транзитных грузов автомобильным транспортом Мазари-Шариф—Пешавар, млн долл.	Мазари-Шариф—Галаба (600 дол. за 40-футовый контейнер, млн долл.)	Стоимость перевозки 40-футового контейнера автомобильным транспортом, если взимать по тарифам, эквивалентным железнодорожным	Убыток от дотирования затрат на автомобильные перевозки по территории Афганистана за счёт доходов от перевозок, млн долл.	Итоговый доход от перевозок транзитных грузов по маршруту Галаба—Каракалпакстан, млн долл.
2019	525,39	260,83	66,66	202,55	58,29	467,1
2020	546,69	271,51	69,62	210,84	60,67	486,22
2021	569,24	282,6	72,46	219,45	63,15	506,09
2022	592,66	294,24	75,45	228,49	65,75	526,93
2023	617,05	306,34	78,55	237,86	68,46	548,6
2024	642,47	318,96	81,78	247,66	71,27	571,19
2025	666,96	332,12	85,16	257,9	74,22	594,76

Таблица 4

Прогноз объёмов перевозок между Индией, Пакистаном и ЕС по видам сообщения

	Годы					Общий прирост
	2016	2018	2020	2022	2025	
	Базовый	Прогноз, тыс. тонн				
Общий объём торговли	31272,32	34150,16	37292,82	40724,7	46473,64	62,3
Морским транспортом, тыс. тонн	30616,67	33562,27	36791,26	40330,92	46289,03	72,9
Автомобильным транспортом, тыс. тонн	728,12	762	797,45	834,56	893,48	28,4
В перерасчете на ДФЭ, тыс.	128,5	139,2	1509	163,6	184,1	61,5
Гипотетическое перераспределение части грузопотока на маршрут, пролегающий через АО «УТИ», тыс. тонн	3855,5	4177	4526,7	4907	5522,4	61,6



Рис. 9. Сравнение трасс различных транспортных коридоров Китай–Узбекистан: 1. Урумчи–Достык–Болашақ–Серхетяка–Сарахс; 2. Урумчи–Хоргос–Болашақ–Серхетяка–Сарахс; 3. Урумчи–Достык–Сарыагач–Ходжидавлет–Сарахс; 4. Кашгар–Торугарт–Карасу–Савай–Ходжидавлет–Сарахс; 5. Урумчи–Хоргос–Сарыагач–Ходжидавлет–Сарахс.

Таблица 5

Стоимость и срок доставки 40-футового контейнера автомобильным транспортом

Маршрут следования	Суммарное расстояние	Стоимость доставки 40-футового контейнера (дол.)	Срок доставки* (час)
Кашгар–Сымкана–Иркештам–Сарыташ–Ош–Андижан	572 км	1950	40

\* В настоящее время существует автодорожная инфраструктура в Кыргызстане «Иркештам–Сарыташ–Ош», которая связывает китайский Кашгар и узбекский Андижан. Протяжённость этого участка составляет 258 км. А протяжённость всей дороги от Кашгара до Андижана (включая и железнодорожное расстояние) составляет 572 км.

в Афганистане обеспечит выход Центрально-азиатских железных дорог на Иран и его порты. В результате появилась бы возможность соединения путей с Катаром, Оманом,

а также обеспечения выхода через Турцию в ЕС по трансафганскому коридору [8].

На международной конференции «Центральная Азия в системе международ-



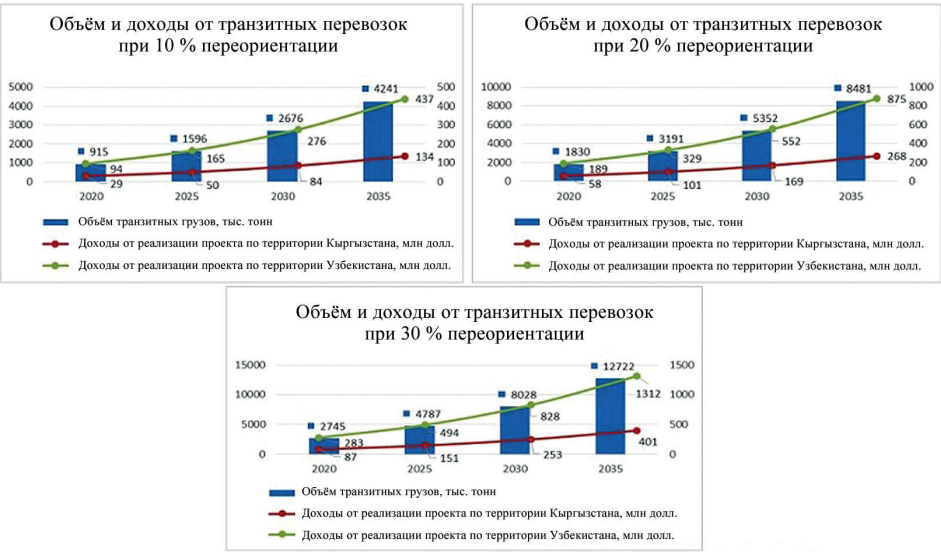


Рис. 10. Прогноз объёма и дохода при переориентировании.

Таблица 6

Ожидаемые доходы от перевозок транзитных грузов по территории Узбекистана

Год	Доходы от перевозки транзитных грузов по железным дорогам Узбекистан, млн. долл.	Затраты на перевозку транзитных грузов автомобильным транспортом по территории Кыргызстана, млн. долл.	Затраты на перевозку транзитных грузов по территории Кыргызстана, если взимать тариф как за ж.д. перевозки, млн. долл.	Убыток от дотирования затрат на автомобильные перевозки по территории Кыргызстана за счёт доходов от перевозок по железным дорогам Узбекистана, млн. долл.	Итоговый доход от перевозок транзитных грузов по маршруту Кашгар—Хикмешет, млн. долл.
2019	367,625	414,375	193,375	221	146,625
2020	410,875	463,125	216,125	247	163,875
2021	454,125	511,875	238,875	273	181,125
2022	497,375	560,625	261,625	299	198,375
2023	547,112	616,687	287,875	328	218,212

ных транспортных коридоров: стратегические перспективы и нереализованные возможности» была затронута проблема разницы стандартов ширины железнодорожной колеи. Как известно, ширина колеи у Китая, Ирана, ЕС – 1435 мм, у Индии, Пакистана – 1676 мм, а у стран Центральной Азии и России – 1520 мм. На сегодняшний день разными странами региона применяются следующие способы решения этой проблемы на пограничных железнодорожных переходах:

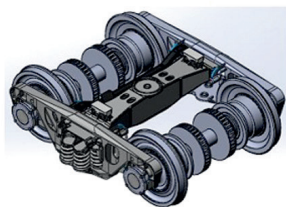
- перегрузка груза вручную или контейнеров механическим способом из вагонов с одной шириной колеи на вагоны с другой шириной (Китай–Казахстан: МГСП

«Достык–Алашанькоу», «Алтынкуль–Хоргос»);

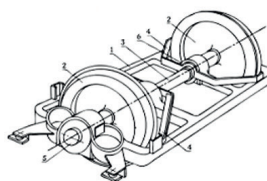
- смена железнодорожных тележек, при которой вагоны поднимаются для замены тележек одной колеи на другую (Иран–Туркменистан: МГСП «Серахс»).

Предлагается организация производства новых универсальных вагонов на промышленных предприятиях вагоностроения Центральной Азии (Казахстан, Узбекистан) с раздвижными колёсными парами. В результате на стыковых станциях Кыргызстана и Афганистана можно будет смонтировать переводные путевые устройства для функционирования крупных перевалочных центров.





1. Прототип грузовой тележки с раздвижными колёсными парами



2. Тележка с раздвижными колёсными парами Тальго (Испания)



3. Общий вид раздвижной колёсной пары SUW 2000 (Польша)



4. Переводное устройство системы SUW 2000 (Польша)

Рис. 11. Тележки с раздвижными колёсными парами.

## ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Развитие транспортных коридоров на территории Центральной Азии является высокоперспективным с точки зрения формирования единой транспортной системы и расширения возможностей для международной торговли.

По мнению авторов, целесообразно:

— Во-первых, учредить «Международную транспортно-логистическую ассоциацию ШОС», в которую будут входить все страны-участницы перевозочного процесса, а также на платформе ассоциации сформировать «Единый интерактивный портал транспортно-логистических услуг», доступный через Интернет.

— Во-вторых, организовать автомобильные перевозки грузов по существующим автомобильным дорогам из Кашгара (Китай) до Андижана (Узбекистан) и от Торкхана (Пакистан) до Мазари-Шарифа (Афганистан) со взиманием тарифа, эквивалентного плате за железнодорожные перевозки. Это позволит переориентировать грузовладельцев на перевозки грузов по сухопутным маршрутам.

— В-третьих, на базе научных технических учреждений необходимо разработать конструкции универсальных вагонов с раздвижными колёсными парами, адаптированных к эксплуатации на железных дорогах различной колеи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Выступление президента республики Узбекистан Ислама Каримова на заседании совета глав го-

сударств-членов ШОС в расширенном составе. [Электронный ресурс]: [http://www.jahonnews.uz/rus/rubriki/politika/vistuplenie\\_prezidenta\\_respubliki\\_uzbekistan\\_islama\\_karimova\\_na\\_zasedanii\\_soveta\\_glav\\_gosudarstv\\_chlenov\\_shos\\_v\\_rasshirennom\\_sostave51451.mgr](http://www.jahonnews.uz/rus/rubriki/politika/vistuplenie_prezidenta_respubliki_uzbekistan_islama_karimova_na_zasedanii_soveta_glav_gosudarstv_chlenov_shos_v_rasshirennom_sostave51451.mgr). Доступ 03.12.2018.

2. Xi proposes reviving Silk Road glory. [Электронный ресурс]: <http://www.globaltimes.cn/content/809615.shtml>. Доступ 03.12.2018.

3. Ибрагимов У. Н. Мультимодальные перевозки — один из этапов стабильного развития транзитного железнодорожного коридора Китай—порты Персидского залива // Сборник материалов научно-технической конференции с участием зарубежных учёных «Транспортная логистика, мультимодальные перевозки». — Ташкент: ТашиИТ, 2011. — С. 53–54.

4. Расулов М. Х., Ибрагимов У. Н., Рахимов Р. В. Проблемы повышения конкурентоспособности отечественных железнодорожных коридоров // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных учёных «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». — Т.: ТашиИТ, 2013. — С. 14–17.

5. Rasulov M., Ibragimov U., Mirakhmedov M., Rizaev A. Central Asian transport corridors and prospects of Uzbekistan's further integration to the global transport network. 7<sup>th</sup> International Symposium for Transportation Universities in Europe and Asia // Dalian Jiaotong University, China-2014. — pp. 25–30.

6. Ibragimov U. Integration problems of railway of Uzbekistan with world transport network // Transport problems-2014. Poland, Katowice, 2014.

7. Ибрагимов У. Н., Хаджимухаметова М. А., Адильходжаев А. А. Отчёт по научно-исследовательской работе на тему «Исследование путей пропуска транзитных поездов через территорию Узбекистана, обеспечивающее рост использования транзитного потенциала железной дороги республики», Ташкент, 2014.

8. Rakhimov K., Kongurbaev R., Aytuganov B. Final report on issue «Preliminary feasibility study of establishing of multimodal transport corridor through Kyrgyzstan», USAID contract number: 176-C-00-07-00011-08, prepared for AECOM International Development Inc., Bishkek (2010).



# Development of Single and Externally Integrated Transport Area in Central Asia



Umidilla N. IBRAGIMOV



Mahmudjon M. TOKHIROV

*Ibragimov, Umidilla N., JSC O'zbekiston Temir Yo'llari, Tashkent, Uzbekistan.  
Tokhirov, Mahmudjon M., Russian University of Transport, Moscow, Russia / Tashkent, Uzbekistan\*.*

## ABSTRACT

Competently built strategy for development of international transport corridors passing through the countries of Central Asia ensures economic development of not only the states located in this region, but also of other countries participating in transportation processes.

At the same time, the practices of development of international transport corridors reveal several problems which comprise inconsistency of regulatory acts of the parties involved, differences in technical standards, lack of uniformity of railway gauge, duration of customs clearance.

The objective of the work was to study transport corridors of Central, Western and South Asia and the existing infrastructural, organizational, and technological limitations for their development. The methods of economic, statistical, and engineering analysis were used.

The research has considered problems in development of international transport corridors and possible solutions thereof through organization of intermodal transportation by a single transport operator of Uzbekistan, as well as the current state of transport corridors linking Central, Western, South Asia and China with the EU countries, including development of China–EU railway corridors. In that context, the article suggests the analysis of several legal, organizational, technological factors, as well as of infrastructural restrictions using the example of the Kashgar (China)–Osh (Kyrgyzstan) railway section, prior to construction of which it is proposed to use intermodal transportation.

The proposals refer to creating the Shanghai Cooperation Organisation (SCO) transport and logistics association and to developing the design of universal wagons with variable gauge wheel sets adapted for operation on railways of various gauges.

**Keywords:** transport, transport corridors, railway corridors, Uzbekistan, construction of railways, competitive route, intermodal transportation, specific tariff, cost of transportation, container, variable gauge wheel sets.

\*Information about the authors:

**Ibragimov, Umidilla N.** – Ph.D. (Eng), head of the department of information security and informatization development of JSC O'zbekiston Temir Yo'llari, Tashkent, Uzbekistan, [almaz-umid@mail.ru](mailto:almaz-umid@mail.ru).

**Tokhirov, Mahmudjon M.** – student of the Russian University of Transport, Moscow, Russia/Tashkent, Uzbekistan, [mahmudjon.tokhirov.99@mail.ru](mailto:mahmudjon.tokhirov.99@mail.ru).

Article received 15.10.2018, revised 19.08.2019, accepted 30.08.2019.

For the original Russian text please see p. 148.

**Background.** Geographic location considerably determines the opportunities and directions of development of individual countries. There are more than 40 countries in the world that do not have direct access to sea transportation and hence they are separated from the cheapest type of transport links. Eight of 11 countries in Central and Western Asia are landlocked and are suffering similar problems. Meanwhile they have potential and possibilities to participate in international transport corridors [1].

As it was mentioned by one of the authors of the study in his speech at the international conference «Central Asia in the system of international transport corridors: strategic outlooks and missed opportunities» held in 2018 in Tashkent, «a competent strategy for development of international transport corridors provides economic development not only for the countries of Central Asia, but also for other countries participating in transportation».

Meanwhile, the practices of international transport corridors formation face some problems which are inconsistency of the regulatory basis of various countries involved in transportation process; unmatched technical standards; the lack of a unified railway track gauge along the entire route, as well as downtime of transit goods at the borders due to the time-taking customs clearance process.

**Objective.** The objective of the article is to study the transport corridors of Central, Western and South Asia and infrastructural, organizational and process restrictions obstructing their development.

**Methods.** Economical, statistical and engineering methods of analysis were used.

**Results.**

**Analysis of the transportation market status**

Currently, the share of goods originating in China leads within the total amount of international cargo transportation through the Asian countries (Pic. 1).

It is commonly known that at present about 83 % of all goods sent from China, which is the main country generating transit cargo flow through Central Asian countries, are transported to Europe by sea.

In the meantime there are considerable prerequisites for development of land transcontinental trade routes, determined by the following factors:

- limited throughput capacity of the Suez canal;
- political and military situation in Bab-el-Mandeb strait, through which the ships enter the Suez Canal;
- congestion of the main Eurasian ports;
- dynamic development of the economies of Western China, India and Pakistan.

Currently, there are routes from China to Europe involving the railway infrastructure of Kazakhstan and Russia (Pic. 2). Their main advantages are the low cost of goods transportation, the absence of customs duties within the Customs Union, as well as short time spent at border crossing points. The disadvantages are longer time for cargo delivery and long tariff distances, especially on the route along the Trans-Siberian Railway.

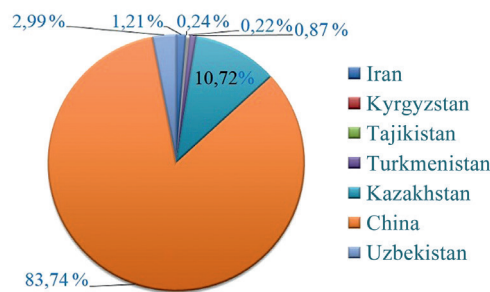
Another transport corridor passing through Kazakhstan has a maritime component. Besides, the transit goods arrive at the existing border terminals Dostyk–Alashankou and Khorgos–Altynkol. However, in the nearest future their throughput capacity will probably not comply with the dynamics of traffic between China and Europe (Table1).

Totally, by the year of 2020 more than 9 million tons of transit cargo are forecasted to pass through China–Kazakhstan interstate crossing points to the Central Asian countries and the EU countries. By 2035, a four-fold increase is expected compared to 2020 (Pic. 3).

As a result, there is a growing need for alternative land routes through which it will be possible to deliver goods to Europe and vice versa.

**Pakistan–Afghanistan–Uzbekistan corridor**

Mutual trade turnover of two most economically developed countries of South Asia, India and Pakistan, with the EU countries

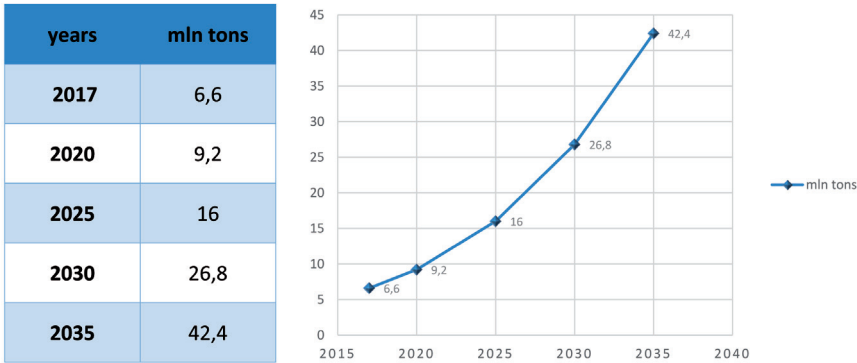


**Pic. 1. The share of countries of origin of goods within the total amount of international cargo transportation passing through the territory of Central Asian countries.**





Pic. 2. The existing routes from China to Europe involving railway infrastructure of Kazakhstan and Russia.



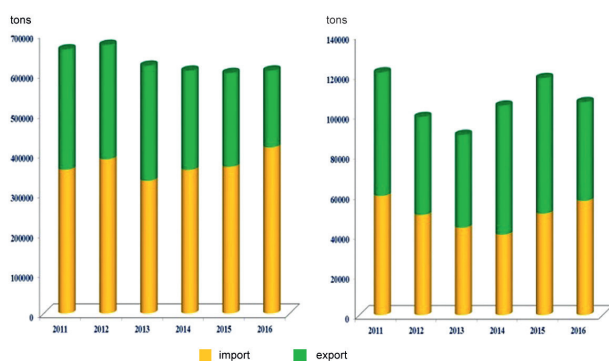
Pic. 3. Forecasted amount of transit cargo through the corridor China–Kazakstan.

Table 1  
Calculation of the expected traffic flow through interstate crossing point Dostyk–Alashankou (Kazakstan–China) up to the year of 2035.

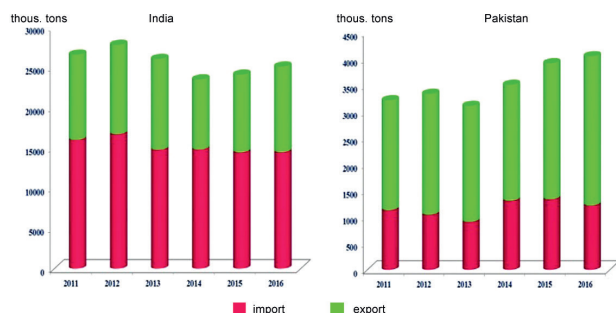
Year	GDP of the countries, billion USD									Traffic volume, thous. tons
	Kazakhstan X <sub>1</sub>	China X <sub>2</sub>	Japan X <sub>3</sub>	Germany X <sub>4</sub>	Russia X <sub>5</sub>	Australia X <sub>6</sub>	Korea X <sub>7</sub>	Indonesia X <sub>8</sub>	Uzbekistan X <sub>9</sub>	
	Forecast*									
2020	315	13014	6454	3770	2758	1839	1443	1378	94	41281
2021	333	13782	6518	3819	2868	1883	1487	1458	102	45598
2022	352	14595	6584	3869	2983	1928	1533	1543	110	50264
2023	372	15456	6649	3919	3102	1974	1581	1632	119	55306
2024	393	16368	6716	3970	3226	2022	1630	1727	128	60755
2025	415	17334	6783	4022	3355	2070	1681	1827	139	66645
2026	439	18356	6851	4074	3489	2120	1733	1933	150	73012
2027	464	19439	6919	4127	3629	2171	1786	2045	162	79893
2028	490	20586	6989	4181	3774	2223	1842	2164	175	87331
2029	518	21801	7058	4235	3925	2276	1899	2290	189	95371
2030	548	23087	7129	4290	4082	2331	1958	2422	204	104062
2031	579	24449	7200	4346	4245	2387	2018	2563	220	113457
2032	612	25892	7272	4402	4415	2444	2081	2711	238	123613
2033	647	27419	7345	4459	4592	2503	2145	2869	257	134591
2034	684	29037	7419	4517	4775	2563	2212	3035	277	146458
2035	723	30750	74933	4576	4966	2624	2280	3211	299	159286

Source: [www.pwc.co.uk/economics](http://www.pwc.co.uk/economics).





**Pic. 4. The current state of transportation from South Asia to EU countries.**



**Pic. 5. Dynamics of export-import transportation by sea transport between India and Pakistan and EU countries.**

shows steady growth (Pic. 4, 5), which is also a factor of demand for alternative transportation modes: by air, road and rail.

At the same time, it should be noted that in 2017 India and Pakistan became full-fledged members of the SCO, which may become an inducement for the trade development and the growth of transport links [2].

Pakistan–Afghanistan–Uzbekistan corridor might be regarded as a revival of the ancient Great Indian Route. One of the solutions to the problem of the lack of a railway connection between India and Pakistan with Central Asia and other states may pass through construction of Mazar-i-Sharif–Khulm–Pul-i-Khumri–Doshi–Surobi–Jalalabad–Torkham railway line (Pakistan), with a branch from Surobi to Kabul. The significance of the existing Torkham railway station (Pakistan) is that it is a connection point giving access to a large port on the Arabian Sea and a connection to the Indian railway network.

The construction of a new railway line may stimulate the interest of Russia, the EU and other countries, as well as in terms of development of Eurasian economic space southward and of using this itinerary for transit transportation. Russia, e.g., has already been

considering the Indo-Volga railway project at the end of the 19<sup>th</sup> century.

However, the construction of this line is complicated by some problems, for instance, the instability of the geopolitical situation in Afghanistan and the high cost of construction of some railway sections.

Meanwhile, it is possible to use the existing international motor road route prior to construction of a railway line. The logistic centers at the station of Mazar-i-Sharif (Afghanistan) and at the station of Torkham (Pakistan) for arrangement of multimodal transportations (both by rail and motor roads) will attract interest to cargo transportation using this itinerary [3].

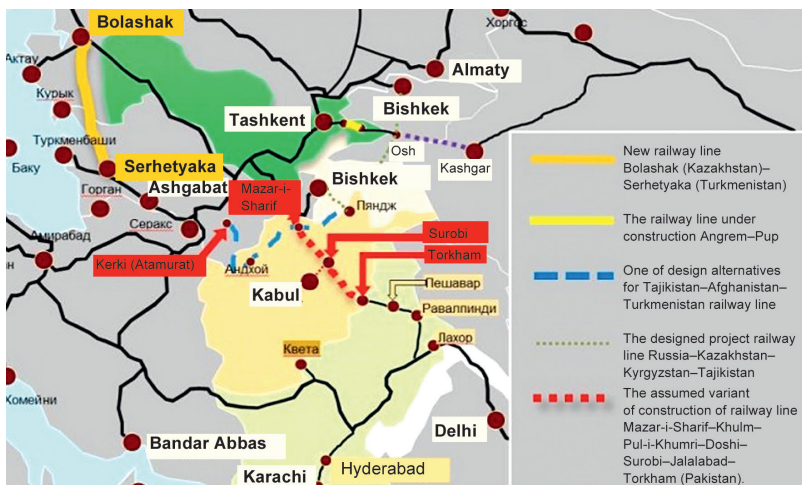
The length of this section is 673 km, where as the length of the whole road from Peshawar up to Termez (including railway part as well) is 748 km (tariff distance Mazar-i-Sharif–Hairatan is 75 km).

Development of this route may be economically beneficial for Uzbekistan, also in case if motor transportation will be rated at the tariffs equivalent to railway tariffs until the railway is constructed (Tables 2, 3, 4) [5].

At the same time, without connecting the railways of China and Uzbekistan through Kyrgyzstan, it will be very difficult for the proposed Mazar-i-Sharif–Herat railway line



**Pic. 6. The project of railway line Mazar-i-Sharif–Khulm–Pul-i-Khumri–Doshi–Surobi–Jalalabad–Torkham (Pakistan).**



to compete with Kazakhstan–Turkmenistan–Iran railway.

#### **China–Kyrgyzstan–Uzbekistan Corridor**

This corridor could be considered as one of the branches of the ancient «Great Silk Road».

For a long time China and India have been interested in transport access to Europe using the shortest land roads. These two great countries are not connected by railway and Indian and Pakistan railways do not have access to the railways of Central Asia and other regions [4].

In case of successful implementation of the project for construction of China–Kyrgyzstan–

Uzbekistan railway line, one more corridor will be created ensuring the connection of Central Asia with China.

Kashgar railway station is considered as the start point of the route, since the area near city of Kashgar (Kashi) is one of the most dynamically developing parts in the West of China. The developed corridor is much shorter than the existing ones.

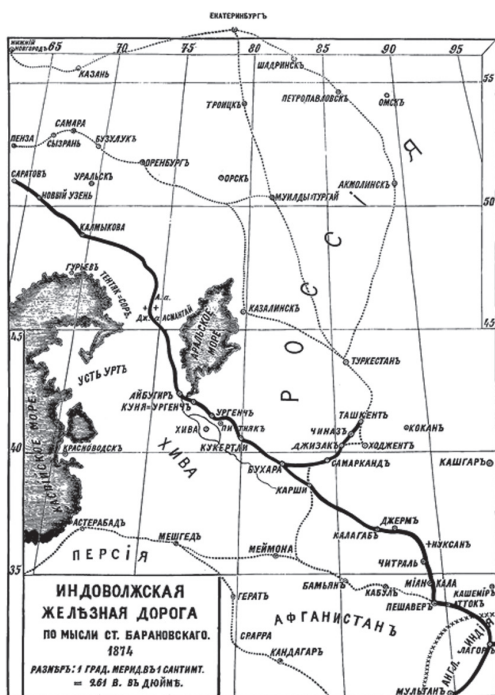
Meanwhile, until the railway line is constructed, it is possible to use the existing international highway from the existing Andijon logistics center to Kashgar, which was open for freight traffic in February 2018. Goods are transported along this route from Uzbekistan to China and vice versa [7].

We suggest calculation of road transportation tariffs in case they are equal to railway tariff rates, the last ones being currently much lower than road ones. We also calculated the difference in subsidy volumes for motor and railway transportation. The results have shown the profitability of transportation if a share of goods now transported via interstate border crossing points between Kazakhstan and China will be redirected to that road facility (Pic. 10: for case of redirecting respectively 10, 20 and 30 % of cargo flow).

#### **Technical solutions**

Development of transport corridors throughout the Central Asia will result in formation of a single transport system and will lead to search of new ways for product access to the international markets.

Moreover, ports in Iran are located on the Persian Gulf and for cargo delivery to the Suez Canal it is required to navigate round the Arabian Peninsula and cross the Arabian Sea to reach the ports of the Indian Ocean.



**Pic. 7. Baranovsky's Indo-Volga railway project (1874).**

Under these conditions construction of the railway line from Mazar-i-Sharif to Herat in Afghanistan will ensure access of Central Asian railways to Iran and its ports. As a result, it will make it possible to connect the routes with Qatar, Oman, and to ensure access to the EU through Turkey via the Trans-Afghan transport corridor [8].

The international conference «Central Asia in the system of international transport corridors: strategic outlooks and missed opportunities» discussed among other problems the issue of difference in rail track gauge. As it is well known, the track gauge in China, Iran, the EU is 1435 mm, in India, Pakistan – 1676 mm, and in countries of Central Asia and in Russia it is 1520 mm. At present, different countries of the region apply the following methods to solve this issue at the railway border crossings:

- manual transshipment of cargo or mechanical transshipment of containers from wagons designed for one type of the track gauge to wagons designed for different gauge (China–Kazakhstan: interstate border crossing points Dostyk–Alashankou, Altynkul–Khorgos),
- change of railway bogies, when cars are lifted for change of bogies of one gauge to another (Iran–Turkmenistan: interstate border crossing point Serakhs).

It is suggested to arrange production of new universal wagons with variable gauge wheel sets at the car manufacturing enterprises in Central Asia (Kazakhstan, Uzbekistan). As a result, it will be possible to install railway switch devices for operation of transshipment centers at the



Pic. 8. Motor road Mazar-i-Sharif (Afghanistan)–Torkham (Pakistan border).

Table 2

Cost of multimodal transportation of a 40-feet container loaded with general cargo along the Karakalpakstan–Peshawar route, divided into three sections with different tariffs

Route	Tariff distance (km)	Cost of delivery of 40-feet container (US dollar)
Peshawar–Mazar-i-Sharif	673 km	1950
Mazar-i-Sharif –Galaba	75 km	500
Galaba–Karakalpakstan	1735 km	3900

connection stations of Kyrgyzstan and Afghanistan.

Conclusion and suggestions

Development of transport corridors throughout the Central Asia is highly promising with regard to development of the integrated transport system and expansion of international commerce.

Table 3

Expected revenues from transportation of transit goods through Uzbekistan

Year	Revenues from transportation of transit goods by railroads of Uzbekistan, mln USD	Fee for the goods transit by motor road Mazar-i-Sharif–Peshawar, mln USD	Mazar-i-Sharif–Galaba (600 US dollars for 40-foot container, mln USD)	The cost of transportation a 40-foot container by motor road, if charged at tariffs equivalent to railroad tariffs	Loss from subsidizing the cost of road transport across Afghanistan through transportation revenues, mln USD	Total revenue from transportation of transit goods along the Galaba–Karakalpakstan route, mln USD
2019	525,39	260,83	66,66	202,55	58,29	467,1
2020	546,69	271,51	69,62	210,84	60,67	486,22
2021	569,24	282,6	72,46	219,45	63,15	506,09
2022	592,66	294,24	75,45	228,49	65,75	526,93
2023	617,05	306,34	78,55	237,86	68,46	548,6
2024	642,47	318,96	81,78	247,66	71,27	571,19
2025	666,96	332,12	85,16	257,9	74,22	594,76





Table 4

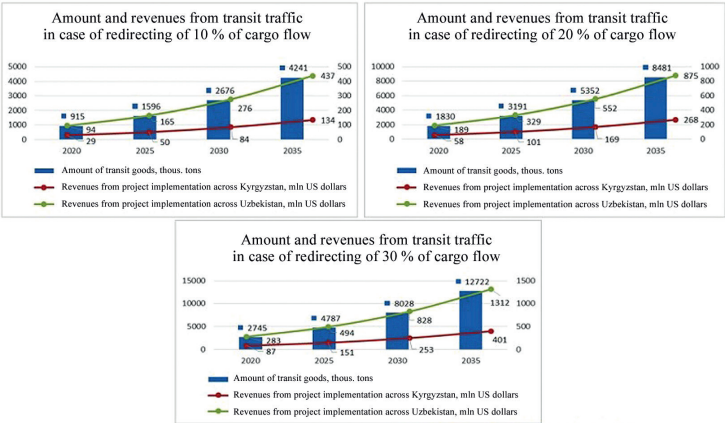
Forecast of transportation volume between India, Pakistan and the EU by modes of transport

	Years					Total increase
	2016	2018	2020	2022	2025	
	Basic	Forecast, thous. tons				
Total trade volume	31272,32	34150,16	37292,82	40724,7	46473,64	62,3
Sea transport thous. tons	30616,67	33562,27	36791,26	40330,92	46289,03	72,9
Automobile transport, thous. tons	728,12	762	797,45	834,56	893,48	28,4
In terms of TEU, thous.	128,5	139,2	1509	163,6	184,1	61,5
Hypothetical redistribution of traffic flow portion to the route running along «O'zbekistonTemirYo'llari» JSC facilities, thous. tons	3855,5	4177	4526,7	4907	5522,4	61,6

**Pic. 9. Comparison of various transport corridors China–Uzbekistan:**  
**1. Urumqi–Dostyk–Bolashak–Serhetyaka–Sarakh;**  
**2. Urumqi–Khorgos–Bolashak–Serhetyaka–Sarakh;**  
**3. Urumqi–Dostyk–Saryagach–Khojidaylet–Sarakh;**  
**4. Kashgar–Torugart–Karasu–Savay–Khojidaylet–Sarakh;**  
**5. Urumqi–Khorgos–Saryagach–Khojidaylet–Sarakh.**



**Pic. 10. Forecast of amount and revenue from redirecting cargo flows.**



**Pic. 11. Bogies with variable gauge wheel sets.**

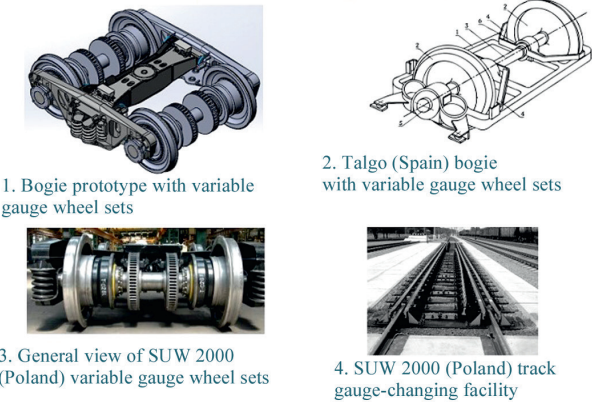




Table 5

Cost and delivery time of 40-foot container by automobile transport

Route	Total distance	Cost of 40-foot container delivery (USD)	Delivery time* (hour)
Kashgar—Symkana—Irkeshtam—Sarytash—Osh—Andijon	572 km	1950	40

\* Currently, Kyrgyzstan has a road-transport infrastructure Irkeshtam—Sarytash—Osh, which connects Kashgar (China) and Andijon (Uzbekistan). The distance of this section is 258 km, whereas the total length of the road from Kashgar to Andijon (including the railway distance as well) is 572 km.

Table 6

Revenues of expected transient cargo transportation throughout Uzbekistan

Year	Revenue from transit cargo transportation via railway of Uzbekistan, mln USD	Freight costs of transit cargo transportation by motor transport through Kyrgyzstan, mln USD	Freight costs of transit cargo transportation throughout Kyrgyzstan, if the applied tariff will be equal to the tariff for railway transportation, mln USD	Loss from allocating subsidy for road transportation via Kyrgyzstan at the expense of income from the railway transportation via Uzbekistan, mln USD	Total revenue from transit cargo transportation on route Kashgar—Hikmet, mln USD
2019	367,625	414,375	193,375	221	146,625
2020	410,875	463,125	216,125	247	163,875
2021	454,125	511,875	238,875	273	181,125
2022	497,375	560,625	261,625	299	198,375
2023	547,112	616,687	287,875	328	218,212

According to the authors’ opinion it is advisable:

Firstly, to establish «International transportation logistics association of the SCO», which will include all countries involved in the transportation process, and to develop «Single on-line portal of transportation logistics services» accessible via Internet.

Secondly, to arrange cargo transportation via existing roads from Kashgar (China) to Andijon (Uzbekistan) and from Torkham (Pakistan) to Mazar-i-Sharif (Afghanistan) using the rates equivalent to the railway tariff. It will allow to refocus cargo owners to goods transportation via land route.

Thirdly, it is required to develop with the assistance of research institutions design of universal wagons with variable gauge wheel sets adapted for operation at railways with different track gauges.

REFERENCES

1. Speech by Islam Karimov, President of Uzbekistan, at the session of the Council of the head of states – members of the SCO in expanded format. [Electronic resource]: [http://www.jahonnews.uz/rus/rubriki/politika/vistuplenie\\_prezidenta\\_respubliki\\_uzbekistan\\_islama\\_karimova\\_na\\_zasedanii\\_soveta\\_glav\\_gosudarstv\\_chlenov\\_](http://www.jahonnews.uz/rus/rubriki/politika/vistuplenie_prezidenta_respubliki_uzbekistan_islama_karimova_na_zasedanii_soveta_glav_gosudarstv_chlenov_)

[shos\\_v\\_rasshirennom\\_sostave51451.mgr](http://shos_v_rasshirennom_sostave51451.mgr). Last accessed 03.12.2018.

2. Xi proposes reviving Silk Road glory. [Electronic resource]: <http://www.globaltimes.cn/content/809615.shtml>. Last accessed 03.12.2018.

3. Ibragimov, U. N. Multimodal transportation as one of stages for development of transit railway corridor of China – ports of the Persian Gulf. Proceedings of scientific and technical conference with the participation of foreign scientists «Transportation, multimodal transportation». Tashkent, TashIIT, 2011, pp. 53–54.

4. Rasulov, M. Kh., Ibragimov, U. N., Rakhimov, R. V. Issues of competitive growth of domestic railway corridors. Proceedings of scientific and technical conference with the participation of foreign scientists «Resource saving technologies for railwat transport». Tashkent, TashIIT, 2013, pp. 14–17.

5. Rasulov, M. Kh., Ibragimov, U. N., Mirakhmedov, M., Rizaev, A. Central Asian transport corridors and prospects of Uzbekistan’s further integration into the global transport network. *The 7<sup>th</sup> International Symposium for Transportation Universities in Europe and Asia*. Dalian Jiaotong University, China, 2014, pp. 25–30.

6. Ibragimov, U. N. Integration problems of railway of Uzbekistan with world transport network. Conference Transport problems-2014. Poland, Katowice, 2014.

7. Ibragimov, U. N., Khadzimuhametova, M. A., Adylhodzhaev, A. A. Report on research «Study of the ways of rail train transit via Uzbekistan providing increase in implementation of the transit capacity of the railway of the Republic». Tashkent, 2014.

8. Rakhimov, K., Kongurbaev, R., Aytuganov, B. Final report on issue «Preliminary feasibility study of establishing of multimodal transport corridor through Kyrgyzstan». USAID contract number: 176-C-00-07-00011-08, prepared for AECOM International Development Inc., Bishkek (2010).





# Логистика малотоннажного СПГ



Людмила БУЯНОВА



Ольга МУДРОВА

*Буянова Людмила Николаевна – Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота, Санкт-Петербург, Россия.*

*Мудрова Ольга Михайловна – Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота, Санкт-Петербург, Россия\*.*

В последние годы возрастает интерес к сжиженному природному газу (СПГ) как к бункерному топливу для судов. Это обусловлено целым рядом причин экологического (снижение выброса серы судами в соответствии с международной конвенцией МАРПОЛ 73/78), экономического (более низкая цена СПГ по сравнению с дистиллятным топливом, удовлетворяющим требованиям МАРПОЛ 73/78), технико-экономического (снижение расходов по содержанию судов и увеличение ресурса эксплуатации) характера. Эти выводы в отношении СПГ применимы к судам различных типов, предназначенных для морского и речного плавания.

В то же время переход речных судов и морских судов прибрежного плавания на бункеровку СПГ в настоящее время сдерживается, в том числе в России, рядом причин, одной из которых является слабое логистическое обеспечение доставки СПГ от мест производства до пунктов бункеровки судов. Вследствие этого развитие рынка бункеровки судов СПГ требует совершенствования логистического обеспечения доставки малотоннажного СПГ, которая может выполнять-

ся с использованием нескольких видов транспорта.

Целью исследования является разработка практического алгоритма оценки стоимости транспортировки СПГ для бункеровки судов с учётом особенностей интермодальной логистики. В основу методологии исследования положен аналитический метод на базе системно-структурного подхода.

На примере России разработаны алгоритм выбора оптимальной транспортно-технологической схемы (ТТС) доставки малотоннажного СПГ и эксплуатационно-экономические модели расчёта удельной стоимости перевозки, хранения и перевалки СПГ.

Апробация моделей на расчётных маршрутах позволила оценить стоимость транспортировки СПГ по вариантам транспортно-технологических схем для наливного и контейнерного способов доставки и сформулировать выводы. При этом использованная методология является в большой мере универсальной и позволяет использовать предложенные подходы для разработки ТТС применительно к другим странам.

**Ключевые слова:** речные и морские суда, внутренний водный транспорт, СПГ, логистика, транспортно-технологическая схема, цена доставки, эксплуатационно-экономическая модель, бункеровка, цистерна, танк-контейнер, тариф.

\*Информация об авторах:

**Буянова Людмила Николаевна** – доктор экономических наук, профессор, ведущий научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», Санкт-Петербург, Россия, buyanova.n@yandex.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 13.05.2019, принята к публикации 19.08.2019.

For the English text of the article please see p. 174.

## ВВЕДЕНИЕ

Интерес к сжиженному природному газу (СПГ) как к бункерному топливу для судов в последние годы значительно возрастает по многим причинам:

- использование СПГ позволит выполнить требования Приложения VI Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78 по снижению выброса серы судами (с 1 января 2020 года содержание серы в судовом топливе во всех районах мира не должно превышать 0,5 % по массе);
- более низкая стоимость СПГ по сравнению с дистиллятным топливом, удовлетворяющим требованиям Конвенции;
- наличие ряда технических факторов, снижающих расходы по содержанию судов в эксплуатации: отсутствие необходимости очистки отходящих газов от  $\text{SO}_x$  ввиду отсутствия серы в СПГ, существенное снижение содержания  $\text{NO}_x$  в отходящих газах энергетических установок, практически полное отсутствие в отходящих газах твёрдых частиц. Это позволяет отказаться от размещения на судне реакторов избирательной каталитической реакции и сажеуловителей. В целом происходит увеличение моторесурса поршневых двигателей и снижение нагарообразования в них.

В то же время переход судов на бункеровку СПГ в настоящее время сдерживается рядом причин, в том числе и слабым логистическим обеспечением доставки СПГ от мест производства до пунктов бункеровки судов. Для широкого перехода судов на СПГ необходимо, чтобы процесс бункеровки судов СПГ не вызывал у судовладельцев серьёзных проблем.

Этот вопрос особенно актуален в отношении газотопливного флота, используемого для навигации в прибрежных водах и на внутренних водных путях.

Целью исследования стала разработка практического алгоритма оценки стоимости транспортировки СПГ для бункеровки речных судов с учётом особенностей интермодальной логистики. В основу методологии исследования положен аналитический метод на базе системно-структурного подхода. Для апробации использовались эмпирические и прогнозные данные применительно к Российской Федерации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Достижение поставленной цели исследования осуществлялось в следующей последовательности.

### *1. Исследование географии размещения пунктов бункеровки жидким нефтяным топливом судов внутреннего водного транспорта*

На основе данных Реестра поставщиков бункеровочного топлива [1] и Российской ассоциации морских и речных бункеровщиков [2] был сформирован перечень портопунктов, в которых осуществляется бункеровка речных судов.

По результатам исследования выявлены наиболее востребованные в настоящее время порты бункеровки речных судов жидким нефтяным топливом.

В настоящее время бункеровка речных судов осуществляется в пунктах, расположенных на реках единой глубоководной системы европейской части России, реках Сибири и Дальнего Востока. Наибольшее количество бункеровочных компаний работает в речных портах, таких как Череповец, Ярославль, Нижний Новгород, Казань, Самара, Волгоград.

### *2. Исследование географии размещения комплексов по сжижению природного газа*

Комплексы по сжижению природного газа (КСПГ) в зависимости от годового объёма производства подразделяются на крупнотоннажные, среднетоннажные и малотоннажные.

Действующие крупнотоннажные заводы (например, в проекте «Ямал-СПГ» завод по сжижению газа расположен в порту Сабетта) ориентированы только на отгрузку СПГ на экспорт с использованием крупнотоннажных газозовов (типа «Christophe de Margerie» проекта Yamalmax вместимостью 170 тыс. м<sup>3</sup>) [3]. Перспективные проекты, такие как «Арктик СПГ-2», «Владивосток СПГ» и КСПГ в Усть-Луге (бывший «Балтийский СПГ») [4–6], предполагают наличие возможности бункеровки морских судов.

Среднетоннажное производство СПГ, начиная с 2019 года, будет развёрнуто в основном на северо-западе России. Это проект «Криогаз-Высоцк» мощностью 660 тыс. т СПГ в год [7] и терминал СПГ компании ПАО «Газпром» в районе компрессорной станции «Портовая» (г. Выборг



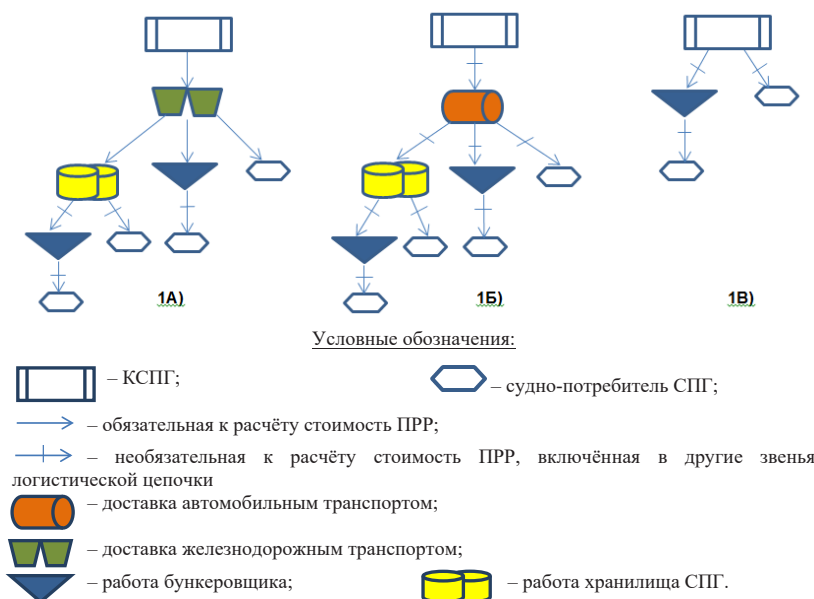


Рис. 1. Варианты доставки СПГ в цистернах.

Ленинградской обл.) мощностью 1,5 млн т СПГ в год [8].

На территории России функционируют 13 малотоннажных производств: шесть сосредоточены в Северо-Западном экономическом регионе, три — в Уральском, два — в Западно-Сибирском и два — в Дальневосточном. В ближайшие годы запланированы к запуску ещё четыре завода.

Применительно к цели данного исследования при формировании маршрутов доставки СПГ используются действующие малотоннажные производства.

### 3. Формирование потенциальных маршрутов доставки малотоннажного СПГ от мест производства до пунктов бункеровки речных судов

При формировании маршрутов доставки газа учитывались следующие параметры: расстояние между производствами СПГ и бункеровочными портопунктами, нагрузка (востребованность) бункеровочных портопунктов, мощность и загрузка комплексов по производству СПГ, наличие автомобильных и железных дорог.

С учётом перечисленных факторов для выполнения расчётов были определены следующие маршруты доставки СПГ (далее — расчётные):

1. КСПГ «Петергоф» (Санкт-Петербург) → Усть-Славянка.

2. КСПГ «Кингисепп» (Кингисепп) → Череповец.

3. КСПГ «Развилка» (Москва) → Ярославль.

4. КСПГ «Канюсята» (Пермь) → Казань.

5. КСПГ «ГРС-4 Екатеринбург» (Екатеринбург) → Самара.

6. КСПГ «Митино» (Новокузнецк) → Барнаул.

### 4. Анализ возможных способов транспортировки СПГ с разработкой цепочек логистических операций по выбранным маршрутам

Существуют два способа доставки газа от заводов-изготовителей до пунктов бункеровки: доставка газа наливом и в танк-контейнерах.

При доставке газа наливом рассмотрены варианты, приведённые на рис. 1.

Способ транспортировки газа наливом распространён, но следует учитывать, что хранить СПГ в цистернах небезопасно и экономически невыгодно. Простой железнодорожных и автомобильных цистерн значительно увеличивает себестоимость доставки груза, поэтому СПГ загружают в цистерну перед отправлением, а сразу после доставки разгружают, перекачивая в резервуар для хранения или осуществляя бункеровку «с колёс», что требует сопоставимости количества доставляемого и бункеруемого топлива и согласованной работы



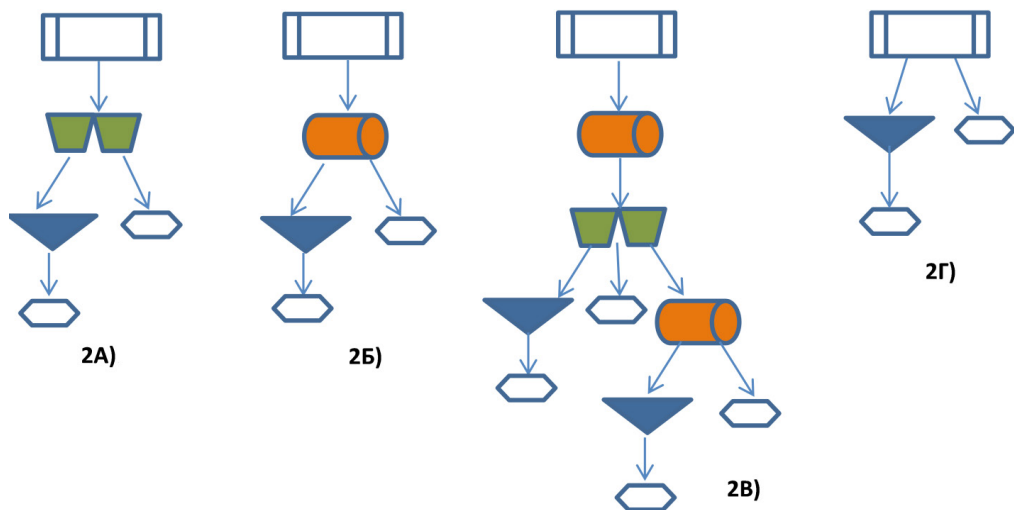


Рис. 2. Варианты доставки СПГ в танк-контейнерах (условные обозначения аналогичны рис. 1).

разных видов транспорта. Согласно ВРД 39-1.10-064-2002 [9] при перевозке СПГ следует избегать или до минимума сокращать число и время стоянок.

Транспортировка СПГ в специализированных цистернах требует дополнительной обработки и перелива, что увеличивает потери продукта и риск аварийности [10–12]. Таким образом, перевалка с автомобильного на железнодорожный транспорт и обратно, при соблюдении соответствующих правил, теоретически возможна, но должна быть экономически обоснована.

При доставке СПГ в контейнерах-цистернах (или танк-контейнерах) рассмотрены варианты, приведённые на рис. 2.

Танк-контейнеры используются на судах-потребителях в режиме сменных модулей, поставляемых «с берега» и с бункеровщика, в качестве которого может выступать судно-контейнеровоз. Танк-контейнер представляет собой контейнер, состоящий из каркаса (рамных элементов) и цистерны, оборудованной сливной арматурой и устройствами для осуществления разгрузки.

Ключевым преимуществом перевозок в танк-контейнерах является возможность транспортировки несколькими видами транспорта и отсутствие необходимости строить специальные дорогостоящие объекты по приёму, хранению и распределению СПГ. Погрузка и разгрузка танк-контейнеров осуществляется при помощи подъёмного крана или ричстакера. Возможно накопление танк-контейнеров на специализиро-

ванных площадках хранения. Поскольку танк-контейнер является одновременно и транспортным средством, и транспортной тарой, отсутствуют потери груза при операциях слива-налива. Но масса транспортируемого продукта в танк-контейнере обычно меньше, чем в цистерне.

#### 5. Допущения при расчётах

После анализа технологии транспортировки и перевалки СПГ, а также условий оплаты логистических услуг компаний-участников для выполнения последующих расчётов были приняты следующие допущения:

- для доставки СПГ наливом:
  - стоимость СПГ на выходе у завода-изготовителя включает стоимость погрузки на выбранный вид транспорта;
  - при доставке специальным автомобильным транспортом стоимость операций слива-налива учитывается в стоимости доставки;
  - при перевозке по железной дороге перегрузочные операции не учитываются в тарифе, их необходимо учитывать отдельно;
  - в работе хранилища учтена стоимость операций слива-налива;
  - в работе бункеровщика учтены операции его заправки и бункеровки судов-потребителей;
  - перевозка в смешанном автомобильно-железнодорожном сообщении является комбинацией схем 1А и 1Б.

- для доставки СПГ в танк-контейнерах:



— стоимость грузовых операций рассчитывается для всех звеньев цепочки поставки СПГ и не включается в стоимость доставки каким-либо видом транспорта;

— перегрузка танк-контейнеров с судна-контейнеровоза на судно-потребитель СПГ выполняется средствами портовой механизации;

— перевозка в смешанном автомобильно-железнодорожном сообщении (2В) является комбинацией схем 2А и 2Б.

Приведённые схемы транспортировки СПГ для наливного и контейнерного способов доставки соответствуют мировой теории и практике организации логистических схем поставки газомоторного топлива [13–18].

Таким образом, для каждого маршрута при наличии всех условий были сформированы ТТС с использованием возможных видов транспорта (автомобильного, железнодорожного, водного) и их комбинаций. Для каждой ТТС составлен перечень необходимых грузовых операций. Для каждого элемента ТТС рассчитана длительность выполнения операции.

#### **6. Критерии выбора оптимальной ТТС доставки СПГ**

В качестве критерия выбора оптимального варианта ТТС доставки СПГ использована цена доставки (Цд) груза для  $i$ -ого расчётного маршрута:

$$Ц_{д_i} = Ц_{п_i} + Ц_{х_i} + Ц_{г_o_i}, \quad (1)$$

где  $Ц_{п_i}$  — цена перевозки груза одним или несколькими видами транспорта по  $i$ -ому расчётному маршруту;

$Ц_{х_i}$  — цена хранения груза (для способа доставки наливом) по  $i$ -ому расчётному маршруту;

$Ц_{г_o_i}$  — цена грузовых операций по  $i$ -ому расчётному маршруту.

Выбирается вариант ТТС с минимальной ценой доставки СПГ.

При равной цене доставки в качестве дополнительного критерия использовано время доставки, а для перевозок в цистернах — третий критерий: количество перевалок.

#### **7. Разработка эксплуатационно-экономических моделей расчёта удельной стоимости перевозки, хранения и перевалки СПГ**

Для расчёта цены доставки СПГ автотранспортом была разработана эксплуатационно-экономическая модель работы

транспортной компании, с помощью которой выполнена оценка структуры затрат транспортной компании и конечной стоимости доставки СПГ для потенциального заказчика. В разработанной модели учтено более 20 статей затрат, в том числе заработная плата, страховые взносы, автомобильное топливо, смазочные материалы, техобслуживание и эксплуатационный ремонт, износ и ремонт автомобильных шин, амортизация подвижного состава, оплата системы «Платон», прочие расходы.

Стоимость доставки железнодорожным транспортом оценивалась по существующим нормативам ОАО «РЖД» [19].

Для оценки стоимости доставки СПГ судами-бункеровщиками различного типоразмера были выполнены укрупнённые расчёты строительной стоимости судна, его расчётной фрахтовой ставки и эксплуатационных затрат, которые были оформлены в виде эксплуатационно-экономической модели работы бункеровщиков на расчётных линиях эксплуатации.

Для оценки стоимости хранения СПГ в стационарном хранилище было выполнено моделирование эксплуатации от 1 до 23 криогенных ёмкостей объёмом 44 м<sup>3</sup>. Расчёт цены хранения СПГ был выполнен по укрупнённым статьям затрат с заданным уровнем рентабельности.

Расчёт цены грузовых операций выполнен с использованием нормативов, применяемых на железнодорожном и автомобильном транспорте, анализа открытых источников по стоимости аренды контейнерных погрузчиков с водителем и сведений о тарифах на перевалку контейнеров по отдельным портам. Полученные данные были формализованы в эксплуатационно-экономическую модель расчёта удельной стоимости грузовых операций.

#### **8. Расчёт цены доставки малотоннажного СПГ по вариантам ТТС**

Для выполнения расчётов был задан суточный объём бункеровки судов-потребителей СПГ, выбран режим работы бункеровщика, подготовлены исходные данные для всех вариантов. Размер грузовых партий соотнесён с вместимостью бункеровщиков и составляет для перевозки в цистернах — 1110 тонн, для перевозки в танк-контейнерах — 1430 тонн. Результаты сгруппированы по способу доставки: на-

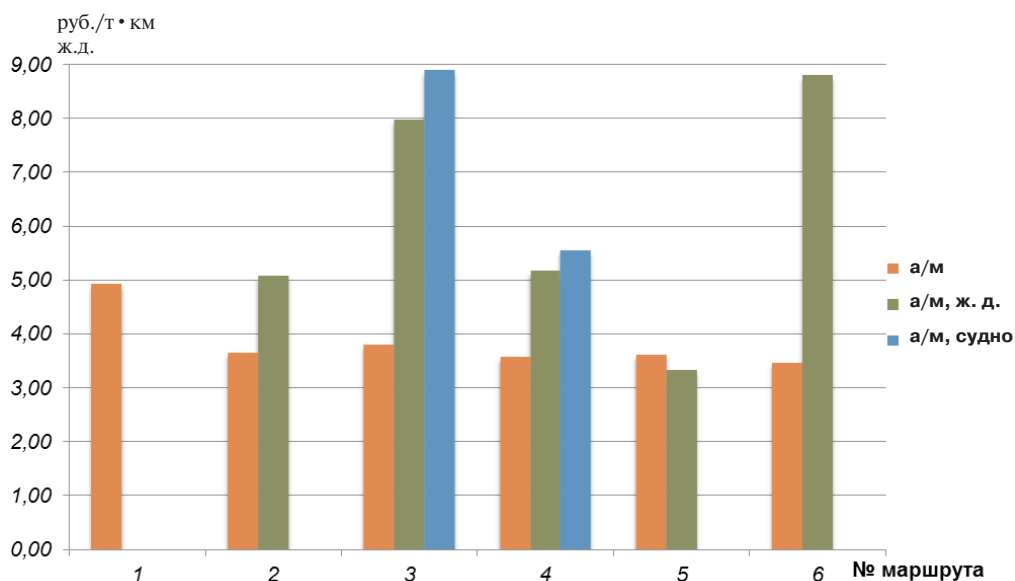


Рис. 3. Тарифная ставка на доставку СПГ в цистернах по вариантам ТТС для расчётных маршрутов.

Таблица 1

Расчёт комплексного тарифа на доставку СПГ в цистернах по вариантам ТТС  
(с учётом НДС)

№	Пункт отправления	Пункт назначения	Вид транспорта	Расстояние, км	Время доставки	Тарифная ставка, руб./т • км
1	г. Санкт-Петербург, КСПГ «Петергоф»	Усть-Славянск	а/м	54	2 ч 15 мин	4,94
2	Ленинградская область, КСПГ «Кингисепп»	Череповецкий порт	а/м	660	9 ч	3,66
			а/м, ж.д.	624	5 сут. 1 ч 15 мин	5,09
3	Москва, МКАД, 24-й км, АО «МГПЗ»	Ярославский порт	а/м	300	6 ч 30 мин	3,81
			а/м, ж.д.	353	5 сут. 1 ч 20 мин	7,99
			а/м, судно	548	1 сут. 17 ч 40 мин	8,90
4	Пермский край, дер. Канюсята, КСПГ «Канюсята»	Казанский порт	а/м	670	9 ч 50 мин	3,58
			а/м, ж.д.	652	5 сут. 2 ч 50 мин	5,17
			а/м, судно	1074	3 сут. 10 ч 40 мин	5,57
5	Екатеринбург, Новосвердловской ТЭЦ промзона	Самарский порт	а/м	1000	15 ч	3,63
			а/м, ж.д.	1163	6 сут. 1 ч 30 мин	3,34
6	Кемеровская область, Новокузнецкий район, КСПГ «Митино»	Барнаульский порт	а/м	360	6 ч	3,48
			а/м, ж.д.	328	4 сут. 3 ч	8,80

ливом (таблица 1, рис. 3) и в танк-контейнерах (таблица 2, рис. 4). Для удобства анализа результатов цена доставки интерпретирована в виде комплексной тарифной ставки, учитывающей стоимость доставки

и грузовых операций. Расчёты выполнены в ценах октября 2018 года.

Расчёты показывают, что высокая стоимость перевалки железнодорожных цистерн делает ТТС с участием железнодо-



Расчёт комплексного тарифа на доставку СПГ в танк-контейнерах по вариантам ТТС (с учётом НДС)

№	Пункт отправления	Пункт назначения	Вид транспорта	Расстояние, км	Время доставки	Тарифная ставка, руб./т • км
1	г. Санкт-Петербург, КСПГ «Петергоф»	Усть-Славянка	а/м	54	1 ч 40 мин	7,81
2	Ленинградская область, КСПГ «Кингисепп»	Череповецкий порт	а/м	660	8 ч 30 мин	4,33
			а/м, ж.д.	647	11 сут. 1 ч 30 мин	3,32
3	Москва, МКАД, 24-й км, АО «МГПЗ»	Ярославский порт	а/м	300	6 ч	4,81
			а/м, ж.д.	355	9 сут. 1 ч 50 мин	4,92
			а/м, судно	548	1 сут. 17 ч 10 мин	5,23
4	Пермский край, дер. Канюсята, КСПГ «Канюсята»	Казанский порт	а/м	670	9 ч 20 мин	4,21
			а/м, ж.д.	647	12 сут. 1 ч 50 мин	3,49
			а/м, судно	1074	3 сут. 10 ч 10мин	3,81
5	Екатеринбург, Новосвердловской ТЭЦ промзона	Самарский порт	а/м	1000	14 ч 30 мин	4,18
			а/м, ж.д.	1168	14 сут. 1 ч	2,40
6	Кемеровская область, Новокузнецкий район, КСПГ «Митино»	Барнаульский порт	а/м	360	5 ч 30 мин	4,33
			а/м, ж.д.	340	9 сут. 2 ч	5,12

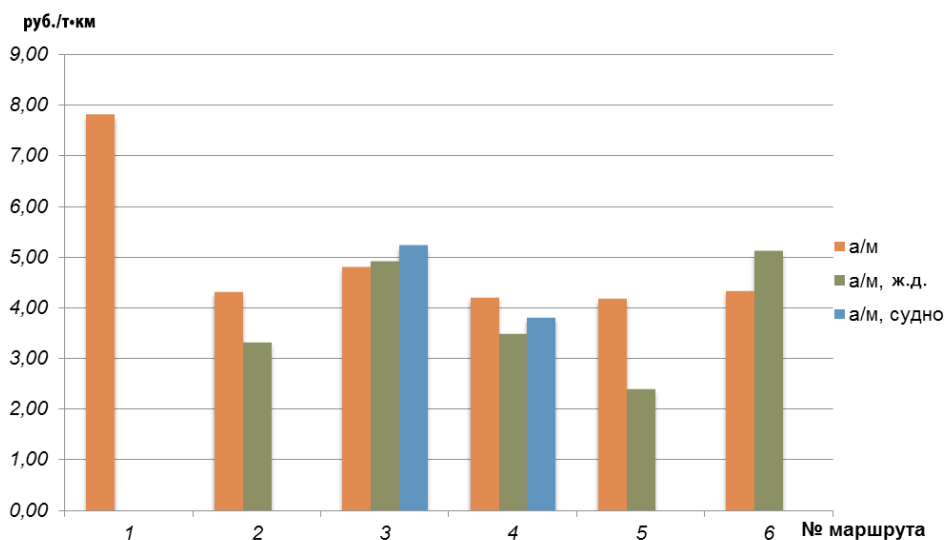


Рис. 4. Тарифная ставка на доставку СПГ в танк-контейнерах по вариантам ТТС для расчётных маршрутов.

рожного транспорта нецелесообразными, если расстояние перевозки по железной дороге составляет менее 1000 км. ТТС в смешанном автомобильно-водном сооб-

щении, как правило, дороже других вариантов ТТС.

Таким образом, за счёт более низкой стоимости грузовых операций при контей-



нерном способе доставки, ТТС с участием железнодорожного транспорта экономичнее при перевозках по железной дороге свыше 600 км. Доставка СПГ водным транспортом конкурентоспособна по отношению к другим видам транспорта

Для обоих способов доставки СПГ по критерию времени доставки выгоднее ТТС в прямом автомобильном сообщении. Затем следуют ТТС с использованием водного транспорта. Наиболее затратны по времени перевозки с участием железнодорожного транспорта.

## ВЫВОДЫ

Разработаны алгоритм выбора оптимальной транспортно-технологической схемы доставки малотоннажного СПГ и эксплуатационно-экономические модели расчёта удельной стоимости перевозки, хранения и перевалки СПГ.

В рамках реализации ведомственного проекта Минпромторга России «Развитие газотопливного флота для навигации в прибрежных водах и на внутренних водных путях» проведена апробация моделей на расчётных маршрутах. Это позволило оценить стоимость транспортировки СПГ по вариантам транспортно-технологических схем для наливного и контейнерного способов доставки и сформулировать частные выводы в отношении оптимальности различных схем по критериям времени и стоимости.

Предложенная методология является в большой мере универсальной и позволяет использовать предложенные подходы для разработки ТТС применительно к другим странам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт Федерального агентства морского и речного транспорта. [Электронный ресурс]: [http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya/deyatelnosti/portyi\\_rf/reestr\\_postavshikov\\_bunkernogo\\_topliva.html](http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya/deyatelnosti/portyi_rf/reestr_postavshikov_bunkernogo_topliva.html). Доступ 19.08.2019.
2. Сайт Российской ассоциации морских и речных бункеровщиков. [Электронный ресурс]: <http://www.mrbunker.ru>. Доступ 19.08.2019.
3. Официальный сайт ПАО «НОВАТЭК». Проект «Ямал-СПГ». [Электронный ресурс]: [http://www.novatek.ru/ru/business/yamal-lng/yamal\\_infrastructure/](http://www.novatek.ru/ru/business/yamal-lng/yamal_infrastructure/). Доступ 19.08.2019.
4. Neftegaz.ru. Проектирование Арктик СПГ-2 начинается. [Электронный ресурс]: <https://neftegaz.ru/news/partnership/204435-proektirovanie-arktik-spg-2-nachinaetsya-uchastie-v-proekte-primet-vniig-im-b-e-vedeneeva/>. Доступ 19.08.2019.
5. Сайт компании Vostock Capital. «Газпром» может начать строительство завода «Владивосток СПГ» в 2020 году. [Электронный ресурс]: <https://www.vostockcapital.com/spg/gazprom-mozhet-nachat-stroitelstvo-zavoda-vladivostok-spg-v-2020-godu/>. Доступ 19.08.2019.
6. Gasworld.ru. В районе Усть-Луги будет реализован крупный проект по переработке и сжижению газа. [Электронный ресурс]: <https://gasworld.ru/ru/news/russia/v-rayone-ust-lugi-budet-realizovan-krupnyy-proekt-po-pererabotke-i-sgigeniyu-gaza/>. Доступ 19.08.2019.
7. Официальный сайт ПАО «НОВАТЭК». «Криогаз-Высоцк» начал серийные отгрузки СПГ. [Электронный ресурс]: [http://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id\\_4=3171](http://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id_4=3171). Доступ 19.08.2019.
8. Сайт технологического инжинирингового холдинга «Петон». Комплекс по производству, хранению и отгрузке сжиженного природного газа в районе КС «Портовая». [Электронный ресурс]: <http://www.peton.ru/project.php?p=412>. Доступ 19.08.2019.
9. ВРД 39-1.10-064-2002 Оборудование для сжиженного природного газа (СПГ). Общие технологические требования при эксплуатации систем хранения, транспортирования и газификации.
10. Сетевое издание «Нефтегазовое дело». [Электронный ресурс]: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN_1.pdf). Доступ 19.08.2019.
11. Сетевое издание «Нефтегазовое дело». [Электронный ресурс]: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN\\_2.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN_2.pdf). Доступ 19.08.2019.
12. Научно-технический сборник «Вести газовой науки». [Электронный ресурс]: <http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/vgn-ecology-2017-077-087.pdf>. Доступ 19.08.2019.
13. Брагинский О. Б. Нефтегазовый комплекс мира. — М.: Изд. «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2006. — 640 с.
14. Федорова Е. Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование: Монография. — М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2011. — 159 с.
15. Пронин Е. Н. Использование сжиженного природного газа на водном транспорте. — СПб., 2016. — 44 с. [Электронный ресурс]: [http://gazpronin.ru/LNG\\_Bunkering\\_Rview\\_2016.05.04.pdf](http://gazpronin.ru/LNG_Bunkering_Rview_2016.05.04.pdf). Доступ 19.08.2019.
16. Возможности и перспективы развития малотоннажного СПГ в России. Московская школа управления Сколково, 2018. — 187 с. [Электронный ресурс]: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_2018.07.23.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_2018.07.23.pdf). Доступ 19.08.2019.
17. 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.
18. 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.
19. Онлайн-сервис «Расчёт провозной платы за пользование инфраструктурой ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]: <http://rpp.rzd.ru/Rzd>. Доступ 19.08.2019.





# Logistics of Low-Tonnage LNG



Lyudmila N. BUYANOVA



Olga M. MUDROVA

*Buyanova, Lyudmila N. – JSC Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, Russia.  
Mudrova, Olga M. – JSC Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, Russia\*.*

## ABSTRACT

In recent years, there has been an increasing interest in liquefied natural gas (LNG) as a bunker fuel for ships. This is due to a number of reasons of environmental (reduction of sulfur emissions by vessels in accordance with MARPOL 73/78 international convention), economic (lower price of LNG compared to distillate fuels meeting MARPOL 73/78 requirements), technical and economic (reduction of maintenance costs of vessels and an increase in service life) character. These conclusions regarding LNG are applicable to vessels of various types intended for sea and river navigation.

At the same time, the transition of river ships and coastal vessels to LNG bunkering is currently being restrained, including in Russia, by a number of reasons, one of which is weak logistics support for LNG delivery from production sites to vessel bunkering points. As a result, the development of LNG vessel bunkering market requires improvement of logistics for delivery of low-

tonnage LNG, which can be carried out using several modes of transport.

The objective of the study is to develop a practical algorithm for estimating the cost of LNG transportation for vessel bunkering, taking into account the characteristics of intermodal logistics. The research methodology is based on an analytical method based on a system-structural approach.

At the example of Russia, an algorithm has been developed for choosing the optimal transport and technological scheme (TTS) for delivering low-tonnage LNG and operational and economic models for calculating the unit cost of transportation, storage and transshipment of LNG.

Testing the models on the calculated routes allowed to estimate the cost of LNG transportation according to the options of transport and technological schemes for bulk and container delivery methods and draw conclusions. Moreover, the methodology used is to a large extent universal and allows using the proposed approaches for development of TTS in relation to other countries.

**Keywords:** transportation, river and sea vessels, inland water transport, LNG, logistics, transport and technological scheme, delivery price, operational and economic model, bunkering, tank, tank container, tariff.

\*Information about the authors:

**Buyanova, Lyudmila N.** – D.Sc. (Economics), professor, leading researcher of JSC Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, Russia, [buyanova.n@yandex.ru](mailto:buyanova.n@yandex.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](mailto:MudrovaOM@cniimf.ru).

Article received 13.05.2019, accepted 19.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 166

**Introduction.** The interest in liquefied natural gas (LNG) as a bunker fuel for vessels has increased significantly in recent years for many reasons:

- the use of LNG will make it possible to fulfill the requirements of MARPOL 73/78 Annex VI to the International Convention on Reduction of Sulfur Emission by Ships (from January 1, 2020, the sulfur content in marine fuel in all regions of the world should not exceed 0,5 % by weight);
- lower cost of LNG compared to distillate fuels satisfying the requirements of the Convention;
- the presence of a number of technical factors that reduce the costs of maintaining vessels in operation: the absence of the need for purification of waste gases from  $\text{SO}_x$  due to the absence of sulfur in LNG, a significant reduction in the content of  $\text{NO}_x$  in the exhaust gases of power plants, and the almost complete absence of solid particles in the exhaust gases. This allows to avoid installation of selective catalytic reaction reactors and of traps to collect soot on the vessel. In general, there is an increase in the motor resource of piston engines and a decrease in carbon formation in them.

At the same time, the transition of vessels to LNG bunkering is currently constrained by a number of reasons, including the weak logistics of LNG delivery from production sites to vessel bunkering points. For a wide conversion of vessels to LNG, it is necessary that the bunkering process of LNG vessels does not cause serious problems for shipowners.

This issue is particularly relevant for the gas fuelled fleet used for navigation in coastal waters and on inland waterways.

The *objective* of the study was to develop a practical algorithm for estimating the cost of LNG transportation for bunkering of river vessels, taking into account the features of intermodal logistics.

The research *methodology* is based on an analytical method applied through a system-structural approach. For testing, empirical and forecast data were used in relation to the Russian Federation.

## Results

The achievement of the research objective was carried out in the following sequence.

### 1. Research on the geography of location of points of liquid oil fuel bunkering operations of inland vessels

Based on the data from the Register of Bunkering Fuel Suppliers [1] and the Russian

Association of Sea and River Bunkering Companies [2], a list of ports of river ships bunkering has been compiled.

Following the results of the study, the most demanded currently ports of bunkering river vessels with liquid oil fuel were identified.

Currently, bunkering of river vessels is carried out at points located on the rivers of the Single Deepwater System of the European part of Russia, the rivers of Siberia and the Far East. Most bunkering companies operate in the river ports of Cherepovets, Yaroslavl, Nizhny Novgorod, Kazan, Samara, Volgograd.

### 2. Research on the geography of location of natural gas liquefaction complexes

Natural gas liquefaction complexes (NGLC) depending on the annual volume of production are divided into large-capacity, medium-capacity and small-capacity ones.

The existing large-capacity plants (for example, the gas liquefaction plant within Yamal-LNG project is located in the port of Sabetta) are focused only on export of LNG using large-capacity gas carriers (Christophe de Margerie type of the project Yamalmax with a capacity of 170 thousand  $\text{m}^3$ ) [3]. Promising projects, such as Arctic LNG-2, Vladivostok LNG, and NGLC in Ust-Luga (former Baltic LNG) [4–6], suggest the possibility of bunkering of sea vessels.

Starting in 2019, medium-tonnage LNG production will be deployed mainly in the North-West of Russia. This is Cryogas-Vysotsk project with a capacity of 660 thousand tons of LNG per year [7] and LNG terminal of PJSC Gazprom in the vicinity of Portovaya compressor station with a capacity of 1,5 million tons of LNG per year [8].

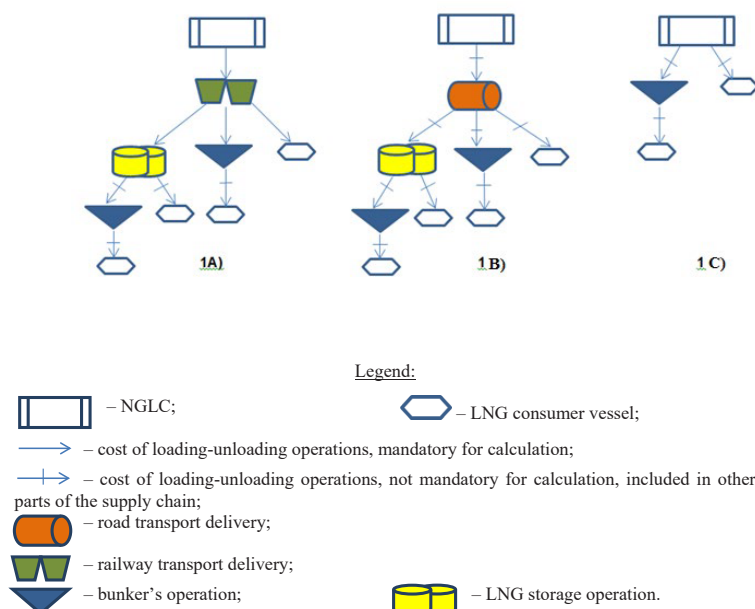
Thirteen small-capacity production sites operate in Russia: six are concentrated in the North-West economic region, three in the Urals, two in the West Siberian region and two in the Far East. In the coming years, four more plants are scheduled to be launched.

For the purpose of this study, and to explore LNG delivery routes we consider existing small-capacity facilities.

### 3. Development of potential routes for delivery of low-tonnage LNG from places of production to bunkering points of river vessels

When forming gas delivery routes, the following parameters were taken into account: distance between LNG production sites and bunkering port points, the load (demand) of bunkering port points, the capacity and loading





**Pic. 1. Options of LNG delivery in tanks.**

of LNG production complexes, and availability of roads and railways.

Given the above factors, the following LNG delivery routes (hereinafter referred to as «calculated») were determined for the calculations:

1. NGLC Petergof (St. Petersburg) → Ust-Slavyanka;
2. NGLC Kingisepp (Kingisepp) → Cherepovets;
3. NGLC Razvilka (Moscow) → Yaroslavl;
4. NGLC Kanyusyata (Perm) → Kazan;
5. NGLC GRS-4 Yekaterinburg (Yekaterinburg) → Samara;
6. NGLC Mitino (Novokuznetsk) → Barnaul.

#### **4. Analysis of possible methods of LNG transportation with development of logistics operation chains for the selected routes**

There are two ways to deliver gas from manufacturers to bunkering points: gas delivery in bulk and in tank containers.

When delivering gas in bulk, the options shown in Pic. 1 are available.

A method of transporting gas in bulk is common, but it should be borne in mind that storing LNG in tanks is unsafe and not economically viable. Downtime of railway and automobile tanks significantly increases the cost of cargo delivery, so LNG is loaded into the tank before departure, and immediately

after delivery it is unloaded by transferring it to the storage tank or by bunkering «from the wheels», which requires a comparable amount of delivered and bunkered fuel and coordinated work of different modes of transport. According to VRD39-1.10-064-2002 [9], when transporting LNG, the number and time of parking should be avoided or minimized.

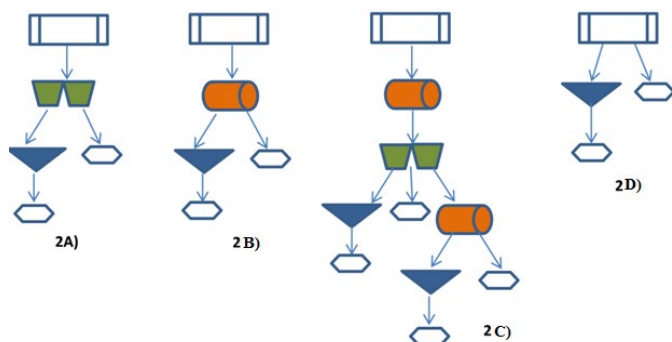
LNG transportation in specialized tanks requires additional processing and transshipment, which increases product losses and the risk of accidents [10–12]. Thus, transshipment from road to railway transport and vice versa, subject to the relevant rules, is theoretically possible, but should be economically justified.

When delivering LNG in tank containers, the options shown in Pic. 2 are considered.

Tank containers are used on fuelled vessels in the mode of interchangeable modules delivered «from the shore» and from a bunkering vessel, which can be a container ship. A tank container is a container consisting of a frame (frame elements) and a tank equipped with drain valves and devices for unloading.

The key advantage of transporting LNG in tank containers is the ability to transport it by several modes of transport and the absence of the need to build special expensive facilities for reception, storage and distribution of LNG. Tank containers are loaded and unloaded using a crane or a reach stacker. The accumulation





**Pic. 2. Options of LNG delivery in tank containers (legend is the same as in Pic. 1).**

of tank containers at specialized storage sites is possible. Since a tank container is both a vehicle and a transport container, there are no cargo losses during loading and unloading operations. But mass of a transported product in a tank container is usually less than in a tank.

### 5. Calculation assumptions

After analyzing the technology of transportation and transshipment of LNG, as well as the terms of payment for the logistics services of participating companies, the following *assumptions* were made for subsequent calculations:

- for LNG delivery in bulk:
  - cost of LNG when leaving manufacturer's plant includes the cost of loading on the selected mode of transport;
  - upon delivery by special motor transport, the cost of loading and unloading operations is included in the cost of delivery;
  - when transported by rail, transshipment operations are not included in the tariff, they must be taken into account separately;
  - storage operations include costs of loading and unloading operations;
  - bunker operation includes its refueling and bunkering of fuelled vessels;
  - transportation in mixed road-rail traffic is a combination of schemes 1A and 1B.
- for LNG delivery in tank containers:
  - the cost of freight operations is calculated for all segments of LNG supply chain and is not included in the cost of delivery by any single mode of transport;

- reloading of tank containers from a container ship to a LNG consumer ship is performed by port mechanization facilities;
- transportation in mixed road-rail traffic (2C) is a combination of schemes 2A and 2B.

The above LNG transportation schemes for bulk and container delivery methods correspond to the world theory and practices of organizing

logistic schemes for supply of motor gas fuel [13–18].

Thus, for each route, with respect to all the conditions, transport and technological schemes (TTS) were developed using possible modes of transport (road, rail, water) and their combinations. A list of necessary freight operations has been compiled for each TTS. For each TTS element, duration of the operation was calculated.

### 6. Selection criteria for optimal TTS of LNG delivery

As a criterion for choosing the best option for TTS of LNG delivery, the delivery price ( $P_d$ ) of cargo for the  $i$ -th calculated route was used:

$$P_{d_i} = P_{t_i} + P_{s_i} + P_{co_i}, \quad (1)$$

where  $P_{t_i}$  – price of transportation of goods by one or more modes of transport along the  $i$ -th calculated route;

$P_{s_i}$  – price of storage of cargo (for the method of delivery in bulk) along the  $i$ -th calculated route;

$P_{co_i}$  – price of cargo operations along the  $i$ -th calculated route.

A TTS option is selected by a minimum LNG delivery price.

For the equal delivery price, the delivery time was used as an additional criterion, and for transportation in tanks the number of transshipment operations was used as the third criterion.

### 7. Development of operating and economic models for calculating the specific cost of transportation, storage and transshipment of LNG

To calculate the price of LNG delivery by road, an operational and economic model of the transport company operation was developed, with the help of which the cost structure of the transport company and the final cost of LNG delivery for the potential customer were estimated. The developed model takes into account more than 20 cost items, including



**Table 1**
**Calculation of the integrated tariff for LNG delivery in tanks according to TTS options (including VAT)**

No.	Departure point	Destination point	Mode of transport	Distance, km	Delivery time	Tariff rate, rub./t • km
1	St. Petersburg, NGLC Petergof	Ust-Slavyanka	road	54	2 h 15 min	4,94
2	Leningrad region, NGLC Kingisepp	Cherepovets port	road	660	9 h	3,66
			road, railway	624	5 day 1 h 15 min	5,09
3	Moscow, MKAD [Moscow Ring Road], 24 <sup>th</sup> km, JSC MGPZ	Yaroslavl port	road	300	6 h 30 min	3,81
			road, railway	353	5 day 1 h 20 min	7,99
			road, vessel	548	1 day 17 h 40 min	8,90
4	Perm region, village Kanyusyata, NGLC Kanyusyata	Kazan port	road	670	9 h 50 min	3,58
			road, railway	652	5 day 2 h 50 min	5,17
			road, vessel	1074	3 day 10 h 40 min	5,57
5	Yekaterinburg, Novosverdlovskaya TPP [thermal power plant] industrial zone	Samara port	road	1000	15 h	3,63
			road, railway	1163	6 day 1 h 30 min	3,34
6	Kemerovo region, Novokuznetsk district, NGLC Mitino	Barnaul port	road	360	6 h	3,48
			road, railway	328	4 day 3 h	8,80

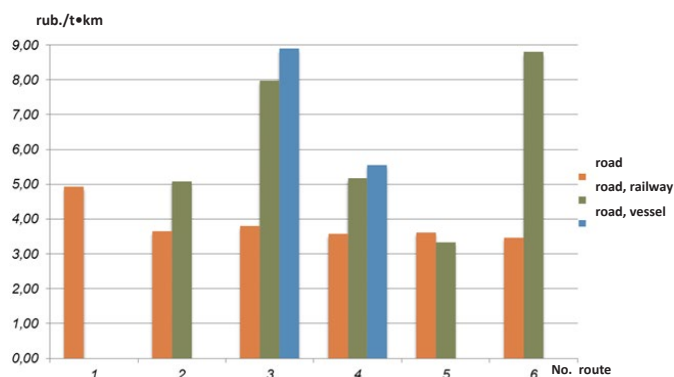
**Table 2**
**Calculation of the integrated tariff for LNG delivery in tank containers according to TTS options (including VAT)**

No.	Departure point	Destination point	Mode of transport	Distance, km	Delivery time	Tariff rate, rub./t • km
1	St. Petersburg, NGLC Petergof	Ust-Slavyanka	road	54	1 h 40 min	7,81
2	Leningrad region, NGLC Kingisepp	Cherepovets port	road	660	8 h 30 min	4,33
			road, railway	647	11 day 1 h 30 min	3,32
3	Moscow, MKAD, 24 <sup>th</sup> km, JSC MGPZ	Yaroslavl port	road	300	6 h	4,81
			road, railway	355	9 day 1 h 50 min	4,92
			road, vessel	548	1 day 17 h 10 min	5,23
4	Perm region, village Kanyusyata, NGLC Kanyusyata	Kazan port	road	670	9 h 20 min	4,21
			road, railway	647	12 day 1 h 50 min	3,49
			road, vessel	1074	3 day 10 h 10 min	3,81
5	Yekaterinburg, Novosverdlovskaya TPP industrial zone	Samara port	road	1000	14 h 30 min	4,18
			road, railway	1168	14 day 1 h	2,40
6	Kemerovo region, Novokuznetsk district, NGLC Mitino	Barnaul port	road	360	5 h 30 min	4,33
			road, railway	340	9 day 2 h	5,12

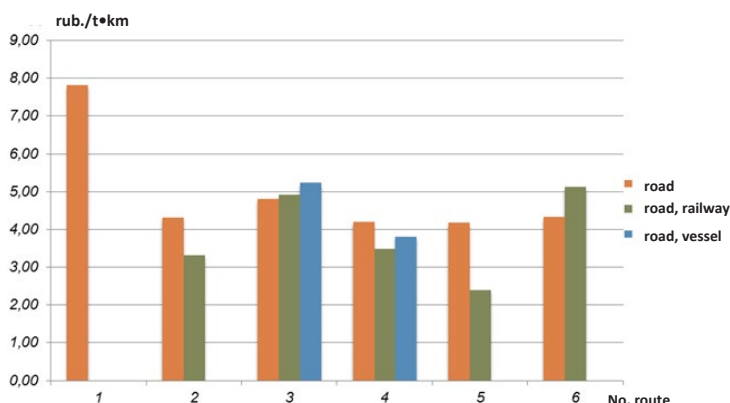
wages, insurance premiums, car fuels, lubricants, maintenance and service repairs, tire wear and tear, depreciation of rolling stock, payment for Platon system [toll road payment, from Russian abridged «payment per ton»] and other expenses.

The cost of delivery by rail was estimated according to existing standards of JSC Russian Railways [19].

In order to estimate the cost of LNG delivery by bunkering vessels of various sizes, large-scale calculations of the vessels' construction cost, its estimated freight rate and operating costs were performed, which were framed in the form of an operational-economic model of the operation of bunkering vessels on the calculated lines of operation.



**Pic. 3. Tariff rate for LNG delivery in tanks according to TTS options for calculated routes.**



**Pic. 4. Tariff rate for LNG delivery in tank containers according to TTS options for calculated routes.**

To estimate the cost of LNG storage in a stationary storage tank, we simulated the operation of 1 to 23 cryogenic tanks with a volume of 44 m<sup>3</sup>. The calculation of the LNG storage price was carried out using enlarged cost items with a given level of profitability.

The calculation of the price of cargo operations was carried out using the standards applicable in rail and road transport, an analysis of open sources for the cost of renting container trucks with a driver, and information on tariffs for transshipment of containers at specific ports. The data obtained were formalized into an operational and economic model for calculating the unit cost of cargo operations.

#### 8. Calculation of the price of delivery of low-tonnage LNG using different TTS options

To carry out the calculations, the daily bunkering volume of LNG consumer vessels was set, the bunkering mode of operation were selected, and the initial data for all options were prepared. The size of cargo lots is correlated with capacity of bunkers and amounts to 1110 tons

for transportation in tanks, 1430 tons for transportation in tank containers. The results are grouped by delivery method: in bulk (Table 1, Pic. 3) and in tank containers (Table 2, Pic. 4). For convenience of analyzing the results, the delivery price is interpreted in the form of an integrated tariff rate, taking into account the cost of delivery and cargo operations. The calculations were made using October 2018 prices.

Calculations show that the high cost of transshipment of railway tanks makes TTS with participation of railway transport impractical if the distance of transportation by railway is less than 1000 km. TTS in mixed road/water traffic is usually more expensive than other TTS options.

Thus, due to the lower cost of cargo operations using a containerized method of delivery, TTS involving railway transport is more economical when LNG is transported by rail over 600 km. LNG delivery by water is competitive with regard to other modes of transport.

For both methods of LNG delivery, according to the criterion of delivery time, TTS



using direct road traffic is more advantageous, followed by TTS using water transport. Transportation involving railway transport is most time-consuming.

**Conclusions.** An algorithm has been developed for choosing an optimal transport and technological scheme for delivery of low-tonnage LNG. Operational and economic models for calculating the unit cost of transportation, storage and transshipment of LNG have been suggested.

As part of the departmental project of the Ministry of Industry and Trade of Russia «Development of gas fuelled fleet for navigation in coastal waters and inland waterways», models were tested on calculated routes. This made it possible to estimate the cost of LNG transportation according to the options of transport and technological schemes for bulk and container delivery methods and to formulate particular conclusions regarding optimality of various schemes according to the criteria of time and cost.

The proposed methodology is largely universal and allows the use of the proposed approaches for development of TTS in relation to other countries.

## REFERENCES

1. Website of the Federal Agency for Sea and River Transport. [Electronic resource]: [http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya\\_deyatelnosti/portyi\\_rf/reestr\\_postavshikov\\_bunkernogo\\_topлива.html](http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/reestr_postavshikov_bunkernogo_topлива.html). Last accessed 19.08.2019.
2. Website of the Russian Association of Sea and River Bunkering. [Electronic resource]: <http://www.mrbunker.ru>. Last accessed 19.08.2019.
3. The official website of PJSC NOVATEK. «Yamal-LNG» project. [Electronic resource]: [http://www.novatek.ru/ru/business/yamal-lng/yamal\\_infrastructure/](http://www.novatek.ru/ru/business/yamal-lng/yamal_infrastructure/). Last accessed 19.08.2019.
4. Neftegaz.ru. Design of Arctic LNG-2 begins [Neftegaz.RU. Proektirovanie Arktik SPG-2 nachinaetsya]. [Electronic resource]: <https://neftegaz.ru/news/partnership/204435-proektirovanie-arktik-spg-2-nachinaetsya-uchastie-v-proekte-primet-vniig-im-b-e-vedeneeva/>. Last accessed 19.08.2019.
5. Website of Vostock Capital. Gazprom may begin construction of Vladivostok LNG plant in 2020 [«Gazprom» mozhet nachat' stroitelstvo zavoda «Vladivostok SPG» v 2020 godu]. [Electronic resource]: <https://www.vostockcapital.com/spg/gazprom-mozhet-nachat-stroitelstvo-zavoda-vladivostok-spg-v-2020-godu/>. Last accessed 19.08.2019.
6. Gasworld.ru. A large project on gas processing and liquefaction will be implemented in Ust-Luga region [Gasworld.ru. V raione Ust-Lugi budet realizovan krupnyy projekt po pererabotke i szhizheniyu gaza]. [Electronic resource]: <https://gasworld.ru/ru/news/russia/v-rayone-ust-lugi-budet-realizovan-krupnyy-proekt-po-pererabotke-i-szhizheniyu-gaza/>
7. Official website of PJSC NOVATEK. «Cryogas-Vysotsk» began serial shipments of LNG [«KRIOGAZ-Vysotsk» nachal seriinnye otgruzki SPG]. [Electronic resource]: [http://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id\\_4=3171](http://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id_4=3171). Last accessed 19.08.2019.
8. Website of the technological engineering holding Peton. Complex for the production, storage and shipment of liquefied natural gas in the area of CS Portovaya [Kompleks po proizvodstvu, khraneniuyu i otgruzke szhizhennogo prirodnogo gaza v raione KS «Portovaya»]. [Electronic resource]: <http://www.peton.ru/project.php?p=412>. Last accessed 19.08.2019.
9. VRD39-1.10-064-2002 Equipment for liquefied natural gas (LNG). General technological requirements for operation of storage, transportation and gasification systems [VRD39-1.10-064-2002 Oborudovanie dlya szhizhennogo prirodnogo gaza (SPG). Obshchie tekhnologicheskie trebovaniya pri ekspluatatsii sistem khraneniya, transportirovki i gazifikatsii].
10. Network publication «Oil and Gas Business» [Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo»]. [Electronic resource]: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN_1.pdf). Last accessed 19.08.2019.
11. Network publication «Oil and Gas Business» [Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo»]. [Electronic resource]: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN\\_2.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KrasnogorskayaNN/KrasnogorskayaNN_2.pdf). Last accessed 19.08.2019.
12. Scientific and technical collection «News of gas science» [Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik «Vesti gzovoi nauki»]. [Electronic resource]: <http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/vgn-ecology-2017-077-087.pdf>. Last accessed 19.08.2019.
13. Braginsky, O. B. Oil and gas complex of the world [Neftegazoviy kompleks mira]. Moscow, Neft' i gas publ. of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2006, 640 p.
14. Fedorova, E. B. Current state and development of the global industry of liquefied natural gas: technology and equipment: Monograph [Sovremennoe sostoyanie i razvitiye mirovoi industrii szhizhennogo prirodnogo gaza: tekhnologii i oborudovanie: Monografiya]. Moscow, Neft' i gas publ., of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2011, 159 p.
15. Pronin, E. N. The use of liquefied natural gas in water transport [Isopolzovanie szhizhennogo prirodnogo gaza na vodnom transporte]. St. Petersburg, 2016, 44 p. [Electronic resource]: [http://gazpronin.ru/LNG\\_Bunkering\\_Rview\\_2016.05.04.pdf](http://gazpronin.ru/LNG_Bunkering_Rview_2016.05.04.pdf). Last accessed 19.08.2019.
16. Opportunities and prospects for development of small-capacity LNG in Russia [Vozmozhnosti i perspektivy razvitiya malotonnazhnogo SPG v Rossii]. Moscow School of Management Skolkovo, 2018, 187 p. [Electronic resource]: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEnC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_2018.07.23.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEnC/Research/SKOLKOVO_EneC_2018.07.23.pdf). Last accessed 19.08.2019.
17. Matskevich, V. A., Romanov, R. Yu., Lutskevich, A. M., Tarovik, O. V., Dekhtyaruk, Yu. D., Korableva, M. S. Prospects for transportation of liquefied oil gas by vessels of mixed river-sea navigation [Perspektivy transportirovki szhizhennogo neftyznogo gaza sudami smeshannogo «reka—more» plavaniya]. Sudostroenie, 2011, Iss. 6, pp. 13–17.
18. International code for construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC Code). St. Petersburg, TsNII MF publ., 2016, 474 p.
19. Online service «Calculation of freight charges for the use of infrastructure of JSC Russian Railways [«Raschet provoznoi platy za polzovanie infrastrukturoi OAO «RZD»]. [Electronic resource]: <http://rpp.rzd.ru/Rzd>. Last accessed 19.08.2019.





## **ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТ 182, 196**

*Как работает новая система управления общественным транспортом?  
Сколько такси нужно жителям мегаполисов?*

## **ГРУЗОВЫЕ ПЕРЕВОЗКИ 208**

*Какой груз на данный момент «главнее», кто должен приехать первым? На эти вопросы должна ответить система динамического пропуска составов.*

## **АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ 218**

*Геонавигация, информационно-пространственные модели, компьютеризированный диспетчерский контроль и... Крайний Север.*

## **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ 232**

*Автоматизированная тестовая диагностика узлов как часть цифровой железной дороги: анализ и обобщение опыта создают почву для новых решений.*

## **ИННОВАЦИИ 244**

*Экосистемы для развития инноваций и внедрения их результатов: лучшие российские и зарубежные практики.*

## **URBAN TRANSIT 189, 202**

*How does the new public urban transit management system work?  
How many taxicabs do the megalopolis residents need?*

## **FREIGHTAGE 213**

*Which shipment is more important for the moment?  
Which train should come first?  
The system of dynamic routing and dispatching of the train sets should answer those questions.*

## **ROAD VEHICLES 225**

*Global positioning systems, geographic information models, computerised dispatching, and... Extreme North.*

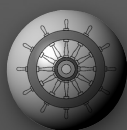
## **ROLLING STOCK 238**

*Digitalised test troubleshooting of the components can be deemed a part of the digital railway: overview of practices and approaches along with their analysis create a basis for new solutions.*

## **INNOVATION 252**

*Ecosystems for innovation development and implementation of the results: best Russian and global practices.*

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ • ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL





# Кластерный анализ маршрутов новой модели управления наземным городским пассажирским транспортом общего пользования



Максим КУДРЯШОВ



Радион АЙРИЕВ



Георгий ОВНАНЯН

*Кудряшов Максим Александрович – ГУП «Мосгортранс», Москва, Россия.*

*Айриев Радион Саркисович – ГУП «Мосгортранс», Москва, Россия.*

*Овнанян Георгий Мигранович – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия\*.*

В Москве внедрена новая модель управления наземным городским пассажирским транспортом (НМУ). В целях постоянного мониторинга качества транспортного обслуживания населения предполагается внедрить методику его оценки.

Её апробацию предполагается проводить на маршрутах, обслуживаемых коммерческими предприятиями в рамках государственных контрактов на оказание услуг по обеспечению транспортного обслуживания населения автомобильным транспортом общего пользования на маршрутах регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом в городском сообщении.

Исходя из этого, целью исследования явился выбор объектов в целях проведения апро-

бации методики оценки качества транспортного обслуживания населения наземным городским пассажирским транспортом общего пользования (НГПТ) на маршрутах, обслуживаемых в рамках НМУ.

Выполнено научно обоснованное разбиение заданной выборки маршрутов.

Маршруты классифицированы с использованием классического метода иерархического кластерного анализа, где в качестве меры близости использовано евклидово расстояние с одиночным правилом объединения кластеров. Процедура кластеризации выполнена с использованием метода Варда.

По результатам выполненного кластерного анализа выбрано десять маршрутов, подлежащих дальнейшему анализу.

**Ключевые слова:** городской транспорт, управление, новая модель управления наземным городским пассажирским транспортом, кластерный анализ.

\*Информация об авторах:

**Кудряшов Максим Александрович** – начальник сектора службы кадров ГУП «Мосгортранс», Москва, Россия, sparky5@yandex.ru.

**Айриев Радион Саркисович** – советник заместителя генерального директора ГУП «Мосгортранс», Москва, Россия, ayrievrs@mail.ru.

**Овнанян Георгий Мигранович** – магистрант кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, georgy.ovnanayan@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 06.12.2018, принята к публикации 25.04.2019.

For the English text of the article please see p. 189.

## НОВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМ ГОРОДСКИМ ПАССАЖИРСКИМ ТРАНСПОРТОМ

Система городского пассажирского транспорта является важнейшей социальной сферой города Москвы. От эффективности её функционирования зависят качество жизни населения и продуктивность работы различных отраслей экономики. Совершенствование системы транспортного обслуживания населения требует реализации комплексных исследований по оценке, анализу и выявлению актуальных проблем организации перевозок пассажиров и багажа на территории города [1, с. 1–9; 2, с. 1–14].

В условиях роста автомобилизации и количества индивидуальных поездок в городе к системе городского пассажирского транспорта общего пользования предъявляются требования по повышению качества транспортного обслуживания населения.

Работа транспорта общего пользования должна соответствовать всем нормативно-правовым требованиям по обеспечению безопасности экологии, дорожного движения и пассажирских перевозок.

На основании анализа текущего состояния системы городского пассажирского транспорта в Москве, проведённых ранее научных исследований и передового опыта развития транспортных систем городов мира Департаментом транспорта и развитием дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы разрабатывается ряд мер, реализация которых позволит существенно повысить качество и безопасность работы транспорта общего пользования в столице.

Важнейшим направлением повышения качества транспортного обслуживания населения наземным городским пассажирским транспортом общего пользования (НГПТ) является переход в городе Москве на новую модель управления НГПТ (НМУ НГПТ), предусматривающую оказание услуг по транспортному обслуживанию населения на муниципальных маршрутах регулярных перевозок пассажиров и багажа в рамках государственных контрактов.

НМУ НГПТ предусматривает интеграцию частных автотранспортных предприятий в систему транспорта общего пользо-

вания города с переходом на единые стандарты оказания населению транспортных услуг.

Допуск коммерческих автотранспортных предприятий к работе на маршрутах регулярных перевозок в городском сообщении осуществлён на основе государственных контрактов на транспортное обслуживание населения по результатам проведения открытых конкурсов.

С переходом на НМУ НГПТ разработана и внедрена новая маршрутная сеть с учётом устранения дублирующих маршрутов, снижения загруженности транспортной сети, сокращения интервалов движения и последующей корректировки расписания движения. Для каждого маршрута подобран оптимальный класс подвижного состава.

Согласно требованиям [3, Приложение 1, с. 1] весь подвижной состав должен соответствовать экологическому классу не ниже «Евро-4», быть адаптирован для перевозки маломобильных групп населения, оборудован кондиционерами, системами отопления, указателями маршрутов и информационными табло, бортовыми навигационно-связными терминалами, радиостанциями, системой видеонаблюдения и т.д.

Контроль за качеством оказания транспортных услуг осуществляется в автоматическом режиме контроля работы подвижного состава на линии в части соблюдения трассы следования маршрута, выполнения расписания, соответствия вида подвижного состава установленному в параметрах перевозок, чистоты салона, исправности аппарели для маломобильных групп населения, применения единого билета, соблюдения скоростного режима и т.д.

Уровень качества транспортных услуг, предоставляемых населению частными перевозчиками, должен быть не ниже, чем на маршрутах, обслуживаемых государственным перевозчиком.

Всего на аукционы были выставлены 211 маршрутов по 63 лотам, победителями которых стали восемь частных компаний-перевозчиков, заключивших государственные контракты на транспортное обслуживание населения сроком на пять лет [3].

Основным автотранспортным предприятием, обслуживающим маршруты



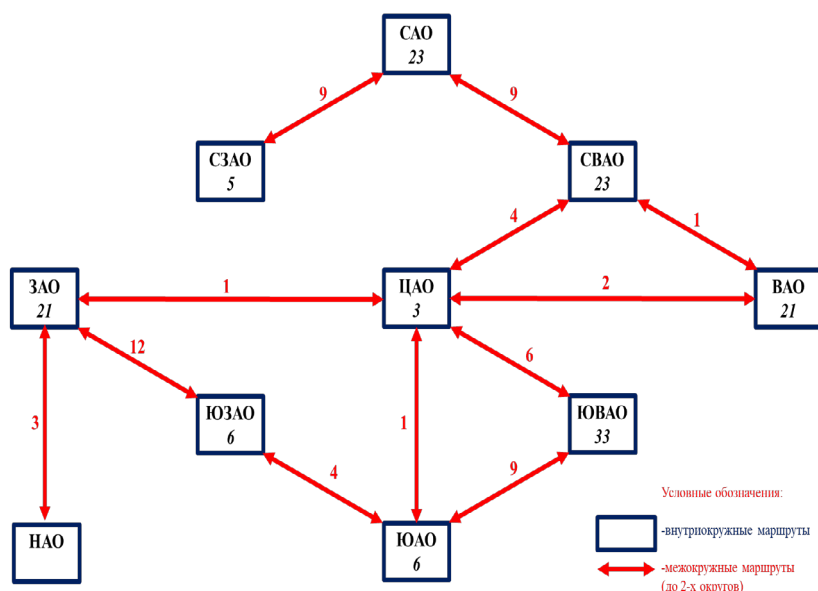


Рис. 1. Граф трасс следования маршрутов.

в рамках государственных контрактов, является ООО «Трансавтолиз», входящее в группу компаний «Автолайн».

Выполненный анализ параметров перевозок [3, Приложение 3] и Реестра [4] в части трасс следования маршрутов НМУ НГПТ в разрезе по округам показал, что: 141 маршрут обслуживает по одному округу, 61 маршрут обслуживает по два смежных округа (рис. 1) и 9 маршрутов обслуживают по три и более округов города Москвы. Наибольшее количество трасс следования внутриокружных маршрутов приходится на ЮВАО (33 маршрута), наименьшее — на ЦАО (3 маршрута). Общая протяжённость трасс следования маршрутов составляет более 3600 км [3, 4]. При этом 43 % маршрутов обслуживаются автобусами малого класса.

## ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является выбор объектов в целях проведения апробации методики оценки качества транспортного обслуживания населения наземным городским пассажирским транспортом общего пользования на маршрутах, обслуживаемых в рамках новой модели управления наземным городским пассажирским транспортом.

Апробацию методики оценки качества транспортного обслуживания населения в соответствии со Стандартом [5, 6] предполагается проводить на маршрутах, обслуживаемых коммерческими предприятиями в рамках государственных контрактов на оказание услуг по обеспечению транспортного обслуживания населения автомобильным транспортом общего пользования на маршрутах регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом в городском сообщении.

В целях проведения апробации методики оценки достигнутого уровня качества транспортного обслуживания населения, согласно [5, 6], предлагается выполнение научно обоснованного разбиения заданной выборки маршрутов  $G$ , обслуживаемых в рамках НМУ НГПТ, на непересекающиеся подмножества  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ , по заданным критериям  $X_i$  так, чтобы каждый маршрут  $G_j$  принадлежал одному и только одному подмножеству разбиения и чтобы маршруты, принадлежащие одному и тому же подмножеству, были сходными, в то время как маршруты, принадлежащие разным кластерам, были разнородными, с последующим выбором маршрута из каждой сформированной группы.

Для целей настоящего исследования предлагается использование метода кластерного анализа. Преимущество, отличающее



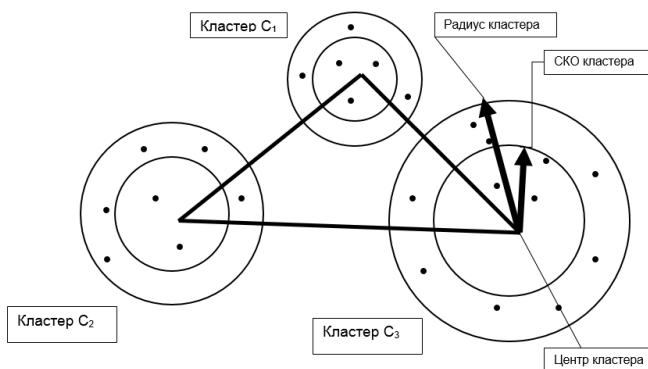


Рис. 2. Математические характеристики кластера.

его от большинства математико-статистических методов, заключается в отсутствии ограничений на вид рассматриваемых объектов и возможности рассмотрения множества исходных данных [7, с. 7]. Также использован метод независимой многовариантной экспертизы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Математические характеристики кластера представлены на рис. 2.

Центр кластера — это среднее геометрическое место точек в пространстве переменных. Радиус кластера — максимальное расстояние точек от центра кластера. Размер кластера может быть определён либо по радиусу кластера, либо по среднеквадратичному отклонению объектов для этого кластера. Объект относится к кластеру, если расстояние от объекта до центра кластера меньше радиуса кластера [7].

Для решения задачи кластерного анализа необходимо определить понятие сходства и разнородности. Маршруты  $i$ -й и  $j$ -й попадают в один кластер, когда расстояние (отдалённость) между точками  $X_i$  и  $X_j$  довольно мала, и попадают в разные кластеры, когда это расстояние достаточно большое. Таким образом, попадание в один или разные кластеры определяется понятием расстояния между  $X_i$  и  $X_j$ . Критерием для определения схожести и различия кластеров является расстояние между точками на диаграмме рассеивания.

Критерием оптимальности разбиения и определения оптимального количества кластеров принята внутригрупповая сумма квадратов отклонения:

$$E = S_n = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right)^2, \quad (1)$$

где  $x_j$  — коэффициент парной корреляции.

Таким образом, процессу группировки должно соответствовать последовательное минимальное возрастание значения критерия.

В случае неоднородности единиц измерения параметров и вытекающей отсюда невозможности обоснованного выражения значений в одном масштабе возникает задача нормирования исходных значений выбранных параметров. Приведём основные способы нормирования параметров (переход от исходных значений  $X$  к нормированным  $Z$ ):

$$Z = \frac{(x - \bar{x})}{\sigma}; \quad Z = \frac{x}{\bar{x}}; \quad Z = \frac{x}{x'};$$

$$Z = \frac{x}{x_{\max}}; \quad Z = \frac{(x - \bar{x})}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2)$$

где  $Z$  — нормированное значение параметра  $x$ ;

$x - \bar{x}$  — среднее значение параметра  $x$ ;

$\sigma$  — среднее квадратичное отклонение;

$x$  — нормативное (эталонное) значение  $x$ ;

$x_{\max}, x_{\min}$  — максимальное и минимальное значения параметра  $x$ .

Наряду со стандартизацией переменных существует вариант придания каждой из них определённого коэффициента важности или веса, который бы отражал значимость соответствующей переменной. Одним из наиболее научно обоснованных методов получения экспертных оценок является метод независимой многовариантной экспертизы [8–12].



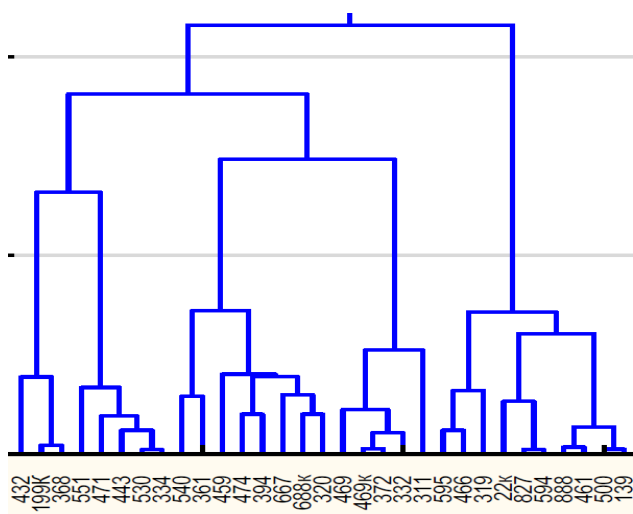


Рис. 3. Фрагмент дендограммы кластерного анализа.

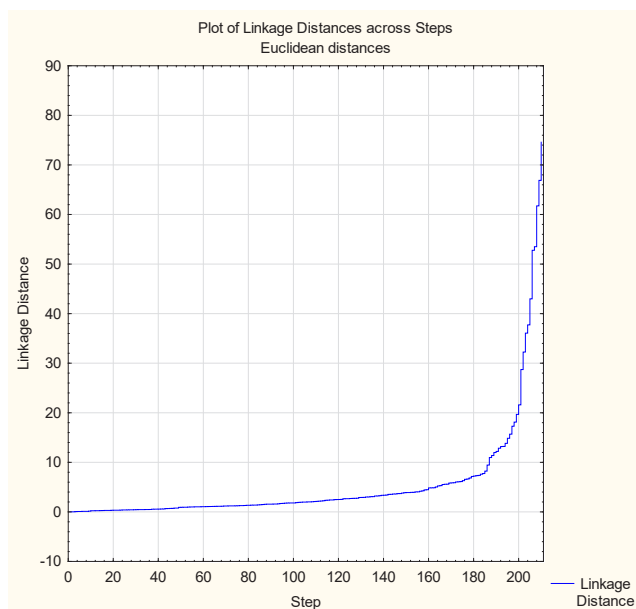


Рис. 4. Процесс объединения маршрутов в кластеры.

Классифицировать маршруты предлагается с использованием классического метода иерархического кластерного анализа, где в качестве меры близости будет использовано евклидово расстояние с одиночным правилом объединения кластеров. Процедура кластеризации выполнена с использованием метода Варда [7, с. 19].

Параметры, на основе которых предлагается кластеризация:

1. Округа, через которые проходит трасса следования маршрута в прямом и обратном направлениях. Данному параметру принадлежности трассы маршрута следования к определённому округу соответствует значение «1» и «0» в противном случае.

2. Общая протяжённость трассы следования, определяемая как сумма длин маршрутов в прямом и обратном направлениях.
3. Количество транспортных средств, которые используются для перевозок.
4. Класс подвижного состава.
5. Оператор перевозок.

Неоднородность единиц измерения и вытекающая отсюда невозможность обоснованного выражения значений различных показателей в одном масштабе ставят задачу нормирования исходных значений выбранных критериев, то есть выражение через отношение этих значений к некоторой величине, отражающей определённые свойства данного критерия.

Нормировка данных каждого параметра выполнена путём деления централизованной величины на среднее квадратичное отклонение параметра.

Под централизованной величиной, соответствующей определённому параметру, понимается отклонение (разность) между случайной величиной и её математическим ожиданием.

Отметим, что данный метод нормировки предполагает признание всех параметров равноценными с точки зрения выяснения сходства рассматриваемых объектов. Результаты иерархической классификации представлены в виде вертикальной дендрограммы (рис. 3), где ось абсцисс содержит значения номеров маршрутов, а ось ординат — евклидово расстояние.

Для определения количества кластеров, подлежащих дальнейшему анализу, необходимо выбрать пороговое расстояние с последующим определением количества пересечений с ветвями дендрограммы. Выбор количества кластеров выполнен на основе анализа графика процесса объединения маршрутов (рис. 4) и таблицы шагов объединения объектов. Ось абсцисс содержит значения номера шага, а ось ординат — евклидово расстояние.

Анализ графика объединения предполагает (рис. 4) определение точки «перелома» и номера шага  $m$ , на котором произошёл перелом, с последующим определением количества кластеров равным  $n-m$ , где  $n$  — количество маршрутов в кластере.

Дополнительно выполнен анализ таблицы шагов объединения маршрутов, и найден такой номер шага  $m$ , объединение

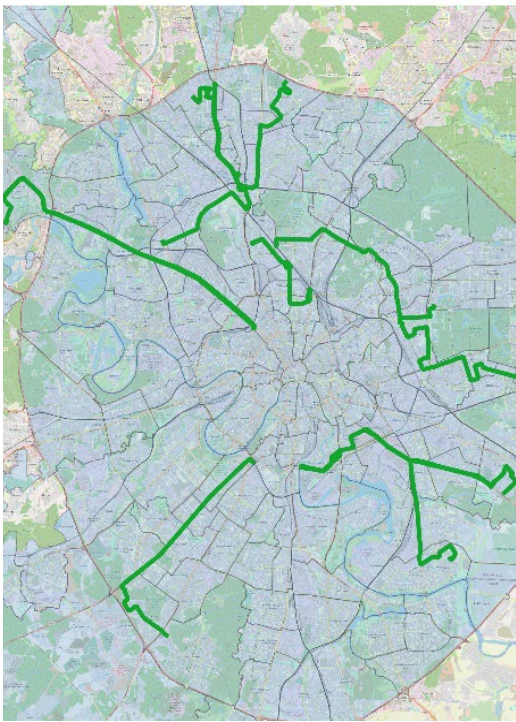


Рис. 5. Трассы следования маршрутов.

на котором произошло на существенно большем расстоянии, чем на шаге  $m-1$ , с последующим определением количества кластеров равным  $n-m$ , где  $n$  — количество маршрутов в кластере.

По результатам анализа установлено, что точкой перелома является 201 шаг, следовательно, количество кластеров, подлежащих дальнейшему анализу, равняется  $211-201 = 10$ , с последующим выделением любого маршрута из сформированных групп кластеров (таблица 1).

Таблица 1  
Состав кластеров, выделенный методом Варда

Номер кластера	Количество маршрутов в кластере
1	31
2	28
3	15
4	17
5	18
6	32
7	13
8	14
9	4
10	39



Параметры трасс следования обследуемых маршрутов

№ кластера	№ маршрута	Название маршрута
1	311	платф. Останкино—м. «Партизанская»
2	350	м. «Текстильщики»—7-й мкр. Марьинского Парка
3	99	138-й кв. Выхина—Автозаводский мост (м. «Автозаводская»)
4	141	ул. Молостовых—м. «Семёновская»
5	19	м. «Тимирязевская»—м. «Тимирязевская»
6	282	м. «Войковская»—ул. Корнейчука
7	63	Лобненская ул.—Лобненская ул.
8	456	8-й мкр. Митина—8-й мкр. Митина
9	550	м. «Рассказовка»—платф. Переделкино
10	553	м. «Ленинский проспект»—м. «Тёплый Стан»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для целей дальнейших исследований было отобрано по одному маршруту каждого кластера (таблица 2). Трассы следования маршрутов, подлежащих анализу, приведены на рис. 5.

Направлением дальнейших исследований является апробация методики оценки достигнутого уровня качества транспортного обслуживания [5, 6] на выбранных маршрутах НМУ НГПТ с учётом ранее выполненного анализа и оценки её адаптивности [12].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Блудян Н. О., Рошин А. И., Антонов М. Н. К вопросу минимальных социальных стандартов транспортного обслуживания населения // депонированная рукопись № 754-B2009 30.11.2009.

2. Блудян Н. О., Рошин А. И., Антонов М. Н. Оценка критериев и нормативов обеспеченности регулярными пассажирскими перевозками на автомобильном транспорте // Депонированная рукопись № 753-B2009 30.11.2009.

3. Проект Государственного контракта на оказание услуг по обеспечению транспортного обслуживания населения автомобильным транспортом общего пользования на маршрутах регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом в городском сообщении. [Электронный ресурс]: <http://zakupki.gov.ru/44fz/filestore/public/1.0/download/priz/file.html?uid=011D6050DCE3418DA4370D88A4D898A3>. Доступ 24.12.2018.

4. Приказ Департамента транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры г. Москвы от 30.12.2015 г. № 61-02-504/5 (ред. от 28.03.2018) «О Реестре маршрутов регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным и наземным электрическим транспортом в городском сообщении (муниципальных маршрутов регулярных перевозок)» [Электронный ресурс]: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=MLAW; n=189578#038794974547598016>. Доступ 24.12.2018.

5. Распоряжение Минтранса России от 31.01.2017 г. № НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом». [Электронный ресурс]: [https://special.mintrans.ru/upload/iblock/736/rasp\\_mt\\_na\\_19r\\_31012017.pdf](https://special.mintrans.ru/upload/iblock/736/rasp_mt_na_19r_31012017.pdf). Доступ 05.11.2018.

6. Распоряжение Министерства транспорта РФ от 13 апреля 2018 г. № НА-55-р «О внесении изменений в социальный стандарт транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом, утверждённый распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 31 января 2017 г. № НА-19-р». [Электронный ресурс]: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71837354/#ixzz5W5Ft8hwK> свободный. Доступ 05.11.2018.

7. Бурева Н. Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA». Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики». — Н. Новгород, 2007. — 112 с.

8. Блудян Н. О., Мороз Д. Г., Шестопалов Н. Ю. Оценка и выбор типа транспортного средства для таксомоторных перевозок // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2018. — № 3. — С. 115–121.

9. Блудян Н. О., Ахохов А. А., Дорофеев Ю. А., Чернявский А. Л. Независимая многовариантная экспертиза в задаче управления межрегиональными автобусными перевозками // Управление большими системами: сборник трудов. — 2013. — № 46. — С. 163–178.

10. Блудян Н. О., Ахохов А. А., Дорофеев Ю. А., Чернявский А. Л. Методы коллективной многовариантной экспертизы в задаче регулирования рынка межрегиональных автобусных перевозок // Инновации и инвестиции. — 2013. — № 4. — С. 214–217.

11. Блудян Н. О., Ахохов А. А., Дорофеев Ю. А., Чернявский А. Л. Разработка системы управления межрегиональными автобусными перевозками на базе методов коллективной многовариантной экспертизы // Проблемы управления. — 2013. — № 4. — С. 29–38.

12. Айриев Р. С., Кудряшов М. А. Показатели качества транспортного обслуживания населения // Мир транспорта. — 2018. — № 4. — С. 140–149. ●





# Cluster Analysis of the Routes of the New Management Model for Surface Urban Passenger Mass Transit



Maxim A. KUDRYASHOV



Radion S. AYRIEV



Georgiy M. OVNANYAN

*Kudryashov, Maxim A., State Unitary Enterprise Mosgortrans, Moscow, Russia.*

*Ayriev, Radion S., State Unitary Enterprise Mosgortrans, Moscow, Russia.*

*Ovnanyan, Georgiy M., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia\*.*

## ABSTRACT

The city of Moscow has implemented a new management model for surface urban passenger transportation (NMM). To consistently monitor the quality of transportation services it is suggested to introduce a methodology of its assessment.

The methodology for assessing quality of public transport services is supposed to be tested on routes serviced by commercial enterprises under state contracts for provision of public transportation services by public transport on the routes of regular passenger and baggage transportation by road in urban traffic.

The objective of the research was to select objects in order to test the methodology for assessing quality of public transportation services provided by surface urban public mass transit (SUPMT) on routes serviced in the framework of NMM.

A scientifically substantiated partition of a given sample of routes has been performed. The routes have been classified using the classical method of hierarchical cluster analysis, where the Euclidean distance with a single rule of cluster joining was used as a measure of proximity. The clustering procedure was performed using the Ward method.

Based on the results of the cluster analysis, ten routes were selected that are subject to further analysis.

**Keywords:** urban transport, management, new management model for surface urban mass transit, cluster analysis.

\*Information about the authors:

**Kudryashov, Maxim A.** – head of the sector of human resources service of State Unitary Enterprise Mosgortrans, Moscow, Russia, [sparky5@yandex.ru](mailto:sparky5@yandex.ru).

**Ayriev, Radion S.** – advisor to deputy director general of State Unitary Enterprise Mosgortrans, Moscow, Russia, [ayrievrs@mail.ru](mailto:ayrievrs@mail.ru).

**Ovnanyan, Georgiy M.** – Master's student at the department of road transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, [georgy.ovnanyan@mail.ru](mailto:georgy.ovnanyan@mail.ru).

Article received 06.12.2018, accepted 25.04.2019.

For the original Russian text please see p. 182.

## New management model for surface urban mass transit

The system of urban passenger transport is the most important social sphere of the city of Moscow. Quality of life of the population and productivity of various sectors of the economy depend on effectiveness of its functioning. Improving the system of transport services for the population requires implementation of comprehensive research on assessment, analysis and identification of urgent problems of organizing transportation of passengers and baggage in the city of Moscow [1, pp. 1–9; 2, pp. 1–14].

With the growth of motorization and of the number of individual trips in the city of Moscow, the requirements for improving quality of public transportation services are being imposed on the public passenger transportation system.

The work of public transport must comply with all regulatory requirements to ensure safety of the environment, road traffic, and passenger transportation.

Based on the analysis of the current state of the urban passenger transport system in Moscow, previous research and best practices in development of transport systems of world cities, the Department of transport and development of road transport infrastructure of Moscow is developing a number of measures, implementation of which will significantly improve quality and safety of mass transit in Moscow.

The most important direction for improving quality of public transport services provided in

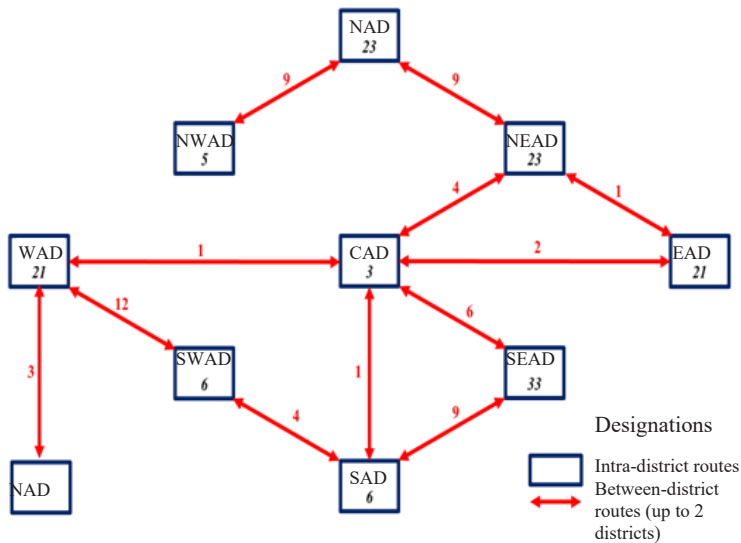
the sphere of surface urban public mass transit (SUPMT) is the transition in the city of Moscow to a new model of SUPMT management (NMM SUPMT), which provides for provision of transport services for the population on municipal routes of regular transportation of passengers and baggage under state contracts.

NMM SUPMT provides for integration of private motor transport enterprises into the public transport system of the city of Moscow with the transition to uniform standards for provision of transport services to the population.

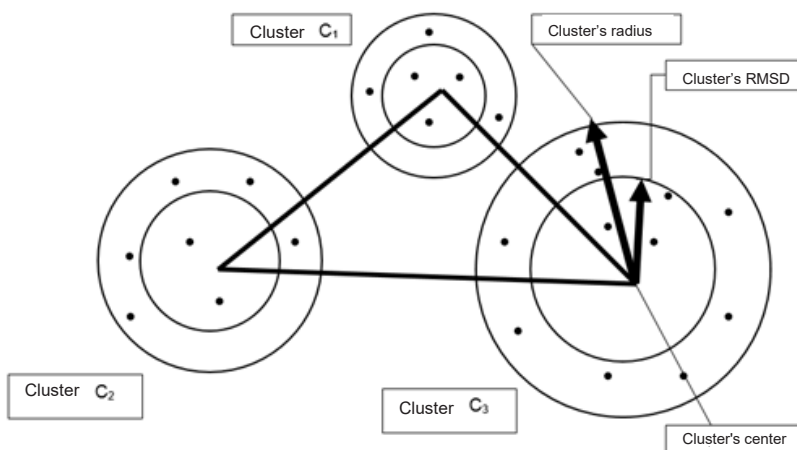
The admission of commercial motor transport enterprises to work on regular transportation routes in urban traffic was carried out on the basis of state contracts for public transport services based on the results of open tenders.

With the transition to NMM SUPMT, a new route network was developed and implemented taking into account elimination of duplicate routes, reducing congestion of the transport network, reducing traffic intervals and then adjusting the timetable. For each route, the optimal class of rolling stock was selected.

According to the requirements of [3, Appendix 1, p. 1] the fleet must comply with an ecological class of at least Euro-4, be adapted for transportation of low-mobility groups of people, equipped with air conditioning, heating systems, route indicators and information displays, airborne navigation and communication terminals, radio stations, video surveillance systems, etc.



**Pic. 1. Graph of itineraries of the routes.**



**Pic. 2. Mathematical characteristics of the cluster.**

Quality control of provision of transport services is carried out in the automatic mode of monitoring the operation of the fleet on the line regarding compliance with the itinerary of the route, schedule, compliance of the type of vehicles with the parameters of transportation, cleanliness of the passenger compartment, operability of the ramp for people with limited mobility, use of a single ticket, compliance with speed mode, etc.

The level of quality of transport services provided to the population by private carriers should not be lower than on the routes served by a public carrier.

In total, 211 routes within 63 lots were suggested for tender, the winners of which were eight private carrier companies that concluded state contracts for transport services for a period of 5 years [3].

The main motor transport company serving routes under state contracts is LLC Transautoliz, which is part of Autoline group of companies.

The performed analysis of transportation parameters [3, Appendix 3] and the Register [4] regarding the routes within NMM SUPMT in the context of districts showed that: 141 routes serve 1 district, 61 routes serve 2 adjacent districts (Pic. 1) and 9 routes serve 3 or more districts of the city of Moscow. The greatest number of intra-district routes goes through SEAD [Southeast administrative district] (33 routes), the smallest – in CAD [Central administrative district] (3 routes). The total length of the routes is more than 3600 km [3, 4]. At the same time, 43 % of the routes are served by small class buses.

### **Justification and selection of the object of study**

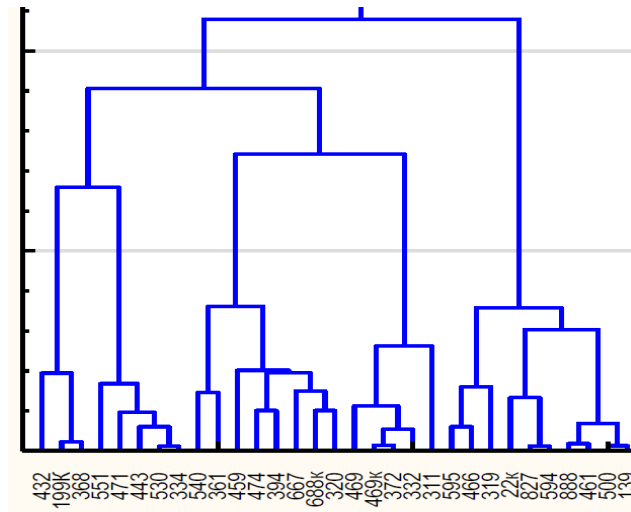
The *objective* of the study is selection of objects in order to test the methodology for assessing quality of public transport services for surface urban public mass transit on routes served by the new management model for surface urban mass transit.

It is proposed that the *methodology* for assessing quality of public transport services in accordance with the Standard [5, 6] should be applied on routes served by commercial enterprises under state contracts for provision of services for the population by public road transport on the routes of regular passenger and baggage transportation in city traffic.

In order to test the methodology for assessing the achieved level of quality of public transport services according to [5, 6], it is proposed to carry out a scientifically sound partition of a given sample of routes  $G$ , served as part of NMM SUPMT, into disjoint subsets  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ , according to the given criteria  $X_i$  so that each  $G_j$  route belongs to only one subset of the partition and that the routes belonging to the same subset are similar, while the routes belonging to different clusters are of different family, and then the route of each formed group could be selected.

For the purposes of this study, the use of the cluster analysis method is proposed. The advantage of this method, which distinguishes it from most mathematical and statistical methods, is the absence of restrictions on the type of objects under consideration and the possibility of considering a variety of source data [7, p. 7].





**Pic. 3. A fragment of dendrogram of cluster analysis.**

### Results of cluster analysis

The mathematical characteristics of the cluster are presented in Pic. 2.

Cluster's center is geometric mean of the points in the space of variables. Cluster's radius is maximum distance of points from cluster's center. The cluster size can be determined either by cluster's radius, or by root mean square deviation (RMSD) of objects for this cluster. An object belongs to a cluster if the distance from the object to the cluster's center is less than the cluster's radius [7].

To solve the problem of cluster analysis, it is necessary to define the concept of similarity and heterogeneity. The  $i$ -th and  $j$ -th routes fall into one cluster when the distance between points  $X_i$  and  $X_j$  is quite small, and fall into different clusters when this distance is sufficiently large. Thus, getting into one or different clusters is determined by the concept of the distance between  $X_i$  and  $X_j$ . The criterion for determining similarity and difference of clusters is the distance between the points on the scattering diagram.

The criterion for optimizing partition and determining the optimal number of clusters is the intragroup sum of squared deviations:

$$E = S_n = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right)^2, \quad (1)$$

where  $x_j$  – pair correlation coefficient.

Thus, the grouping process should correspond to a sequential minimum increase in the value of the criterion.

In case of heterogeneity of the units of measurement of parameters and the consequent impossibility of a reasonable expression of values on one scale, the task of normalizing the initial values of the selected parameters arises. Here are the main ways to normalize the parameters (the transition from the original values  $X$  to normalized  $Z$ ):

$$Z = \frac{(x - \bar{x})}{\sigma}; \quad Z = \frac{x}{x'}; \quad Z = \frac{x}{x_{\max}}; \quad Z = \frac{(x - \bar{x})}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2)$$

where  $Z$  is normalized value of the parameter  $x$ ;

$x - \bar{x}$  – average value of the parameter  $x$ ;

$\sigma$  – root mean square deviation;

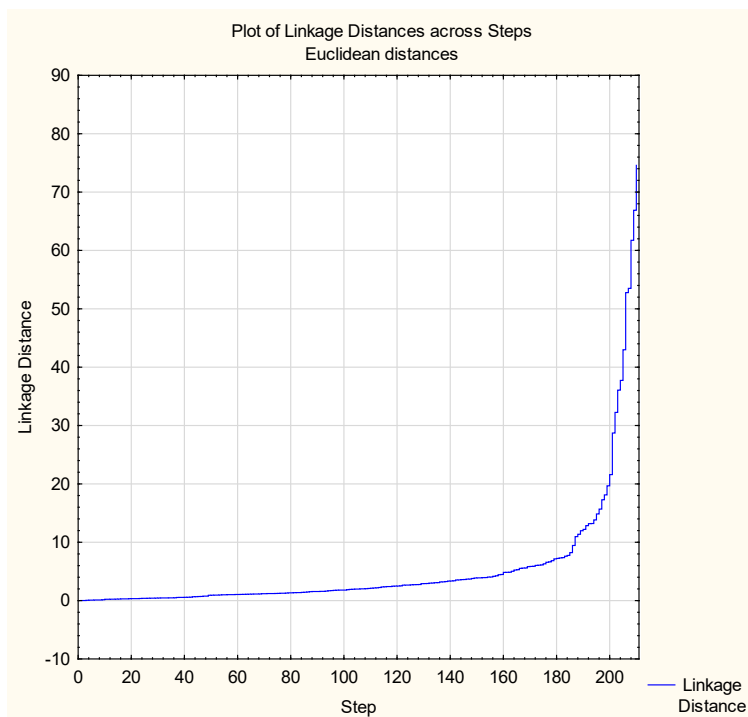
$x'$  – normative (reference) value of  $x$ ;

$x_{\max}, x_{\min}$  are respectively maximum and minimum value of the parameter  $x$ .

Along with standardization of variables, there is the option of giving each of them a certain coefficient of importance, or weight, which would reflect the significance of the corresponding variable. One of the most scientifically substantiated methods for obtaining expert estimates is the method of independent multivariate examination [8–12].

It is proposed to classify routes using the classical method of hierarchical cluster analysis, where the Euclidean distance with a single rule of cluster joining will be used as a measure of proximity. The clustering procedure





**Pic. 4. The process of combining routes into clusters.**

was performed using the Ward's method [7, p. 19].

Clustering is proposed to meet the parameters that follow:

1. The districts through which the route goes in forward and reverse directions. This parameter of the route's belonging to a certain district corresponds to the value «1», or to value «0» otherwise.

2. The total length of the route, defined as the sum of the lengths of routes in forward and reverse directions.

3. The number of vehicles used for transportation.

4. The class of vehicles.

5. Transportation operator.

Heterogeneity of the units of measure and the consequent impossibility of a reasonable expression of the values of various indicators on one scale pose the task of normalizing the initial values of the selected criteria, that is, the expression that through the ratio of these values to a certain value reflects certain properties of this criterion.

Normalization of data of each parameter is performed by dividing the centered value by the root mean square deviation of the parameter.

A centered quantity that corresponds to a certain parameter means deviation (difference)

between a random variable and its mathematical expectation.

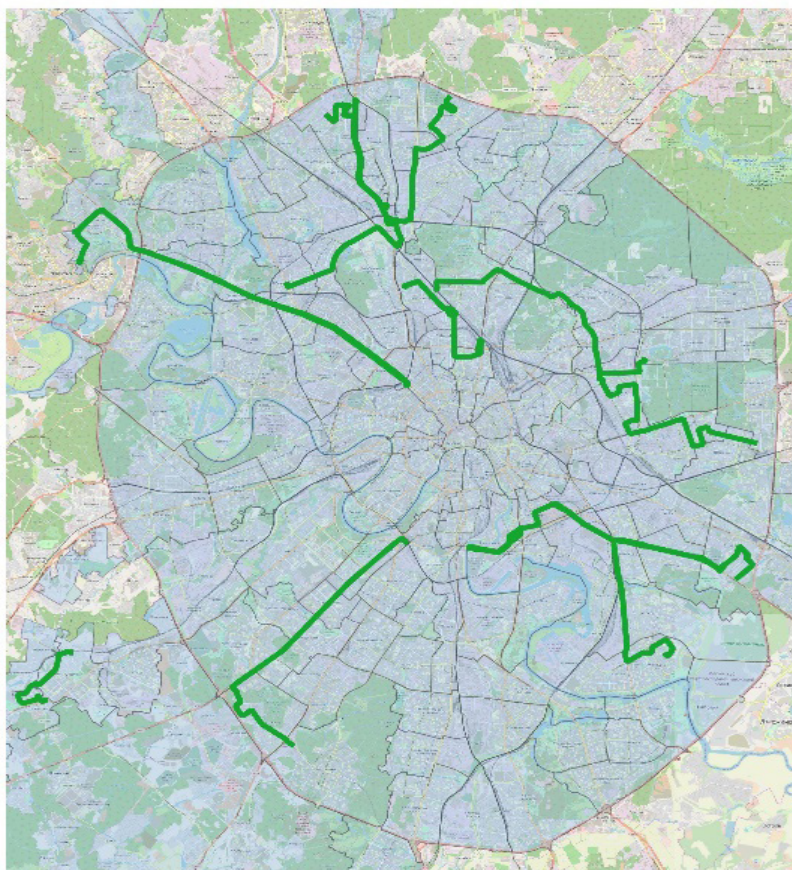
It is worth noting that this normalization method involves recognition of all parameters as equivalent in terms of clarifying similarity of the objects under consideration. The results of hierarchical classification are presented in the form of a vertical dendrogram (Pic. 3), where the abscissa axis contains the values of the route numbers, and the ordinate axis – the Euclidean distance.

To determine the number of clusters to be further analyzed, it is necessary to choose a threshold distance, followed by determining

**Table 1**  
**The composition of clusters allocated by the Ward method**

Cluster's number	Number of routes in the cluster
1	31
2	28
3	15
4	17
5	18
6	32
7	13
8	14
9	4
10	39





**Pic. 5. The layout of the routes.**

**Table 2**

**Parameters of the routes under study**

No. of the cluster	No. of the route	Name of the route
1	311	platform [rail station] Ostankino—m. [metro station] «Partisanskaya»
2	350	m. Tekstilshchiki—7 <sup>th</sup> microdistrict of Maryinsky Park
3	99	138 <sup>th</sup> quar. Vykhnina—Avtozavodsky bridge (m. «Avtozavodskaya»)
4	141	st. Molostovykh—m. «Semenovskaya»
5	19	m. «Timiryazevskaya»—m. «Timiryazevskaya»
6	282	m. «Voikovskaya»—Korneichuk st.
7	63	Lobnenskaya st.—Lobnenskaya st.
8	456	8 <sup>th</sup> microdistrict Mitina—8 <sup>th</sup> microdistrict Mitina
9	550	m. «Rasskazovka»—platf. Peredelkino
10	553	m. «Leninsky prospect»—m. «Teply Stan»

the number of intersections with the branches of the dendrogram. The number of clusters was selected based on the analysis of the schedule of the process of combining routes (Pic. 4) and a table of steps for combining objects. The abscissa axis contains step

number values, and the ordinate axis contains Euclidean distance.

The analysis of the merger schedule involves (Pic. 4) determining the «fracture» point and step number  $m$  at which the fracture occurs, with the subsequent determination of the

number of clusters equal to  $n-m$ , where  $n$  is the number of routes in the cluster.

In addition, the table of steps for combining routes was analyzed and such a number of step  $m$  was found that merged at a significantly greater distance than at step  $m-1$ , followed by determining the number of clusters equal to  $n-m$ , where  $n$  is the number of routes in the cluster.

According to the results of the analysis, it was found that the fracture point is step 201, therefore, the number of clusters to be further analyzed is  $211-201 = 10$ , with subsequent selection of any route from the formed cluster groups (Table 1).

### Conclusion.

For further research purposes, a route per each cluster was selected (Table 2). The routes to be analyzed are shown in Pic. 5.

Further research is focused on testing the methodology for assessing the achieved level of quality of transport services [5, 6] on the selected routes of NMM SUPMT taking into account the previously performed analysis and evaluating its adaptability [12].

## REFERENCES

1. Bludyan, N. O., Roshchin, A. I., Antonov, M. N. On the issue of minimum social standards for public transport services [K voprosu minimalnykh sotsialnykh standartov transportnogo obsluzhivaniya naseleniya]. Deposited manuscript No. 754-B2009 30.11.2009.
2. Bludyan, N. O., Roshchin, A. I., Antonov, M. N. Assessment of criteria and standards for provision of regular passenger transportation by road [Otsenka kriteriev i normativov obespechennosti regul'yarnymi passazhirskimi perezovzkami na avtomobilnom transporte]. Deposited manuscript No. 753-B2009 30.11.2009.
3. The draft State contract for provision of public transport services by public transport on the routes of regular passenger and baggage transportation by road in urban traffic [Proekt Gosudarstvennogo kontrakta na okazanie uslug po obespecheniyu transportnogo obsluzhivaniya naseleniya avtomobilnym transportom obshchego polzovaniya na marshrutakh regul'yarnykh perezovok passazhirov i bagazha avtomobilnym transportom v gorodskom soobshchenii]. [Electronic resource]: <http://zakupki.gov.ru/44fz/filestore/public/1.0/download/priz/file.html?uid=011D6050DCE3418DA4370D88A4D898A3>. Last accessed 24.12.2018.
4. Order of the Department of transport and development of road transport infrastructure of Moscow dated December 30, 2015 No. 61-02-504 / 5 (as amended on March 28, 2018) «On the register of routes for regular transportation of passengers and baggage by road and land electric transport in urban traffic (municipal scheduled routes)» [Prikaz Departamenta transporta i razvitiya dorozhno-transportnoi infrastruktury g. Moskvy ot 30.12.2015 № 61-02-504/5 (red. ot 28.03.2018) «O Reestre marshrutov regul'yarnykh perezovok passazhirov i bagazha avtomobilnym i nazemnym elektricheskim transportom v gorodskom soobshchenii (munitsipalnykh marshrutov regul'yarnykh perezovok)»]. [Electronic resource]: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=MLAW; n=189578#038794974547598016>. Last accessed 24.12.2018.
5. Decree of the Ministry of Transport of Russia dated 01.31.2017 No. NA-19-r «On approval of the social standard of public transport services for transportation of passengers and baggage by road and urban land electric transport» [Rasporyazhenie Mintransa Rossii ot 31.01.2017 № NA-19-r «Ob utverzhdenii sotsialnogo standarta transportnogo obsluzhivaniya naseleniya pri osushchestvlenii perezovok passazhirov i bagazha avtomobilnym transportom i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom»]. [Electronic resource]: [https://special.mintrans.ru/upload/iblock/736/rasp\\_mt\\_na\\_19r\\_31012017.pdf](https://special.mintrans.ru/upload/iblock/736/rasp_mt_na_19r_31012017.pdf). Last accessed 05.11.2018.
6. Decree of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated April 13, 2018 No. NA-55-r «On amendments to the social standard of the public transport services for transportation of passengers and baggage by road and urban electric land transport, approved by Decree of the Ministry of Transport of the Russian Federation of 31 January 2017 No. NA-19-r [Rasporyazhenie Ministerstva transporta RF ot 13 aprelya 2018 № NA-55-r «O vnesenii izmenenii v sotsialniy standart transportnogo obsluzhivaniya naseleniya pri osushchestvlenii perezovok passazhirov i bagazha avtomobilnym transportom i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom, utverzhdenii rasporyazheniem Ministerstva transporta Rossiiskoi Federatsii ot 31 yanvarya 2017 g. № NA-19-r»]. [Electronic resource]: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71837354/#ixzz5W5Ft8hwK>. Last accessed 05.11.2018.
7. Bureeva, N. N. Multivariate statistical analysis using STATISTICA IFR. Educational material on the continuing education program «Application of software in scientific research and teaching mathematics and mechanics» [Mnogomerniy statisticheskiy analiz s ispolzovaniem PPP «STATISTICA». Uchebno-metodicheskiy material po programme povysheniya kvalifikatsii «Primenenie programmnykh sredstv v nauchnykh issledovaniyakh i prepodavanii matematiki i mekhaniki»].
8. Bludyan, N. O., Moroz, D. G., Shestopalov, N. Yu. Evaluation and selection of vehicle type for taxi transportation [Otsenka i vybor tipa transportnogo sredstva dlya taksomotornykh perezovok]. Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI), 2018, Iss. 3, pp. 115–121.
9. Bludyan, N. O., Akhokhov, A. A., Dorofeyuk, Yu. A., Chernyavsky, A. L. Independent multivariate expertise in the task of managing inter-regional bus transportation [Nezavisimaya mnogovariantnaya ekspertiza v zadache upravleniya mezhregionalnymi avtobusnymi perezovzkami]. Large systems management: collection of works, 2013, Iss. 46, pp. 163–178.
10. Bludyan, N. O., Akhokhov, A. A., Dorofeyuk, Yu. A., Chernyavsky, A. L. Methods of collective multivariate expertise in the task of regulating the market for inter-regional bus transportation [Metody kolektivnoi mnogovariantnoi ekspertizy v zadache regulirovaniya rynka mezhregionalnykh avtobusnykh perezovok]. Innovatsii i investitsii, 2013, Iss. 4, pp. 214–217.
11. Bludyan, N. O., Akhokhov, A. A., Dorofeyuk, Yu. A., Chernyavsky, A. L. Development of a control system for inter-regional bus transportation based on the methods of collective multivariate examination [Razrabotka sistemy upravleniya mezhregionalnymi avtobusnymi perezovzkami na baze metodov kolektivnoi mnogovariantnoi ekspertizy]. Problemy upravleniya, 2013, Iss. 4, pp. 29–38.
12. Ayriev, R. S., Kudryasov, M. A. Quality indices of public transportation services. World of Transport and Transportation, Vol. 16, 2018, Iss. 4, pp. 140–149. ●







# Анализ методов определения оптимального количества автомобилей-такси в мегаполисах



Дмитрий МОРОЗ



Данила ДОЛЕНКО



Александр ПРОКОПЕНКОВ

*Мороз Дмитрий Геннадьевич* – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

*Доленко Данила Викторович* – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

*Прокопенков Александр Владимирович* – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия\*.

В современных крупных городах весомой составной частью городской транспортной системы является таксомоторный парк. Степень развитости и влияния таксомоторных перевозок на качество транспортного обслуживания жителей и находящихся в городе проездом пользователей зависит от множества факторов. Но одним из базовых является оптимальное соотношение количества автомобилей-такси и спроса на перевозки ими.

Целью статьи стал аналитический обзор научно-исследовательских и практических работ в области методов решения задач организации и функционирования таксомоторных перевозок, в первую очередь, определения существующего спроса населения на таксомоторные перевозки и необходимого количества легковых автомобилей-такси. Использовался метод контент-анализа работ авторов ряда стран, в том числе и российских.

Приведённый анализ существующих подходов к определению спроса населения на таксомоторные перевозки и расчёта необходимого количества автомобилей-такси показал, что в настоящее время для этого не существует единого универсально признанного метода.

Используемые методики базируются на различных методах – статистических, социологических (опросах, наблюдениях), математических, все шире используется анализ больших данных, полученных с помощью информационных систем мегаполисов.

Делается вывод, что назрела объективная необходимость исследований в области разработки универсальной методики определения необходимого (предельного) количества автомобилей-такси в агломерациях.

**Ключевые слова:** городской транспорт, спрос населения на таксомоторные перевозки, определение необходимого количества легковых автомобилей-такси, таксомоторные перевозки.

\*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](mailto:dgm1984@mail.ru).

**Доленко Данила Викторович** – соискатель кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, [dolenko66@yandex.ru](mailto:dolenko66@yandex.ru).

**Прокопенков Александр Владимирович** – магистрант кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, [prokopenkovaleksandr@gmail.com](mailto:prokopenkovaleksandr@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 28.02.2019, принята к публикации 30.08.2019.

For the English text of the article please see p. 202.



## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, насколько мы можем судить на основе анализа изученных научных источников ряда стран, не существует единого подхода к решению проблемы оптимального соотношения между спросом населения на таксомоторные перевозки легковым автомобильным транспортом и предложением, представляющим собой необходимое число легковых автомобилей-такси.

Главная проблема в том, что спрос в мегаполисах не является статичным, он постоянно меняется, следовательно, необходимо постоянно корректировать количество автомобилей-такси для его полного удовлетворения [1]. Необходимо также отметить, что в существующих условиях организации таксомоторной деятельности достичь оптимального расчётного соотношения практически невозможно без использования математического моделирования с помощью ЭВМ, без учёта множества факторов, например, неравномерной нагрузки по дням недели, времени суток, пунктам посадки, в том числе с учётом проведения массовых мероприятий, выявления множества той части неудовлетворённого (предъявленного) спроса населения на таксомоторные перевозки, которая удовлетворяется путём использования других видов транспорта, каршеринга, арендованных автомобилей, а в некоторых случаях — посредством нелегальных перевозчиков, работающих без разрешений.

В настоящее время назрела объективная необходимость проведения исследований, направленных на решение основных задач организации таксомоторных перевозок в условиях развития рынка агрегаторов, основанных на определении спроса населения на перевозки легковыми автомобилями-такси и предложения (предельного количества автомобилей-такси), а также достижения их баланса [2].

Первым шагом на этом пути и целью исследования является представленный аналитический обзор научно-исследовательских и практических работ в области методов решения задач организации и функционирования таксомоторных перевозок, в первую очередь, определения существующего спроса населения на таксомоторные перевозки и необходимого количества легковых автомобилей-такси.

Использовался *метод* контент-анализа работ авторов ряда стран, в том числе и российских.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАЗЛИЧНЫХ СТРАНАХ МЕТОДЫ: ОБЩЕЕ И ОСОБЕННОЕ В ПОДХОДАХ

Анализ используемых в мире методов определения необходимого количества автомобилей-такси свидетельствует, что подавляющее большинство исследователей применяет многокритериальный подход к определению их численности.

Например, учитываются такие факторы, как численность населения, входящий и исходящий пассажиропоток аэропортов, число семей, владеющих транспортным средством, и другие.

Трудность моделирования заключается в том, что система непостоянна и зависит от многих внешних переменных. На спрос услуги могут повлиять неявные факторы, например, время ожидания подачи такси, надёжность перевозки и впечатления от предыдущих поездок, изменение тарифов на парковку в ключевых местах города, стоимость поездки, зависимость от времени суток и действия часа пик, сезонность и даже погодные условия, а также проведение культурных и социальных мероприятий [3–5]. Можно заметить, что решить такую задачу с множеством переменных возможно только с применением имитационного моделирования (методов и моделей прогнозирования).

Исследования, опубликованные прошлым летом в журнале Nature группой исследователей, координируемой Карло Ратти, директором Senseable City Lab из Массачусетского технологического института [6], предложили эффективный метод оптимального управления городским такси, являющийся модификацией алгоритма Хопкрофта—Карпа для ориентированного ациклического графа. В исследовании описывается сетевое решение минимизации парка городского такси в мегаполисе, учитывая набор поездок (с указанием пункта отправления и назначения, а также времени начала), которое необходимо для их обслуживания без увеличения времени ожидания для пассажиров. Данный метод впервые по-



зволил решить задачу расчёта минимального парка такси таким образом, что он:

- масштабируется на сотни тысяч и даже миллионы ежедневных поездок (предыдущие алгоритмы позволяли делать это лишь для нескольких тысяч поездок);
- позволяет управлять всеми поездками в реальном времени из единого центра управления;
- обеспечивает близкое к оптимальному решение задачи;
- не требует ничего менять (законы, привычки водителей и пассажиров и т.д.), кроме перевода на единую диспетчерскую службу всех такси и оснащения всех водителей единым приложением для смартфонов.

Алгоритм представляет парк такси в виде графика, математической абстракции, состоящей из узлов (или окружностей) и рёбер (линий между узлами). В этом случае узлы представляют поездки, а рёбра представляют тот факт, что одно конкретное транспортное средство может обслуживать две конкретные поездки. Используя данный график, алгоритм смог найти лучшее решение для совместного использования автопарка.

Команда, в которую также входили Мо Вазифе, первый автор статьи и бывший ведущий научный сотрудник Senseable City Lab, Джованни Реста, научный сотрудник Института информатики и телематики CNR, и Стивен Строгац, профессор математики в Корнеллском университете, проверила решение на наборе данных из 150 миллионов поездок на такси, совершённых в Нью-Йорке в течение одного года.

Они рассчитали время в пути, используя фактическую дорожную сеть Манхэттена и оценки на основе GPS, полученные из набора данных поездки на такси.

Они обнаружили, что реализация метода в режиме реального времени с почти оптимальными уровнями обслуживания позволила сократить размер парка на 30 %.

Решение не предполагает, что какие-либо люди должны разделить поездку. Вместо этого просто включает реорганизацию операции диспетчеризации такси, которая может быть выполнена с помощью простого приложения для смартфона [6].

## ГЕНЕЗИС РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ В РОССИИ

Анализируя российские научные и практические работы, можно сделать вывод о том, что количество современных научных исследований в области решения основных задач организации работы легковых автомобилей-такси, таких как определение существующего спроса населения на таксомоторные перевозки и определение необходимого количества легковых автомобилей-такси, достаточно невелико. Большинство из них рассматривают методики расчёта, которые были предложены ещё в 70–80-е годы прошлого века. В основном, это работы П. П. Абояна, М. Д. Блатнова, Л. А. Бронштейна, В. Д. Герами, Т. В. Лазаренко, А. Ю. Турукина и т.д.

В настоящее время существуют некоторые исследования [7–12], посвящённые расчёту необходимого количества легковых автомобилей-такси в городе. Основным недостатком этих работ является то, что в качестве исходной информации предлагается использовать *статистические данные* о количестве поездок за предыдущие периоды, вследствие чего получаются весьма приближённые результаты.

При этом, напротив, практическую ценность представляют данные о реально существующем спросе населения города на таксомоторные перевозки, так как только они могут обеспечить более точные результаты расчёта необходимого количества легковых автомобилей-такси в городе. Используемые в вышеперечисленных работах методы расчёта не позволяют получить достоверные данные в этом отношении.

Важное значение имеет именно объективная информация, которая может быть получена в результате различных *методов транспортных обследований*, к которым относятся *анкетный, статистический, табличный, учётный, визуальный*.

Из всех вышеперечисленных методов наибольшую информативность несёт в себе анкетный метод. Способы определения спроса населения на перевозки легковыми автомобилями-такси рассмотрены в работах [7; 13–16], в которых авторы стараются разработать методику таких обследований. Однако основным недостатком этих работ является то, что предложенные в них методики определяют лишь *реализованный спрос*, в то время

как *полной потребности* населения в перевозках не определяется.

Следует также отметить, что методы определения спроса населения для маршрутизированных видов транспорта не могут быть применимы по отношению к таксомоторным перевозкам, так как на формирование спроса на перевозки легковыми автомобилями-такси значительное влияние оказывают факторы случайного порядка, поэтому для них невозможно применить детерминированную модель. Следовательно, для решения основных задач организации таксомоторных перевозок необходимо воспользоваться математическими методами теории вероятностей.

*Математические методы* использованы в работах [17; 18], посвящённых исследованию функционирования таксомоторных стоянок. Основным недостатком данных работ является отсутствие в них методов определения потребности населения в таксомоторных перевозках.

Одним из трудов, посвящённых определению спроса населения на таксомоторные перевозки, является методика Минавтотранса РСФСР [19]. В данной работе спрос населения на таксомоторные перевозки определяется на основе выявления неудовлетворённого (предъявленного) спроса с помощью специальной методики обследования, которая заключается в *анкетном опросе населения города по месту жительства*. Однако такое анкетирование не позволяет получить необходимую информацию, так как предложенный метод обследования содержит элементы субъективности. Следует также отметить, что методика предусматривает возможность расчёта потребности в таксомоторных перевозках и без проведения обследования, путём определения коэффициента неудовлетворённого спроса. Впрочем, его значения приводятся без каких-либо обоснований, вследствие чего снижается ценность методики и ограничивается возможность её применения.

Попытка выявления полной потребности была предпринята в работе П. П. Абояна [20], в которой фактический спрос определялся по результатам *транспортного обследования*, состоящего из *анкетного опроса пассажиров легковых автомобилей-такси и визуального наблюдения* на таксомоторных стоянках. Основные недостатки работы заключаются в трудоёмкости и значительной затрате

средств и времени на организацию, проведение и обработку результатов обследования.

Примерная форма анкет, заполняемых водителями или пассажирами, представлена в работах [16; 21; 20–24]. Основным недостатком предлагаемых анкет являлись их объёмность и отсутствие условного буквенно-цифрового заполнения, которое позволило бы значительно сократить время на заполнение и обработку внесённых в анкету данных.

В работах В. Д. Герами [25–27], посвящённых совершенствованию организации работы легковых автомобилей-такси, была разработана методика на основе математической модели с использованием программы комплексного подхода, благодаря которой стало возможным определение неудовлетворённого (предъявленного) спроса населения, что в свою очередь позволило выявить полную потребность населения в таксомоторных перевозках, а также рассчитать необходимое число легковых автомобилей-такси со значительно меньшими затратами времени на организацию, проведение обследования и обработку результатов. Однако есть необходимость проверки соответствия данной методики современным условиям эксплуатации такси путём использования новых компьютерных технологий.

Попытка подтвердить адекватность методики В. Д. Герами была предпринята в работе А. Ю. Турукина [28], в которой разработана и на практике применена программа *автоматизированной обработки данных обследования* работы легковых автомобилей-такси и функционирования таксомоторных стоянок (на примере г. Москвы), базирующаяся на адаптированных к новым условиям эксплуатации существующих формах обследования, алгоритмах их систематизации и расчёта. Произведена по данной методике статистическая обработка результатов проведённого обследования, разработан и применён на практике с помощью ЭВМ оптимизационный метод определения необходимого количества легковых автомобилей-такси с учётом спроса населения на базе *математического моделирования*, в основе которого лежит *имитационная модель с элементами статистического моделирования* процесса функционирования таксомоторного транспорта.

Особый интерес к рассмотрению проблемы обоснования и установления оптимального числа автомобилей-такси в мегаполисе представляет статья Н. О. Блудяна



и Д. Г. Мороза [29]. В статье авторы в результате анализа существующих подходов к определению количества автомобилей-такси и современной практики пришли к выводу, что в настоящее время не существует единого универсального метода их определения, а также указывают на необходимость разработки методики, которая будет учитывать все существующие методы в совокупности и иметь возможность адаптироваться к постоянно меняющимся потребностям рынка таксомоторных перевозок в рассматриваемом регионе.

В работе [30] приводится методика расчёта необходимого количества автомобилей-такси в городах курортных зон. Расчёт численности автомобилей-такси в часы максимального спроса осуществляется по специальной формуле, учитывающей следующие показатели: среднесуточный пробег автомобиля-такси; коэффициент неравномерности перевозок по часам суток, дням недели и по месяцам курортного сезона; среднее количество перевозимых пассажиров за одну поездку; средний оплаченный пробег на автомобиле-такси; коэффициент использования пробега. Основным недостатком данной методики является то, что в формуле, например, не учитывается такой важный показатель, как время ожидания подачи автомобиля-такси, который в свою очередь, как отмечалось выше, в современных условиях таксомоторного обслуживания напрямую зависит от количества автомобилей-такси в регионе. Также следует отметить, что формула не может быть использована для расчёта количества автомобилей в мегаполисе, так как в ней не учитывается множество важных параметров свойственных мегаполису, например, количество населения, владеющего личным автотранспортом, количество массовых мероприятий в городе и т.д.

## МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ТАКСИ

Хотя тема регулирования численности автомобилей-такси является обособленной и требует отдельного анализа, тем не менее она тесно связана с общей поставленной проблемой их оптимального числа и поэтому заслуживает хотя бы краткого обзора.

Все перечисленные факторы и многие другие необходимо учитывать и создавать

«гибкую» систему, способную реагировать на изменения внешней среды [31; 32].

По опыту регулирования численности автомобилей-такси в различных городах мира можно отметить, что основным инструментом воздействия на их число является использование лицензирования перевозочной деятельности автомобилями-такси.

Для обеспечения доступности такси по всему городу проводятся регулярные оценки числа выданных лицензий. В противном случае можно получить переизбыток или напротив — дефицит автомобилей-такси, что скажется на качестве оказываемых услуг и тарифах. При работе слишком малого числа такси возникает дефицит предложения, что порождает долгое время ожидания или отказ на запрос перевозки, что снижает качество оказываемых услуг. Работа чрезмерного количества автомобилей-такси приводит к устареванию и неправильному использованию подвижного состава, высокой «текучке» среди мало оплачиваемых и слабо квалифицированных водителей такси, что опять же ухудшает качество перевозок.

При этом существуют различные подходы к числу выдаваемых лицензий — от либерального, заявительного характера, до достаточно жёсткого регулирования (при этом в подавляющем большинстве случаев, и при том, и при другом варианте есть подлежащие обязательному выполнению технические требования).

Стоит отметить, что проведённые исследования многих городов мира указывают на то, что в городах со схожей демографией эффективность работы системы такси, тем не менее различается. Брюс Шаллер в своей книге пишет, что в городах, где есть контроль над количеством такси, наблюдается более эффективное и качественное оказание услуг, а также существенно ограничены риски коррупционной составляющей. Предметом регулирования являются правила входа на рынок новых операторов перевозок, дальнейший контроль за ними, влияние на количество выданных лицензий и их видов, отзыв лицензий [31; 32]. В Москве, например, эффективным методом стало установление срока действия лицензии, что исключило её передачу и перепродажу между перевозчика-



ми, как это было при неограниченном сроке действительности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ существующих подходов к определению спроса населения на таксомоторные перевозки и расчёту необходимого количества автомобилей-такси показал, что в настоящее время не существует единого универсального метода, который бы учитывал все возможные факторы, влияющие на спрос населения на таксомоторное обслуживание и работу легковых автомобилей-такси. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку единой методики расчёта, которая будет основываться на совокупности рассматриваемых методов, а также способной адаптироваться к постоянно меняющимся потребностям рынка перевозок исследуемого региона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Блудян Н. О., Мороз Д. Г., Хейфиц П. И. Проблемы государственного регулирования и организации таксомоторных перевозок в московской агломерации // В мире научных открытий. — 2015. — № 6. — С. 243–251.
2. Блудян Н. О. К концепции развития транспортного обслуживания населения в московском регионе // Автотранспортное предприятие. — 2009. — № 2. — С. 11–13.
3. Блудян Н. О., Мороз Д. Г., Хейфиц П. И. Территориально-транспортное прогнозирование и планирование в московской агломерации // Автотранспортное предприятие. — 2014. — № 2. — С. 18–21.
4. Блудян Н. О., Мороз Д. Г., Хейфиц П. И. Территориальное планирование таксомоторных перевозок в городской агломерации // Автоматизация и управление в технических системах. — 2014. — № 1. — С. 62–73.
5. 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.
6. Vazifeh M. M., Santi P., Resta G., Strogatz S. H., Ratti C. Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility. — Nature. — New York. — 2018. — 25 p.
7. Данилов М. Ф. Автомобильные перевозки: Учебно-методическое пособие по изучению темы «Таксомоторные перевозки». — Горький, 1962. — 47 с.
8. Блатнов М. Д. Исследование эксплуатации таксомоторного пассажирского транспорта / Дис... канд. техн. наук. — М.: АКХ, 1950. — 320 с.
9. Блатнов М. Д. Пассажирские автомобильные перевозки. — М.: Транспорт, 1973. — 304 с.
10. Блатнов М. Д., Будрин Б. Н. Эксплуатация таксомоторного транспорта. — М.: МКХ, 1953. — 176 с.
11. Зильберталь А. Х. Проблемы городского пассажирского транспорта. — М.: Гострансиздат, 1937. — 277 с.
12. Таранов А. Т. Перевозки пассажиров автомобильным транспортом. — М.: Транспорт, 1972. — 216 с.
13. Васильев Н. М. Зарубежный пассажирский автомобильный транспорт и организация его работы. — М.: Международные отношения, 1970. — 260 с.
14. Гранков В. П. Выборочное обследование. — М.: Госстатиздат, 1963. — 154 с.
15. Давидович В. Я., Лахман И. Л. Методы прогнозирования спроса. — М.: Экономика, 1972. — 86 с.
16. Методика изучения спроса на таксомоторные перевозки. — Алма-Ата, 1974. — 34 с.
17. Сыртанов С. К. Эксплуатационно-экономические вопросы организации таксомоторных перевозок (на примере Казахской ССР) / Автореф. дис... канд. экон. наук / АН Каз. ССР. Ин-т экономики. — Алма-Ата, 1967. — 24 с.
18. Устинова Э. И. Исследование вопросов расчёта ёмкости и размещения стоянок легковых автомобилей-такси в крупных городах / Автореф. дис... канд. техн. наук. Киев: Киев. инж.-строит. ин-т. — 1972. — 15 с.
19. Инструкция по изучению спроса населения на легковой автотранспорт. — М.: Минавтотранс РСФСР, 1965. — 20 с.
20. Абоян П. П. Исследование некоторых вопросов организации работы таксомоторного транспорта / Дис... канд. техн. наук. — М.: МАДИ, 1975. — 168 с.
21. Володин Е. П., Громов Н. Н. Организация и планирование перевозок пассажиров автомобильным транспортом. — М.: Транспорт, 1981. — С. 160–176.
22. Мун Э. Е. Определение потребностей населения города в легковых таксомоторных перевозках. — М.: ЦБНТИ Минавтотранса РСФСР, 1974. — 28 с.
23. Разработка предложений по улучшению обслуживания населения г. Москвы легковыми автомобилями-такси на базе материалов обследования пассажиропотоков на легковом таксомоторном транспорте. Научно-исследовательский отчёт. — М.: НИПИ Генплана, 1973. — 36 с.
24. Совершенствование организации таксомоторных перевозок пассажиров в г. Хабаровске. — Хабаровск, 1977. — 66 с.
25. Герами В. Д. Легковые пассажирские автомобильные перевозки / Методические указания к лабораторным работам по курсу «Технология, организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками». — М.: МАДИ, 1989. — 32 с.
26. Герами В. Д. Методические указания по совершенствованию организации таксомоторных перевозок в городах. — М.: МАДИ, 1989. — 48 с.
27. Герами В. Д. Совершенствование организации работы легковых автомобилей-такси // Дис... на соиск. учён. ст. канд. техн. наук. — М.: МАДИ, 1984. — 110 с.
28. Турукин А. Ю. Совершенствование организации работы легковых автомобилей-такси // Дис... канд. техн. наук. — М.: МАДИ, 1999. — 176 с.
29. Блудян Н. О., Мороз Д. Г. К проблеме обоснования и установления оптимального количества автомобилей-такси в мегаполисе // Автотранспортное предприятие. — 2013. — № 10. — С. 5–8.
30. Омарова З. К., Данилов С. В., Рябов И. М. Методика расчёта необходимого количества автомобилей-такси и оптимального количества таксомоторных стоянок в городах курортных зон // Интернет-журнал «Науковедение». — 2016. — № 6. — 7 с.
31. Sasnett C., Cypriano C. Taxicab Policy in New Orleans. — Loyola University New Orleans. — New Orleans, Louisiana. — 2009. — 15 p.
32. Shaller B. Taxicab fact book. — Shaller Consulting. — New York. — 2006. — 68 p.





# Analysis of Methods for Determining the Optimal Number of Taxi Cars in Megacities



**Dmitry G. MOROZ**



**Danila D. DOLENKO**



**Alexander V. PROKOPENKOV**

*Moroz, Dmitry G., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia. Dolenko, Danila V., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia. Prokopenkov, Alexander V., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia\*.*

## ABSTRACT

In modern large cities, taxi fleet is a significant component of the urban transport system. The degree of development and impact of taxi services on quality of transport services for residents and users traveling in the city depends on many factors. But one of the basic ones is the optimal ratio of the number of taxi cars and the demand for transportation by them.

The objective of the article was an analytical review of scientific research and practical work in the field of methods for solving the problems of organizing and operating taxi services, in particular, determining the existing population demand for taxi transportation and the required number of taxi cars. For analysis, the research used the method of

content analysis of the works of authors of several countries, including Russian ones.

The conducted analysis of existing approaches to determining the demand of the population for taxi transportation and to calculating the required number of taxi cars showed that at present there is no single universally recognized method for this.

The methods used are based on various methods which comprise statistical, sociological (surveys, observations), mathematical methods. The analysis of big data obtained using information systems of megacities is increasingly being used.

It is concluded that there is an objective need for research in the field of developing a universal methodology for determining the required (limit) number of taxi cars in metropolitan areas.

**Keywords:** urban transportation, population demand for taxi service, estimation of the required number of taxicabs, taxi service.

\* Information about the authors:

**Moroz, Dmitry G.** – Ph.D. (Eng), associate professor of the department of road transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, [dgm1984@mail.ru](mailto:dgm1984@mail.ru).

**Dolenko, Danila V.** – external Ph.D. student at the department of road transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, [dolenko66@yandex.ru](mailto:dolenko66@yandex.ru).

**Prokopenkov, Alexander V.** – Master's student at the department of road transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, [prokopenkovaleksandr@gmail.com](mailto:prokopenkovaleksandr@gmail.com).

Article received 28.02.2019, accepted 30.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 196.

**Introduction.** Currently, as far as we can judge on the basis of the analysis of the scientific sources from a number of countries, there is no any common approach to solving the problem of a balance between the population demand for taxi service and supply of the required number of taxis. The major problem is that the demand is not static, it is variable. Hence, the taxi number has to be corrected for supplying the demand [1]. It should also be noted that in the existing conditions for organizing taxi activities, it is almost impossible to achieve the optimal design ratio without using mathematical modeling, using a computer, without taking into account many factors, for example, uneven load by days of the week, time of day, boarding points, including taking into account mass events, identifying the part of the unsatisfied (presented) demand of the population for taxi services, which is satisfied by using other types of transport, car sharing, rented cars, and in some cases services of illegal carriers operating without permits.

It is high time to carry out researches for solving the taxi service management and operation tasks under the conditions of development of the aggregator market based on matching of the supply (the overall number of taxi vehicles) to the population demand for taxi service, as well as getting the balance between them [2].

**Objective.** The first step towards such research and the objective of the study is to provide an analytical overview of scientific researches and practical works in the field of methods for solving the problems of organizing and operating taxi services, first of all, determining the existing population demand for taxi transportation and the required number of taxi cars.

**Methods.** The method of content analysis of the works of the authors from several countries, including Russian authors, was used.

#### **Results.**

#### **Methods used in different countries: general and specific approaches**

The analysis of the methods used worldwide to determine the required number of taxi cars indicates that the vast majority of researchers use a multi-criteria approach to determining their number.

For example, factors such as population number, incoming and outgoing passenger flow

of airports, number of families owning a vehicle, and others are taken into account.

The difficulty of modeling lies in the fact that the system is not constant and depends on many external variables. Implicit factors can influence the demand for a service, and include, for example, taxi waiting time, reliable transportation and impressions of previous trips, changes in parking tariffs in key places of the city, cost of travel, dependence on time of day and peak hours, seasonality and even weather conditions, as well as cultural and social events [3–5]. It is possible to notice that solving such a problem with many variables is possible only with the use of simulation modeling (forecasting methods and models).

The study published last summer in the journal *Nature* by a group of researchers coordinated by Carlo Ratti, director of Senseable City Lab at Massachusetts Institute of Technology, proposed an efficient method for optimizing city taxi management, which is a modification of Hopcroft–Karp algorithm for a directed acyclic graph [6]. The study describes a network solution to minimize the city taxi fleet in a metropolis, taking into account the set of trips (indicating departure and destination points, as well as the start time), which is necessary for their service, without increasing waiting time for passengers. This method for the first time allowed to solve the problem of calculating the minimum taxi fleet, so that it:

- scales to hundreds of thousands and even millions of daily trips (previous algorithms allowed to do this only for a few thousand trips);
- allows to manage all trips in real time from a single control center;
- provides a near-optimal solution to the problem;
- does not require changing anything (laws, habits of drivers and passengers, etc.), except for transferring control over all the taxis to a single dispatch service and equipping all drivers with a single application for smartphones.

The algorithm represents a taxi fleet in the form of a graph, a mathematical abstraction consisting of nodes (or circles) and edges (lines between nodes). In this case, the nodes represent trips, and the ribs represent the fact that one particular vehicle can serve two particular trips. Using this graph, the algorithm was able to find the best solution for sharing a fleet of vehicles.



The team, which also included M. M. Wazifeh, the first author of the article and former lead researcher at Senseable City Lab; Giovanni Resta, Research Fellow at CNR Institute for Informatics and Telematics; and Stephen Strogatz, a professor of mathematics at Cornell University, tested the solution on a dataset of 150 million taxi rides made in New York within one year.

They calculated travel time using the actual Manhattan road network and GPS-based estimates from the taxi ride dataset.

They found that real-time implementation of the method with near-optimal service levels reduced fleet size by 30 percent.

The decision does not imply that any people should share the trip. Instead, it simply includes reorganization of the taxi dispatch operation, which can be performed using a simple smartphone application [6].

#### **Genesis of method development in Russia**

Analyzing Russian research and practical works, it is possible to conclude that the amount of modern scientific research in the field of main problems of organizing the work of passenger taxi cars, such as determining the current population demand for taxi transportation and determining the required number of passenger taxi cars, is small enough. Most papers consider calculation methods that were proposed back in the 1970–80s. This is mainly the works of P. P. Aboyan, M. D. Blatnov, L. A. Bronstein, V. D. Gerami, T. V. Lazarenko, A. Yu. Turukin, etc.

Currently, there are some studies [7–12] devoted to calculating the required number of taxi cars in a city. The main drawback of these works is that it is proposed to use statistical data on the number of trips for previous periods as initial input data, that becomes the cause of very approximate results.

At the same time, on the contrary, the practical value is provided by the data on real demand of the population of the city for taxi services, as soon as they can provide more accurate results of the calculation of the required number of passenger taxi cars in the city. The calculation methods used in the above works do not allow obtaining reliable data in this regard.

The objective information, which can be obtained as a result of various methods of transport surveys: questionnaire, statistical,

tabular, accounting, visual monitoring, is of particular importance.

Of all the above methods, the questionnaire method looks to be the most informative. Ways to determine the demand of the population for transportation by taxi cars are considered in [7, 13–16], in which the authors try to develop a methodology for such surveys. However, the main drawback of these works is that the methods proposed in them determine only the realized demand, while the total demand of the population for transportation is not determined.

It should also be noted that the methods for determining the demand of the population for routed modes of transport cannot be applied to taxi transportation, since formation of demand for transportation by passenger taxi cars is significantly influenced by random factors, therefore it is impossible to apply a deterministic model for them, therefore, to solve the main problems of organizing taxi transportation, it is necessary to use mathematical methods of probability theory.

Mathematical methods were used in [17; 18], devoted to the study of functioning of taxi ranks. The main disadvantage of these works is the lack of methods for determining the needs of the population for taxi services.

One of the works devoted to determining the demand of the population for taxi transportation is the Minavtotrans RSFSR [ministry of road transportation of former Russian Soviet Federative Republic] methodology [19]. In this work, the demand of the population for taxi services is determined on the basis of identifying unsatisfied (presented) demand, using a special survey technique, which consists in a questionnaire survey of the city population at the place of residence. However, such a survey does not allow to obtain the necessary data, since the proposed survey method contains elements of subjectivity. It should also be noted that the methodology provides for the possibility of calculating the need for taxi services without conducting a survey by determining the coefficient of unmet demand. However, its values are given without any justification, as a result of which the value of the method is reduced and the possibility of its application is limited.

An attempt to identify the total demand was made in the work of P. P. Aboyan [20], in which the actual demand was determined by the





results of a transport survey, consisting of a questionnaire survey of passengers of passenger taxi cars and visual observation at taxi ranks. The main disadvantages of the work are complexity and significant cost and time spent on organizing, conducting and processing the survey results.

An approximate form of questionnaires filled in by drivers or passengers is presented in [16; 21; 20–24]. The main disadvantage of the proposed questionnaires was their volume and the lack of conditional alphanumeric filling, which would have significantly reduced time for filling and processing the data entered into the questionnaire.

In the works of V. D. Gerami [25–27], devoted to improving organization of passenger taxi cars, a technique was developed based on a mathematical model using an integrated approach program, which made it possible to determine the unsatisfied (presented) demand of the population. Consequently, it was possible to identify the complete need of the population for taxi transportation, and also to calculate the required number of passenger taxi cars with significantly less time spent on organizing, conducting the survey and processing the results. However, there is a need to verify the compliance of this methodology with modern

conditions of taxi operation by using new computer technologies.

An attempt to confirm the adequacy of the methodology by V. D. Gerami was made in the work of A. Yu. Turukin [28], in which a program was developed and put into practice for automated processing of data for examining operation of passenger taxi cars and functioning of taxi ranks (at the example of Moscow) based on existing survey forms adapted to new operating conditions, algorithms for their systematization and calculation. Statistical processing of the results of the survey was carried out using this technique, an optimization method for determining the required number of taxi cars was developed and applied in practice using computers, taking into account the demand of the population on the basis of mathematical modeling, which in turn is based on a simulation model with elements of statistical modeling of functioning of taxi vehicles.

Analysis of the problem of justifying and establishing the optimal number of taxi cars in a metropolis can be found in the article by N. O. Bludyan and D. G. Moroz [29]. In the article, the authors, as a result of the analysis of existing approaches to determining the number of taxi cars and modern practices,



came to the conclusion that at present there is no single universal method for determining them, and also pointed out the need to develop a methodology that would take into account all existing methods together and would be able to meet the ever-changing needs of the taxi market in the region.

The work [30] provides a methodology for calculating the required number of taxi cars in the cities of resort areas. The calculation of the number of taxi cars during peak hours is carried out according to a special formula that takes into account the following indicators: average daily mileage of a taxi car; the coefficient of uneven transportation by hours of the day, days of the week and by months of the holiday season; average number of passengers carried per trip; average taxi car mileage; mileage utilization coefficient. The main disadvantage of this methodology is that, for example, the formula does not take into account such an important indicator as waiting time for a taxi car, which, in turn, as noted above, in modern conditions of taxi service directly depends on the number of taxi cars in the region. It should also be noted that the formula cannot be used to calculate the number of cars in a megalopolis, since it does not take into account many important parameters inherent in a megalopolis, for example, the number of people who own private cars, the number of public events in the city, etc.

#### **Taxi quantity regulation methods**

Although the topic of regulating the number of taxi cars is separate and requires a separate analysis, nevertheless it is closely related to the general problem of their optimal number and therefore deserves at least a brief review.

All these factors and many others need to be taken into account and a «flexible» system capable of responding to changes in the external environment [31; 32] should be created.

According to the experience of regulating the number of taxi cars in various cities of the world, it can be noted that the main tool for influencing their number is the use of licensing of transportation activities by taxi cars.

To ensure the availability of taxi cars throughout the city, regular assessments are made of the number of licenses issued. Otherwise, it is possible to get an excess or, on the contrary, a shortage of taxi cars, which will affect quality of services and tariffs. When working with too few taxis, there is a shortage

of supply, which gives rise to a long waiting time or refusal to request transportation, which will reduce quality of the services provided. The work of an excessive number of taxi cars will lead to obsolescence and misuse of fleet, high turnover among low-paid and poorly qualified taxi drivers, which again will worsen quality of transportation.

At the same time, there are various approaches to the number of licenses issued – from a liberal, application-based nature, to rather strict regulation (in the vast majority of cases, and in this case also, there are certainly technical requirements subject to mandatory fulfillment).

It is worth noting that studies conducted in many cities around the world indicate that in cities with similar demographics, the efficiency of the taxi system nonetheless varies. Bruce Schaller writes in his book that in cities where there is control over the number of taxis, there is a more efficient and high-quality provision of services, and the corruption risks are significantly limited. The subject of regulation is the rules of entry into the market of new transport operators, further control over them, the impact on the number of issued licenses and their types, revocation of licenses [31; 32]. In the city of Moscow, for example, the establishment of the license validity period became an effective method, which excluded its transfer and resale between carriers, as was the case with an unlimited validity period.

**Conclusion.** The analysis of some approaches to estimating the demand of the population for taxi services and the required number of taxis showed that currently there is no common valid estimation method, which could take into consideration all possible factors impacting population demand for taxi service. Further researches should develop a common estimating methodology that would take into consideration all available methods in the aggregate and will be able to meet dynamic taxi market needs in the region.

#### **REFERENCES**

1. Bludyan, N. O., Moroz, D. G., Kheifits, P. I. Problems of state regulation and organization of taxi transportation in Moscow metropolitan area [*Problemy gosudarstvennogo regulirovaniya i organizatsii taksomotornykh perevozk v moskovskoi aglomeratsii*]. *V mire nauchnykh otkrytii*, 2015, Iss. 6, pp. 243–251.
2. Bludyan, N. O. On the concept of development of transport services for the population in Moscow region [*O kontseptsii razvitiya transportnogo obsluzhivaniya naseleniya*].

v moskovskom regione]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2009, Iss. 2, pp. 11–13.

3. 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*]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2014, Iss. 2, pp. 18–21.

4. Bludyan, N. O., Moroz, D. G., Kheifits, P. I. Territorial planning of taxi transportation in the city agglomeration [*Territorialnoe planirovaniye taksomotornykh perevozk v gorodskoi aglomeratsii*]. *Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh*, 2014, Iss. 1, pp. 62–73.

5. Pistun, E. I., Bludyan, N. O., Moroz, D. G., Kheifits, P. I. Agglomeration problems of organizing an efficient transport system [*Agglomeratsionnye problem organizatsii effektivnoi transportnoi sistemy*]. *Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh*, 2014, Iss. 2, pp. 3–13.

6. Vazifeh, M. M., Santi, P., Resta, G., Strogatz, S. H., Ratti, C. Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility. *Nature* 557, 534–538 (2018). DOI:10.1038/s41586-018-0095-1.

7. Danilov, M. F. Road transportation [*Avtomobilnye perevozki*]. Educational-methodical manual for the study of the topic «Taxi transportation», Gorky, 1962, 47 p.

8. Blatnov, M. D. Investigation of the operation of taxi passenger transport. Ph.D. (Eng) thesis [*Issledovanie ekspluatatsii taksomotornogo passazhirskogo transporta*. Dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, Publishing house AKH, 1950, 320 p.

9. Blatnov, M. D. Passenger road transportation [*Passazhirskie avtomobilnye perevozki*]. Moscow, Transport publ., 1973, 304 p.

10. Blatnov, M. D., Budrin, B. N. Operation of taxi transport [*Ekspluatatsiya taksomotornogo transporta*]. Moscow, Publishing House MKH, 1953, 176 p.

11. Zilbertal, A. Kh. Problems of urban passenger transport [*Problemy gorodskogo passazhirskogo transporta*]. Moscow, Gostransizdat, 1937, 277 p.

12. Taranov, A. T. Passenger transportation by road transport [*Perevozki passazhirov avtomobilnym transportom*]. Moscow, Transport publ., 1972, 216 p.

13. Vasiliev, N. M. Foreign passenger motor transport and organization of its work [*Zarubezhnyi passazhirskiy avtomobilnyy transport i organizatsiya ego raboty*]. Moscow, Publishing House «International Relations», 1970, 260 p.

14. Grankov, V. P. Sampling [*Vyborochnoe obsledovanie*]. Moscow, Gosstatizdat, 1963, 154 p.

15. Davidovich, V. Ya., Lakhman, I. L. Demand forecasting methods [*Metody prognozirovaniya sprosa*]. Moscow, Ekonomika publ., 1972, 86 p.

16. The methodology of studying the demand for taxi transportation [*Metodika izucheniya sprosa na taksomotornie perevozki*]. Alma-Ata, 1974, 34 p.

17. Syrtanov, S. K. The operational and economic issues of organization of taxi transportation (at the example of Kazakh SSR). Abstract of Ph.D. (Economics) thesis [*Ekspluatatsionno-ekonomicheskie voprosy organizatsii taksomotornykh perevozk (na primere Kazakh SSR)*. Avtoref. dis... kand. ekon. nauk]. Academy of Science of Kaz. SSR, Institute of Economics, Alma-Ata, 1967, 24 p.

18. Ustinova, E. I. Research on calculation of capacity and location of taxi ranks in large cities. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [*Issledovanie voprosov rascheta emkosti i razmeshcheniya stoyanok legkovykh avtomobilei-taxi v krupnykh gorodakh*. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Kiev. Ing.-builds. Inst., Kiev, 1972, 15 p.

19. Instructions for the study of population demand for passenger cars [*Instruktsiya po izucheniyu sprosa naseleniya na legkovoii avtotransport*]. Moscow, Minavtotrans RSFSR, 1965, 20 p.

20. Aboyan, P. P. Investigation of some issues of organization of work of taxi transport. Ph.D. (Eng) thesis [*Issledovanie nekotorykh voprosov organizatsii raboty taksomotornogo transporta*. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, MADI, 1975, 168 p.

21. Volodin, E. P., Gromov, N. N. Organization and planning of passenger transportation by road [*Organizatsiya i planirovaniye perevozk passazhirov avtomobilnym transportom*]. Moscow, Transport, 1981, pp. 160–176.

22. Moon, E. E. Determination of the needs of the city population in passenger taxi transport [*Opredeleniye potrebnosti naseleniya goroda v legkovykh taksomotornykh perevozkakh*]. Moscow, TSBNTI Minavtotransa RSFSR, 1974, 28 p.

23. The development of proposals to improve the service of the population of Moscow with taxi cars based on the survey of passenger flows in passenger taxi transport. Research report [*Razrabotka predlozhenii po uluchsheniyu obsluzhivaniya naseleniya Moskvyy legkovymi avtomobilyami-taxi na baze materialov obsledovaniya passazhiropotokov na legkovom taksomotornom transporte*. Nauchno-issledovatel'skiy otechet]. Moscow, NIPI of the General Plan, 1973, 36 p.

24. Improving the organization of passenger taxi transportation in Khabarovsk [*Sovershenstvovaniye organizatsii taksomotornykh perevozk passazhirov v Khabarovske*]. Khabarovsk, 1977, 66 p.

25. Gerami, V. D. Passenger road transportation: Guidelines for laboratory work on the course «Technology, organization and management of passenger road transportation» [*Legkovye passazhirskie avtomobilnye perevozki: Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam po kursu «Tekhnologiya, organizatsiya i upravleniye passazhirskimi avtomobilnymi perevozkami*]. Moscow, MADI, 1989, 32 p.

26. Gerami, V. D. Methodological guidelines for improving organization of taxi transportation in cities [*Metodicheskie ukazaniya po sovershenstvovaniyu organizatsii taksomotornykh perevozk v gorodakh*]. Moscow, MADI, 1989, 48 p.

27. Gerami, V. D. Improving organization of work of taxi cars. Ph.D. (Eng) thesis [*Sovershenstvovaniye organizatsii raboty legkovykh avtomobilei-taxi*. Dis... na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk]. Moscow, MADI, 1984, 110 p.

28. Turukin, A. Yu. Improving the organization of work of taxi cars. Ph.D. (Eng) thesis [*Sovershenstvovaniye organizatsii raboty legkovykh avtomobilei-taxi*. Dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, MADI, 1999, 176 p.

29. Bludyan, N. O., Moroz, D. G. On the problem of substantiating and establishing the optimal number of taxi cars in a metropolis [*K probleme obosnovaniya i ustanovleniya optimalnogo kolichestva avtomobilei-taxi v megapolise*]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2013, Iss. 10, pp. 5–8.

30. Omarova, Z. K., Danilov, S. V., Ryabov, I. M. The method of calculating the required number of taxi cars and the optimal number of taxi ranks in the cities of resort areas [*Metodika rascheta neobkhodimogo kolichestva avtomobilei-taxi i optimalnogo kolichestva taksomotornykh stoyanok v gorodakh kurortnykh zon*]. *Internet-journal «Naukovedenie»*, 2016, Iss. 6, 7 p.

31. Sasnett, C., Cypriano, C. Taxicab Policy in New Orleans. Under the direction of P. F. Burns. Loyola University New Orleans, New Orleans, Louisiana, 2009, 15 p. [Electronic resource]: <http://blogs.loyno.edu/polisci/files/loyola-university-new-orleans-taxicab-policy.pdf>. Last accessed 28.02.2019.

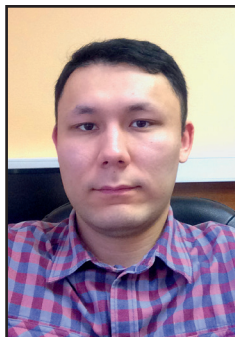
32. Shaller, B. Taxicab fact book, Shaller Consulting, New York, 2006, 68 p. [Electronic resource]: <http://www.schallerconsult.com/taxi/taxifb.pdf>. Last accessed 28.02.2019.







# Динамические приоритеты пропуска грузовых поездов в коммерческих целях

**Виктор ШАРОВ****Алмас ТЛЕУХАНОВ**

*Шаров Виктор Александрович – Российский университет транспорта, Москва, Россия.  
Тлеуханов Алмас Асхатулы – Инжиниринговый центр АО «КАЗАТК», Астана, Казахстан\*.*

Одной из главных задач совершенствования управления перевозочным процессом является переход к ориентированному на удовлетворение требований пользователей качеству транспортного обслуживания при достижении наиболее экономических результатов всех составляющих этапов технологического процесса. Качество предлагаемых услуг на железнодорожном транспорте постепенно становится всё более значимым показателем экономической эффективности как у перевозчиков, так и у грузовладельцев.

Клиенты готовы покупать всё больше качественных услуг для экономии времени, расширения бизнеса, удовлетворения новых потребностей. Это обуславливает необходимость разработки современных подходов к оптимизации использования имеющейся инфраструктуры железных дорог, в том числе за счёт установления приоритетов при организации движения.

Целью исследования являлось изучение порядка установления динамических приоритетов

для организации пропуска грузовых поездов. Для достижения указанной цели использовались метод сравнительного анализа, специальные инженерные методы расчётов, связанные с организацией движения поездов.

В ходе исследования проведён сравнительный анализ основных характеристик ряда железных дорог других стран. В связи с чётко обозначенной стратегией работы железной дороги Российской Федерации, нацеленной на клиентоориентированность, в данной статье приведены предварительные результаты исследований, выводы которых выявили целесообразность пропуска грузовых поездов с динамическими приоритетами. Особенно актуально реализовывать эти подходы в условиях оперативного изменения поездной ситуации в случаях возникновения нештатных событий на инфраструктуре и возможного снижения финансовых потерь грузоотправителей и грузополучателей.

Эти же подходы правомерно использовать на железной дороге Республики Казахстан.

**Ключевые слова:** железная дорога, приоритетность пропуска грузовых поездов, качество обслуживания, управление, перевозка, график движения поездов, клиентоориентированность.

\*Информация об авторах:

**Шаров Виктор Александрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, [vasharov\\_mii@mail.ru](mailto:vasharov_mii@mail.ru).

**Тлеуханов Алмас Асхатулы** – главный специалист ТОО «Инжиниринговый центр» АО «КАЗАТК», Астана, Казахстан, [hatkz888@mail.ru](mailto:hatkz888@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 31.01.2019, актуализирована 12.07.2019, принята к публикации 25.08.2019.

For the English text of the article please see p. 213.



**В** настоящее время во многих странах грузовые перевозки железнодорожным транспортом занимают ведущие позиции. Особенно это справедливо в отношении России и Казахстана. Вместе с тем, в конкуренции за распределение клиентов между видами транспорта всё большее значение приобретают показатели, характеризующие качество перевозки, в том числе своевременность. В этих условиях необходима разработка современных подходов к поиску путей оптимизации использования имеющейся инфраструктуры железных дорог. *Целью* исследования является изучение порядка установления динамических приоритетов для организации пропуска грузовых поездов. Использовались общенаучные *методы*, метод сравнительного анализа, специальные инженерные методы расчётов, связанные с организацией движения поездов.

## **МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК: ОБЩИЕ ПОДХОДЫ**

При изучении международного опыта железнодорожного транспорта обращают на себя внимание: «американский» и «европейский» опыт формирования моделей рынка грузовых железнодорожных перевозок; наличие в условиях высокого уровня развития рыночных институтов и экономики как мощных направлений грузопотоков, так и линий с небольшой загрузкой; особенности, обусловленные географическим расположением каждой страны и сложившейся в ней средой конкуренции железных дорог с альтернативными им видами транспорта.

В Северной Америке на сегодняшний день в рамках единой сети железных дорог существует деление на 3 класса. К первому классу причислено семь железных дорог (BNSF Railway, Canadian National, Canadian Pacific и т.д.). Более 550 дорог отнесены ко второму и третьему классам, включающим линии короткой протяжённости и дороги местного значения. Согласно данным Ассоциации американских железных дорог (Association of American Railroads) на долю дорог первого класса приходится около 70 % всей протяжённости железнодорожных путей США и 90 % от суммарного

числа занятых на железнодорожном транспорте [1].

Возможность адаптации американской модели для российских железных дорог рассматривалась в своё время в рамках рекомендаций ОЭСР и Всемирного Банка, в том числе и известным американским экономистом Расселом Питтманом, который отмечал, что железнодорожная сеть Российской Федерации в её европейской части позволяет реализовать схему конкуренции интегрированных компаний [2, с. 11].

Одним из наиболее успешных в Европе признаётся опыт Германии, в которой реформа железнодорожного транспорта началась ещё в 1994 году. Существенным фактом было то, что она происходила не просто как акционирование государственного предприятия, а как слияние в одну компанию Deutsche Bahn AG (DB AG) двух железнодорожных предприятий: Deutsche Bundesbahn (ФРГ) и Deutsche Reichsbahn (бывшей ГДР). Одновременно было образовано Федеральное ведомство железных дорог (Eisenbahnbundesamt), которое выдало DB AG разрешение на эксплуатацию инфраструктуры и осуществление пассажирских и грузоперевозок [3].

Из таблицы 1 можно увидеть, что показатели сети железных дорог РФ значительно отличаются от железных дорог ведущих стран ЕС в большую сторону и значительно ближе, чем они, к показателям Канады и США.

В Казахстане в июне 2016 году в результате реализации проекта по поэтапному переходу к целевой организационной структуре в рамках «Программы трансформации бизнеса» функции оказания услуг по перевозке грузов были переданы АО «КТЖ-Грузовые перевозки». Данный проект позволил оптимизировать ряд дочерних организаций АО «НК «КТЖ» [4].

Национальный перевозчик Казахстана («Казахстан темір жолы») подписал несколько стратегических соглашений:

1) о сотрудничестве в транспортно-логистической сфере с компаниями DHL (Германия) и John Deere (США). Соглашением предусмотрено создание на территории специальной экономической зоны (СЭЗ) «Хоргос—Восточные ворота» центра консолидации и дистрибуции продукции John Deere на Евразийском рынке;



# Влияние условий функционирования железнодорожной сети на выбор модели структурной организации отрасли

Страны	Средний вес грузового поезда, тонн	Среднее кол-во вагонов в грузовом поезде	Среднее расстояние грузовой перевозки, км
Германия	500	12	320
Франция	380	10	375
Великобритания	800	20	215
Польша	640	17	245
Канада	2900	72	1100
США	2850	69	915
Российская Федерация	2255	61	1700

Источник: анализ ИПЕМ ([Электронный ресурс]: [http://ipem.ru/files/files/research/23\\_04\\_2013\\_rail\\_foreignreform.pdf](http://ipem.ru/files/files/research/23_04_2013_rail_foreignreform.pdf); <http://ipem.ru/news/publications/676.html>).

2) о разработке, поставке и обслуживании локомотивов с General Electric Transportation (США) [5].

В 2017 году объём транспортно-логистического рынка в России оценивался в 2,5 трлн руб., а услуга базовой перевозки безоговорочно оставалась основной услугой на рынке (доля в общем объёме транспортных и логистических услуг составляла 88 %), что в целях реализации потенциала роста перевозок является стимулом для разработки новых услуг [6, с. 15]. Для достижения этой цели в 2017 году началась разработка единого каталога услуг, оказываемых холдингом «РЖД», что стало также и естественной реакцией на активизацию других видов транспорта. Конкуренция с автотранспортом за перевозку грузов на средних и дальних маршрутах возникает достаточно регулярно, в том числе из-за дефицита провозных способностей на отдельных железнодорожных направлениях. Но в настоящее время в отношениях между этими видами транспорта всё более возрастает значение качества обслуживания и, в первую очередь, такого его показателя, как своевременность доставки грузов, что ставит задачу поиска путей оптимизации пропуска грузовых поездов.

## ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПРИОРИТЕТНОГО ПРОПУСКА ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Согласно Правилам технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [7, п. 5 Приложения № 6], перевозка грузов находится на девятом месте в установленной очередности приоритетности поездов, что объясняется требова-

ниями безопасности. Далее они ранжируются с коммерческих позиций и при планировании грузовых перевозок окончательная приоритетность воплощается в графике движения поездов [8, с. 33–35].

Важным шагом в совершенствовании движения грузовых поездов по расписанию стали разработанные в ОАО «РЖД» «Комплексная программа поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию на 2011–2015 годы» и «Комплексная интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию» [9], где эти приоритеты задаются заранее. В настоящее время приоритеты при разработке графика движения грузовых поездов предоставляются в первую очередь тем поездам, которые имеют более высокую коммерческую ценность.

Варианты обращения таких поездов научно обоснованы и опубликованы в открытом доступе [10, с. 21]. В проводимых нами исследованиях поставлена задача детальной проработки вопроса целесообразности пропуска грузовых поездов с динамическим приоритетом, то есть приоритетом, изменяющимся в условиях оперативного изменения поездной ситуации.

Работа железнодорожного участка как транспортной системы при отсутствии поездов повышенного качества перевозок с дифференцированным режимом следования, в первую очередь, зависит от коэффициента загрузки  $\gamma$ , определяемого как:

$$\gamma = \frac{N_{\phi}(T_{пл})}{N_n(T_{пл})} = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (1)$$

где  $N_{\phi}(T_{пл})$  – фактическое количество поездов, пропущенных по участку за период  $T_{пл}$ ;



$N_n(T_{пл})$  — максимально возможное количество поездов, которое может проследовать по участку, исходя из наличной пропускной способности за период  $T_{пл}$ ;

$\lambda$  — интенсивность предъявления поездов для пропуска по участку (входящего на участок поездопотока);

$\mu$  — интенсивность пропуска поездов по участку (обслуживания входящего поездопотока).

Влияние  $\gamma$  на показатели работы участка выражается через изменение скорости пропуска поездопотока (например,  $\beta_{уч} = f(\gamma)$ ), необходимость создания дополнительного путевого развития на раздельных пунктах (буферных устройств) для условий потенциального нарушения нормального режима функционирования участка из-за технических или технологических сбоев.

Введение поездов с дифференцированным режимом продвижения, имеющих более высокий приоритет при пропуске по участку и нарушающих принцип работы «первым пришёл — первым обслужили», безусловно, должно сказаться на выделенных показателях.

В рассматриваемом примере процессы пропуска поездов имеют два различных вида приоритетов: *статический* и *динамический*. Приоритеты — это просто условные значения, выражающие относительную значимость, которая должна быть присвоена процессу или объекту процесса. Чем выше приоритет, тем больше его шансы получить доступ к обслуживанию.

Таким образом, *статический приоритет* не изменяется с течением времени (в нашем случае — это требования ПТЭ, где приоритеты пропуска поездов расставлены для грузовых поездов, а грузовые поезда ранжируются в нормативном графике),

а *динамический приоритет* снижается или повышается для конкретного грузового поезда с течением времени ожидания обслуживания (или обеспечения своевременной доставки груза).

Для наглядности можно представить статические приоритеты, когда в нормативном графике прокладываются нитки для ускоренных грузовых поездов (контейнерных, со скоропортящимися грузами и т.д.) или поездов с согласованным временем прибытия, а динамические приоритеты, когда приходится вносить изменение в график из-за пропуска опаздывающих грузовых поездов или предъявления грузового поезда с особыми требованиями по времени доставки его получателю (например, замыкающего судовую партию в порту или сдерживающего технологический процесс предприятия из-за дефицита поступающего сырья).

На этапе предварительного планирования принимаем, что моменты поступления поездов на обслуживание и продолжительность этого обслуживания известны, т.е. можем рассматривать систему как детерминированную.

В силу специфики поездообразования, а также из-за технических и технологических отказов в работе участка в определённые периоды могут возникнуть отклонения от стационарного состояния, и к моменту  $t = t_0$  в системе возможно спорадическое образование очередей  $N_q(t) = \{0, 1, 2, \dots, m\}$ , где  $m$  — максимальное количество требований в системе в ожидании обслуживания, определяемое её ёмкостью (в нашем примере — количеством путей на раздельном пункте).

Поэтому представляет интерес виртуальное время разгрузки системы, когда очередь полностью ликвидируется и очередное тре-







бование без задержки поступит на обслуживание (система вернётся в стационарное состояние) при наличии и отсутствии приоритетов.

Если рассматривать  $t_{ожд}$  как допустимое время пребывания  $i$ -го требования в системе, то на обслуживание выбирается требование, у которого оставшееся допустимое время пребывания в системе минимально. При таком описании класс приоритетности является функцией времени нахождения требования в очереди.

Для рассмотренной задачи подход несколько меняется в силу того, что критерием назначения приоритета служат не  $t_{ожд}$ , а  $\Delta T(l_j)$  и вытекающие из этого финансовые показатели (либо доход  $D_i$ , если  $\Delta T(l_j) = T_i^{\Phi}(l_j) - T_i^H(l_j) \leq 0$ ; либо штраф  $\Pi_i$ , если  $\Delta T(l_j) > 0$ ). Для оценки вероятности получения дохода или выплаты штрафа в зависимости от величины  $\Delta T(l_j)$ , используем математический инструмент, ранее изложенный в [11, с. 110–112].

Динамический приоритет следует устанавливать, пользуясь показателем потенциального убытка  $\Pi_i(l_j)$  для  $i$ -й отправки на  $j$ -м объекте. Его величина определяется как:

$$\Pi_i(l_j) = \Pi_i^H (1 - P\{T_i(l_j) \leq T_d^H | \Delta T_i(l_j)\}), \quad (2)$$

где  $\Pi_i^H$  — величина штрафа для  $i$ -й отправки в соответствии с договором;

$P\{T_i(l_j) \leq T_d^H | \Delta T_i(l_j)\}$  — вероятность выполнения договорного срока доставки отправки  $T_d^H$ , если на объекте  $j$  величина отклонения от нормативного значения  $T_i^H(l_j)$  составила  $\Delta T_i(l_j)$ .

Характерны в этом контексте тенденции перевозки «дорогих» грузов, например, скоропортящихся или зерновых. Рост объёмов перевозки зерновых грузов железнодорожным транспортом отличается неравномерностью отгрузки по периодам года, в выходные и праздничные дни, низким уровнем маршрутизации [12, с. 43]. Актуальным становится и ускорение оборота вагонов специализированного парка, особенно при формировании судовых партий. Утверждённый «Единый перечень работ и услуг, оказываемых ОАО «РЖД» при организации перевозок груза» (№ 1574/р от 24.07.2018 г.) позволяет также выделить приоритетность перевозок грузов при оказании услуги «Грузовой экспресс», при перевозке грузов и порож-

них вагонов большой скоростью и ряд других [13].

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Таким образом, можно сделать вывод, что даже при разработанном графике движения грузовых поездов со статическими приоритетами возможно и целесообразно в отдельных оперативных случаях использовать динамический приоритет в целях снижения потерь компании при реализации риска нарушения срока доставки отправки, приводящего к серьёзным финансовым потерям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голомолзин А. Н. На железных дорогах Америки и Европы реформы привели к успеху. [Электронный ресурс]: <http://www.rostransport.com/article/4427/>. Доступ 20.02.2019.
2. Pittman R. Railway Competition: Options for the Russian Federation // CEFIR Working Paper. — 2002. — № 14. — С. 1–11.
3. Арсланов М. Железнодорожная реформа в Германии: сила государства. [Электронный ресурс]: <https://cfts.org.ua/articles/43554>. Доступ 20.02.2019.
4. АО «КТЖ — Грузовые перевозки». [Электронный ресурс]: <https://ktzh-gp.kz/ru/about/>. Доступ 20.02.2019.
5. Департамент экономической конъюнктуры и стратегического развития ОАО «РЖД». Развитие и реформирование зарубежных железных дорог. Годовой аналитический отчёт. — М., 2018. — 58 с.
6. Шаров В. А. Разработка единого каталога услуг, оказываемых холдингом «РЖД» // Железнодорожный транспорт. — 2016. — № 6. — С. 9–15.
7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены приказом № 286 от 21.12.2010 г. Министерства транспорта Российской Федерации (в ред. приказов Минтранса России от 04.06.2012 г. № 162, от 30.03.2015 г. № 57).
8. Шаров В. А., Батулин А. П. Приоритетность грузовых поездов как критерий обоснования скоростей // Железнодорожный транспорт. — 2017. — № 3. — С. 33–35.
9. Комплексная программа поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию на 2011–2015 годы. Утв. первым вице-президентом ОАО «РЖД» В. Н. Морозовым 16.03.2011 г.
10. Лемешко В. Г., Шаров В. А. О переходе на технологию организации движения грузовых поездов по расписанию // Железнодорожный транспорт. — 2010. — № 8. — С. 18–26.
11. Шаров В. А. Технологическое обеспечение перевозок грузов железнодорожным транспортом в условиях рыночной экономики. — М.: Интекст, 2001. — 198 с.
12. Кужель А. Л. Необходим комплексный подход // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 9. — С. 41–43.
13. Единый перечень работ и услуг, оказываемых ОАО «РЖД» при организации перевозок груза (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 24.07.2018 г. № 1574/р). [Электронный ресурс]: [https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-OAO-RZHD-ot-24.07.2018-N-1574\\_r/](https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-OAO-RZHD-ot-24.07.2018-N-1574_r/). Доступ 25.04.2019.

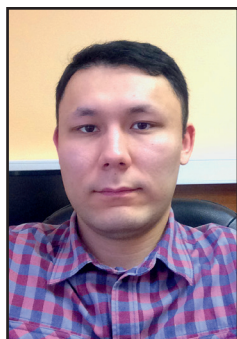




# Commercially Focused Dynamic Priorities in the Organisation of the Transit of Cargo Trains



Victor A. SHAROV



Almas A. TLEUKHANOV

*Sharov, Victor A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.  
Tleukhanov, Almas A., LLP Engineering Center, JSC KazATK, Astana, Kazakhstan.*

## ABSTRACT

One of the main tasks in improving management of the transportation process is the transition to enhanced quality of transport service focused on meeting users' requirements while achieving the most economical results for all the components of the technological process stages. The quality of the services offered by railway transport is gradually becoming an increasingly significant indicator of economic efficiency for both carriers and cargo owners.

Customers are ready to buy more and more qualitative services to save time, expand their business, and meet new needs. This necessitates development of modern approaches to optimizing the use of existing railway infrastructure, including by establishing priorities in organizing traffic.

The objective of the research was to study the procedure for establishing dynamic priorities for organizing transit of cargo trains. To achieve

this goal, a comparative analysis method, special engineering calculation methods associated with organization of train traffic were used.

During the study comparative analysis of main characteristics of a number of world railways was carried out. Following clearly defined strategy of railways of the Russian Federation aimed at customer focus, this article provides preliminary research results, the findings of which revealed the expediency of establishing dynamic priorities for cargo trains transit. It is especially important to implement these approaches in the context of an operational change in the train situation in the event of emergency events on the infrastructure and for a possible reduction in the financial losses of consignors and consignees.

The same approaches can rightfully be used on the railway of the Republic of Kazakhstan.

**Keywords:** railway, priority of transit of cargo trains, quality of service, management, transportation, train schedule, customer focus.

\* Information about the authors:

**Sharov, Victor A.** – D.Sc. (Eng), professor, head of the department of operational work and transport safety management of Russian University of Transport, Moscow, Russia, [vasharov\\_miit@mail.ru](mailto:vasharov_miit@mail.ru).

**Tleukhanov, Almas A.** – chief specialist of LLP Engineering Center, JSC KazATK, Astana, Kazakhstan, [hatkz888@mail.ru](mailto:hatkz888@mail.ru).

Article received 31.01.2019, revised 12.07.2019, accepted 25.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 208.

**Background.** Currently, in many countries, cargo transportation by rail occupies a leading position, this is especially true for Russia and Kazakhstan. However, in the competition for distribution of customers between modes of transport, indicators characterizing quality of transportation, including timeliness, are becoming increasingly important. Under these conditions, it is necessary to develop modern approaches to finding ways to optimize the use of existing railway infrastructure.

**Objective.** The objective of the study is to study the procedure for establishing dynamic priorities for organizing transit of cargo trains.

**Methods.** The authors used general scientific methods, a comparative analysis method, special engineering calculation methods related to organization of train traffic.

#### **Results.**

#### **International experience in organizing cargo rail transportation: common approaches**

When studying the international experience of railway transport, attention is drawn to: «American» and «European» experience in formation of models of the market for cargo rail transportation; the presence under the conditions of highly developed market institutions and the economy of both powerful directions of cargo flows and lines with a small load; features due to the geographical location of each country and the prevailing environment of competition of railways with alternative modes of transport.

In North America today, within the framework of a single railway network, there is a division into 3 classes. The first class includes seven railways (BNSF Railway, Canadian National, Canadian Pacific, etc.). More than 550 railways are assigned to the second and third classes, including short lines and local railways. According to the Association of American Railroads, first-class railways account for about 70 % of the total length of US railways and 90 % of the total number of people employed in railway transport [1].

The possibility of adapting the American model for Russian railways was considered in one's time in the framework of the recommendations of the OECD and the

World Bank, as well as by the well-known American economist Russell Pittman, who noted that the railway network of the Russian Federation in its European part allows implementing a competition scheme for integrated companies [2, p. 11].

The experience of Germany, in which the reform of railway transport began back in 1994 is recognized as one of the most successful in Europe. The essential fact was that it happened not just as a corporization of a state owned enterprise, but as a merger of two railway enterprises: Deutsche Bundesbahn (Germany) and Deutsche Reichsbahn (former GDR) into one company Deutsche Bahn AG (DB AG). At the same time, the Federal Railways Authority (Eisenbahnbundesamt) was formed, which issued DB AG permission to operate the infrastructure and to carry out passenger and cargo transportation [3].

From Table 1 it can be seen that the indicators of the Russian railway network are significantly different from the railways of the leading EU countries being larger and much closer than they to the indicators of Canada and the United States.

In Kazakhstan, in June 2016, as a result of the project on a phased transition to the new organizational structure as part of the Business Transformation Program, the functions of providing cargo transportation services were transferred to JSC KTZ—Freight Transportation. This project allowed to optimize a number of subsidiaries of JSC NC KTZ [4].

The national carrier of Kazakhstan (Kazakhstan Temir Zholy) has signed several strategic agreements:

1) on cooperation in the transport and logistics sphere with DHL (Germany) and John Deere (USA). The agreement provides for creation of a center for consolidation and distribution of John Deere products on the Eurasian market in the territory of Free Economic Zone (SEZ) Khorgos–Vostochnye Vorota;

2) on development, supply and maintenance of locomotives with General Electric Transportation (USA) (the transaction amount is estimated at \$900 million) [5].

In 2017 the volume of the transport and logistics market in Russia was estimated at 2,5

Table 1

The influence of conditions of functioning of the railway network on the choice of a model of structural organization of the industry

Countries	Average weight of a cargo train, tons	Average number of cars in a cargo train	Average distance of cargo transportation, km
Germany	500	12	320
France	380	10	375
Great Britain	800	20	215
Poland	640	17	245
Canada	2900	72	1100
USA	2850	69	915
Russian Federation	2255	61	1700

Source: IPEM analysis\*.

trillion rubles, and the basic transportation service unconditionally remained the main service in the market (the share in the total volume of transport and logistics services was 88 %), which for the purpose of implementation of transportation growth potential is an incentive for development of new services [6, p. 15]. To achieve this goal, in 2017, development of a single catalog of services provided by the Russian Railways holding began, which also became a natural reaction to growing activities of other modes of transport. Competition with road transport for transporting goods on medium and long-distance routes arises quite regularly, due particularly to a shortage of carrying capacities at individual railway sections. But at present, for relations between modes of transport, the importance of quality of transport services, and, first of all, of such an indicator as timely delivery of goods, is becoming increasingly higher, setting the task of finding ways to optimize transit of cargo trains.

Possible ways to prioritize transit of cargo trains

According to the Rules for technical operation of railways of the Russian Federation [7, clause 5 of Appendix No. 6], cargo transportation is in the ninth place in the established priority order of trains, which is explained by safety requirements. Then it is ranked from commercial positions and when planning cargo transportation, the final priority is embodied in the train schedule [8, pp. 33–35].

An important step in improving movement of cargo trains according to schedule was

made with the approval of the «Integrated program for a phased transition to organizing movement of cargo trains according to schedule for 2011–2015» and «Integrated integrated technology for managing movement of cargo trains according to schedule» developed at JSC Russian Railways [9], where these priorities are set in advance. Currently, priorities in development of cargo train schedules are given primarily to those trains that have a higher commercial value.

The circulation options of such trains are scientifically substantiated and published in open access [10, p. 21]. In our studies, we set the task of addressing the issue of feasibility of setting dynamic priority for transit of cargo trains, that is, a priority that is changing in the context of an operational change in the transportation situation.

The work of the railway section as of a transport system in the absence of trains of high priority with a different traffic mode, primarily depends on the load factor  $\gamma$ , defined as:

$$\gamma = \frac{N_f(T_{pl})}{N_n(T_{pl})} = \frac{\lambda}{\mu}, \tag{1}$$

where  $N_f(T_{pl})$  – actual number of trains that have passed through the section for the period  $T_{pl}$ ;

$N_n(T_{pl})$  – maximum possible number of trains that can run through the section, based on the available transit capacity for the period  $T_{pl}$ ;

$\lambda$  – intensity of delivery of trains that should be passed through the section (input train flow);

$\mu$  – intensity of train transit through the section (service of the incoming train flow).

The influence of  $\gamma$  on performance of the section is expressed through a change in the

\* [Electronic resource]: [http://ipem.ru/files/files/research/23\\_04\\_2013\\_rail\\_foreignreform.pdf](http://ipem.ru/files/files/research/23_04_2013_rail_foreignreform.pdf); <http://ipem.ru/news/publications/676.html>.







speed of the train flow transit (for example,  $\beta_{sec} = f(\gamma)$ ), the need to create additional track facilities at operation points (buffer units) for the conditions of a potential violation of the normal mode of operation of the section due to technical or technological failures.

The introduction of trains with a differentiated transit mode, which have a higher priority when in transit through the section and violate the principle of «first come, first served», should certainly affect the selected indicators.

Within that example, train transit processes have two different types of priorities: static priority and dynamic priority. Priorities are simply conditional values expressing the relative importance that must be assigned to a process or process object. The higher is the priority, the greater are its chances of accessing the service.

Thus, static priority does not change over time (in our case, these are the requirements of Rules for technical operation (RTO), where the priority of train transit is set to cargo trains, and cargo trains are ranked within the standard schedule), and the dynamic priority decreases or increases for a particular cargo train over extra time waiting for service (or with regard to ensuring timely delivery of goods).

For clarity, one can imagine static priorities when time slots are set within the standard schedule for speedy cargo trains (container trains, trains with perishable goods, etc.) and

for trains with an agreed arrival time, and dynamic priorities when it is necessary to make changes to the schedule to allow transit of late cargo trains or of a cargo train with special requirements for time of delivery to its recipient (for example, train with cargo that should close a shipload in a port or hindering the technological process of the enterprise due to the lack of incoming raw materials).

At the preliminary planning stage, we assume that the moments of train arrival for service and duration of this service are known, i.e. we can consider the system as deterministic.

Due to the specifics of train formation, as well as due to technical and technological failures in the section's operation, deviations from the stationary state may occur during certain periods, and by the time  $t = t_0$ , sporadic formation of queues  $N_0(t) = \{0, 1, 2, \dots, m\}$  may occur, where  $m$  is the maximum number of requirements in the system awaiting for service, determined by system's capacity (in our example, the number of tracks at an operation point).

Therefore, virtual unloading time of the system is of interest, when the queue is completely eliminated and the next request for service arrives without delay (the system returns to a stationary state) for the cases when priorities exist or are absent.

If we consider  $t_{waiti}$  as the permissible residence time of the  $i$ -th request in the system, then the request for which the



remaining permissible residence time in the system is minimal, is selected for service. With this description, the priority class is a function of the time during which the request is in the queue.

For the considered problem, the approach changes somewhat due to the fact that the criteria for assigning priority are not  $t_{wait}$ , but  $\Delta T(l_j)$  and the financial indicators resulting from this (either income  $D_i$ , if  $\Delta T(l_j) = T_i^f(l_j) - T_i^n(l_j) \leq 0$ ; or a fine  $F_i$ , if  $\Delta T(l_j) > 0$ ). To assess the likelihood of obtaining income or paying a fine depending on the value  $\Delta T(l_j)$ , we use the mathematical tool previously described in [11, pp. 110–112].

Dynamic priority should be established using the potential loss indicator  $L_i(l_j)$  for the  $i$ -th dispatch at the  $j$ -th object. Its value is defined as:

$$L_i(l_j) = F_i^p (1 - P\{T(l_j) \leq T_D^N | \Delta T(l_j)\}), \quad (2)$$

where  $F_i^p$  – the amount of fine for the  $i$ -th dispatch in accordance with the contract;

$P\{T(l_j) \leq T_D^N | \Delta T(l_j)\}$  – probability of fulfilling the contractual delivery time for sending  $T_D^N$  if at the object  $j$  the deviation from the standard value  $T_i^N(l_j)$  is  $\Delta T(l_j)$ .

The trends in transportation of «expensive» goods, for example, perishable or grain, are most typical in that context. The growth in the volume of transportation of grain cargo by rail is characterized by uneven shipment over the periods of the year, on weekends and holidays, and by a low level of routing [12, p. 43]. Accelerating the turnover of cars of a specialized rolling stock, especially when forming shiploads, also becomes relevant. The approved «Single list of works and services rendered by JSC Russian Railways in organization of cargo transportation» (No. 1574/r dated July 24, 2018) also makes it possible to single out the priority of cargo transportation for the provision of Cargo Express service in transportation of goods and empty wagons with high speed, etc. [13].

**Brief conclusions.** Thus, we can conclude that even with the developed schedule for cargo trains with static priorities, it is possible and advisable to use dynamic priority in some operational cases in order to reduce company losses when there is a risk of violation of delivery time of the shipment, leading to serious financial losses.

## REFERENCES

1. Golomolzin, A. N. Reforms led to success on the railways of America and Europe [*Na zheleznykh dorogakh Ameriki i Evropy reformy priveli k uspekhu*]. [Electronic resource]: <http://www.rostransport.com/article/4427/>. Last accessed 20.02.2019.
2. Pittman, R. Railway Competition: Options for the Russian Federation. *CEFIR Working Paper*, 2002, No. 14, pp. 1–11.
3. Arslanov, M. Railway reform in Germany: the power of the state [*Zheleznodorozhnaya reforma v Germanii: sila gosudarstva*]. [Electronic resource]: <https://cfts.org.ua/articles/43554>. Last accessed 20.02.2019.
4. JSC KTZ – Freight transportation [*AO KTZ – Gruzovye perevozki*]. [Electronic resource]: <https://ktzh-gp.kz/ru/about/>. Last accessed 20.02.2019.
5. Department of economic conditions and strategic development of JSC Russian Railways. Development and reform of foreign railways. Annual analytical report [*Departament ekonomicheskoi kon'yunktury i strategicheskogo razvitiya OAO «RZD». Razvitie i reformirovanie zarubezhnykh zheleznykh dorog. Godovoy analiticheskiy otchet*]. Moscow, 2018, 58 p.
6. Sharov, V. A. Development of a single catalog of services provided by the holding company Russian Railways [*Razrabotka edinogo kataloga uslug, okazyvaemykh kholdingom «RZD»*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2016, Iss. 6, pp. 9–15.
7. Rules for technical operation of the railways of the Russian Federation. Approved by order No. 286 dated December 21, 2010 of the Ministry of Transport of the Russian Federation (as amended by the orders of the Ministry of Transport of Russia dated June 04, 2012 No. 162, dated March 30, 2015 No. 57) [*Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii. Uverzhdeny prikazom № 286 ot 21.12.2010 Ministerstva transporta Rossiiskoi Federatsii (v red. prikazov Mintransa Rossii ot 04.06.2012 № 162, ot 30.03.2015 № 57)*].
8. Sharov, V. A., Baturin, A. P. Priority of cargo trains as a criterion for substantiation of speeds [*Prioritetnost' gruzovykh poezdov kak kriteriy obosnovaniya skorostei*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2017, No. 3, pp. 33–35.
9. Comprehensive program of a phased transition to organization of movement of cargo trains according to schedule for 2011–2015. Approved by First Vice-President of JSC Russian Railways V. N. Morozov on 16.03.2011 [*Kompleksnaya programma poetapnogo perekhoda na organizatsiyu dvizheniya gruzovykh poezdov po raspisaniyu na 2011–2015 gody. Utv. Pervym vice-prezidentom OAO «RZD» V. N. Morozovym 16.03.2011*].
10. Lemesheko, V. G., Sharov, V. A. On transition to a technology for organizing movement of cargo trains according to schedule [*O perekhode na tekhnologiyu organizatsii dvizheniya gruzovykh poezdov po raspisaniyu*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2010, Iss. 8, pp. 18–26.
11. Sharov, V. A. Technological support for cargo transportation by rail in a market economy [*Tekhnologicheskoe obespechenie perevozok gruzov zheleznodorozhnym transportom v usloviyakh rynochnoi ekonomiki*]. Moscow, Intext publ., 2001, 198 p.
12. Kuzhel, A. L. A comprehensive approach is needed [*Neobkhodim kompleksniy podkhod*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2018, Iss. 9, pp. 41–43.
13. The single list of works and services provided by JSC Russian Railways in organization of cargo transportation (approved by the order of JSC Russian Railways of 24.07.2018 No. 1574/r) [*Ediniy perechen' rabot i uslug, okazyvaemykh OAO «RZD» pri organizatsii perevozok gruzov (utv. rasporyazheniem OAO «RZD» ot 24.07.2018 No. 1574/r)*].





# Навигационный контроль доставки грузов в условиях севера России



Надежда ФИЛИПОВА



Владимир ВЛАСОВ



Владимир БЕЛЯЕВ

**Филиппова Надежда Анатольевна** — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

**Власов Владимир Михайлович** — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

**Беляев Владимир Михайлович** — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия\*.

Для обустройства северных территорий, обеспечения нормальной жизни работающих там людей необходимы в значительных количествах строительные материалы, топливо, машины, оборудование, продовольственные и другие товары, значительную часть которых необходимо завозить на эти территории.

Особенность процессов перевозки грузов на Север автомобильным транспортом заключается в том, что большая часть процесса перевозки выполняется по временным автомобильным дорогам — автозимникам [1, 2]. В отличие от постоянных автомобильных дорог с твердым покрытием, имеющих соответствующие элементы инфраструктуры содержания проезжей части, автозимники имеют трассу движения, представляющую очищенную от снега полосу, не имеющую специально подготовленных слоев дорожной одежды. Трасса имеет временные ориентиры [3, 4]. Однако, в условиях непогоды, резких изменений температурного режима трассу можно «потерять», что отрицательно влияет на надёжность и безопасность процессов перевозки.

Средства геоинформатики позволяют создать виртуальную пространственную модель временной автомобильной дороги, которая может быть отражена на электронной карте [5–7]. Средства спутниковой навигации формируют актуальные навигационные данные, которые средствами геоинформатики «привязываются» к трассе маршрута.

Актуальное местоположение транспортного средства на трассе автозимника может быть отображено с помощью электронной карты местности на экране дисплея бортового телематического блока [8–10].

Целью статьи является рассмотрение основных задач, которые решаются системой диспетчерского управления при контроле движения автомобильных транспортных средств по временным автомобильным дорогам — автозимникам.

С использованием математических методов анализа и планирования перевозок автомобильным транспортом разработана методическая основа для повышения уровня автоматизации базовых функций диспетчерского управления перевозкой грузов автомобильным транспортом в смешанном мультимодальном сообщении на основе использования информации, формируемой глобальной навигационной системой ГЛОНАСС. Показано, что использование средств геоинформатики, мобильной связи и спутниковой навигации позволит значительно повысить надёжность и безопасность процессов перевозки грузов в условиях Севера России. По оценкам специалистов использование предложенной методологии позволяет сократить время на обработку грузов в среднем на 30 % и время принятия решений — на 50 %, а также увеличить эффективность использования авто-транспортных средств за счёт сокращения на 95 % числа сходов автомобилей с планируемого маршрута.

**Ключевые слова:** транспорт, автомобильный транспорт, геоинформатика, спутниковая навигация, пространственная цифровая модель маршрута, грузы Северного завоза, временные автомобильные дороги.

\*Информация об авторах:

**Филиппова Надежда Анатольевна** — кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, [madizp@mail.ru](mailto:madizp@mail.ru).

**Власов Владимир Михайлович** — доктор технических наук, заведующий кафедрой транспортной телематики Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, [tr\\_madi@inbox.ru](mailto:tr_madi@inbox.ru).

**Беляев Владимир Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры менеджмента Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, [belyaev-v@mail.ru](mailto:belyaev-v@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 17.07.2019, принята к публикации 30.08.2019.

For the English text of the article please see p. 225.

## ВВЕДЕНИЕ

Транспорт является одним из решающих факторов успешного развития производительных сил, разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения жизнедеятельности в северных районах стран, часть территории которых расположена за Полярным кругом.

На территории Крайнего Севера России транспортная сеть в основном остаётся сезонной (водные пути, автозимники). Доступность данных транспортных путей в значительной степени зависит от природно-климатических условий.

В настоящее время более половины протяжённости дорожной сети северных районов нового освоения составляют автозимники. Значительные трудозатраты на их сезонное создание и содержание приводят к тому, что себестоимость автоперевозок по зимникам выше на 70 %, нежели по автодорогам III–IV класса.

Применение технологий интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в районах Крайнего Севера и местностях, приравненных к ним, обеспечит возможность прогнозирования состояния временных транспортных путей, мониторинг процессов перевозки грузов, контроль состояния перевозочного процесса, интеграцию транспортно-логистической информации и доступ к ней в любой временной период всем участникам транспортного процесса. Это позволит повысить эффективность и безопасность процесса доставки грузов в Северные регионы.

Перевозка по ледовой переправе и автозимнику требует повышенного внимания со стороны всех участников движения. Практическое использование автозимников в условиях непогоды повышает уровень риска при перевозке. Для увеличения безопасности движения и с целью повышения технико-эксплуатационных показателей необходимо использовать систему «ЭРА-ГЛОНАСС». Транспортные средства, выпускаемые в России после 2017 года, должны оборудоваться системой экстренного реагирования «ЭРА-ГЛОНАСС» [8], основное назначение которой — автоматическое формирование и передача сигнала в службу «112» при возникновении аварии. С этой целью транспортное средство оборудуется специальным мобильным блоком связи

навигации, который при аварии определяет степень тяжести аварии, местоположение транспортного средства и передаёт сигнал бедствия через любого сотового оператора, чей сигнал в данном месте будет самым сильным. Бортовой блок включает кнопку сигнала бедствия, которую водитель может нажать в экстренном случае для вызова оператора системы «ЭРА-ГЛОНАСС» вручную.

На предприятиях грузового автомобильного транспорта современные технологии спутниковой связи и навигации должны внедряться в рамках автоматизированной навигационной системы диспетчерского управления и контроля движения транспортных средств. Каждое транспортное средство предприятия должно быть оборудовано набором телематических устройств.

Целью статьи является рассмотрение основных задач, которые решаются системой диспетчерского управления при контроле за перевозкой грузов транспортными средствами по временным автомобильным дорогам — автозимникам. В этой связи, в частности, рассматриваются вопросы разработки пространственной модели временной автомобильной дороги (автозимника).

### Определение расстояния, пройденного грузовым автомобильным транспортом на маршруте, с помощью цифровой модели

Автоматический контроль плана выполнения перевозок грузов по маршруту осуществляется на основе использования «функции расстояния», которая для заданного момента времени определяет расстояние, пройденное контролируемым транспортным средством от начального пункта маршрута [11, 12].

В общем виде функция расстояния записывается следующим образом:

$$S = \int (\varphi(t), \psi(t), dt), \quad (1)$$

где  $t$  — момент времени, в который определяется значение функции расстояния;

$(\varphi(t), \psi(t))$  — координаты точки модели, к которой привязалась текущая навигационная отметка в момент времени  $t$ .

На практике цифровая модель маршрута реализуется с использованием кусочно-ломанной функции, моделирующей участки маршрута. В этом случае функция рас-



стояния использует таблицу расстояний маршрута с записями следующей структуры: «Номер отрезка цифровой модели», «Длина отрезка, м». Расстояние от начала маршрута (длина пройденного пути)  $S$  рассчитывается следующим образом.

1. Если навигационная отметка привязалась к точке, являющейся концом  $n$ -го отрезка, то пройденное расстояние рассчитывается по формуле:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (2)$$

где  $l_i$  — длина  $i$ -го отрезка модели, м.

Если текущая навигационная отметка, полученная в момент времени  $t$ , привязалась к точке, являющейся промежуточной точкой  $n$ -го отрезка с координатами  $(\varphi(t), \psi(t))$ , то пройденное расстояние рассчитывается по формуле:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + S_n(t), \quad (3)$$

где  $l_i$  — длина  $i$ -го отрезка модели, м;

$S_n(t)$  — декартово расстояние от начала  $n$ -го отрезка до точки модели с координатами  $(\varphi(t), \psi(t))$ , к которой привязалась навигационная отметка, полученная в момент времени  $t$ , м.

Величина  $S_n(t)$  определяется по формуле:

$$S_n(t) = \sqrt{(c_\varphi(\varphi_n - \varphi(t))^2 + (c_\psi(\psi_n - \psi(t))^2)}, \quad (4)$$

где  $(\varphi(t), \psi(t))$  — координаты точки модели, к которой привязалась текущая навигационная отметка в момент времени  $t$ ;

$(\varphi_n, \psi_n)$  — координаты точки начала  $n$ -го отрезка;

$C_\varphi$  — коэффициент перевода градусной меры широты в метрическую;

$C_\psi$  — коэффициент перевода градусной меры долготы в метрическую.

Подставляя выражение (4) в (3) получим:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + \sqrt{(c_\varphi(\varphi_n - \varphi(t))^2 + (c_\psi(\psi_n - \psi(t))^2)}. \quad (5)$$

**Оценка величины отклонения запланированного времени движения транспортного средства в произвольный момент времени и контроль величины отклонения диспетчерской системой**

Оценка величины отклонения перевозок грузов автомобильным транспортом от запланированного времени движения в произвольный момент времени производится автоматически на основании срав-

нения планового и фактического местоположения транспортного средства на маршруте в данный момент времени. Плановое местоположение транспортного средства определяется на основании информации с контрольных точек движения, в соответствии с чем для каждой контрольной точки на маршруте в каждой перевозке имеется плановое время её прохождения.

Рассмотрим для упрощения расчётов случай, когда транспортное средство находится между контрольными точками маршрута с номерами  $i$  и  $(i + 1)$ . При этом его местоположение по плану также соответствует расстоянию между контрольными точками с номерами  $i$  и  $(i + 1)$ . Пусть  $t_{p(i)}, t_{p(i+1)}$  — плановые времена прохождения контрольных точек  $i$  и  $(i + 1)$ . Пусть  $l_i, l_{(i+1)}$  — расстояние от начала маршрута до контрольной точки с номерами  $i$  и  $(i + 1)$  соответственно. Тогда величина  $S^p(t)$  — плановое расстояние от начала маршрута в момент времени  $t$ , попадающий в интервал времени  $[t_{p(i)}, t_{p(i+1)}]$ , определится по формуле:

$$S^p(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + S_n^p(t), \quad (6)$$

где  $l_i$  — длина  $i$ -го отрезка модели, м;

$S_n^p(t)$  — декартово расстояние от начала  $n$ -го отрезка до точки модели, соответствующей местоположению в плановый момент времени  $t$ , м.

Плановая средняя скорость  $V_{cp}$  на участке маршрута между остановками с номерами  $i$  и  $(i + 1)$  определится из выражения:

$$V_{cp} = \frac{[l_{(i+1)} - l_i]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]}. \quad (7)$$

Тогда значение  $S_n^p(t)$  можно рассчитать по формуле:

$$S_n^p(t) = \frac{[l_{(i+1)} - l_i]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]} \cdot [t - t_{p(i)}]. \quad (8)$$

Первый член (дробь) в формуле (8) определяет плановую среднюю скорость движения между контрольными точками с номерами  $i$  и  $(i + 1)$ . Второй член (разность) определяет плановое время, прошедшее с момента прохождения контрольной точки с номером  $i$  до текущего момента времени  $t$ . Подставляя выражение (8) в (6), получим:

$$S^p(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + \frac{[l_{p(i+1)} - l_{p(i)}]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]} \cdot [t - t_{p(i)}]. \quad (9)$$



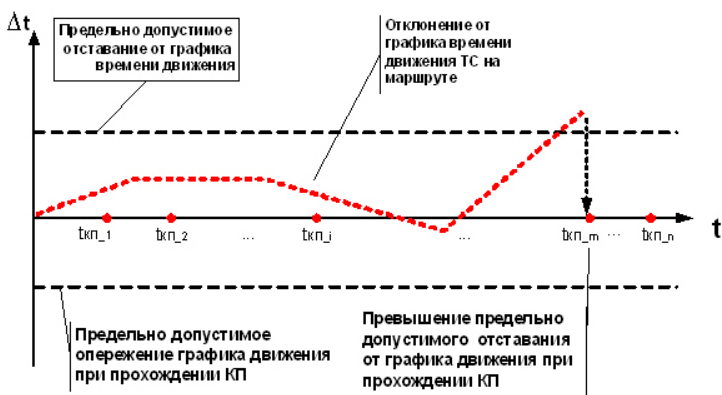


Рис. 1. Схема контроля движения транспортного средства на маршруте

Рассмотрим случай, когда и плановое, и фактическое местоположение транспортного средства принадлежат одному отрезку между контрольными точками с номерами  $i$  и  $(i + 1)$ .

Разница  $\Delta S$  между фактическим и плановым расстоянием в момент времени  $t$  определится по формуле:

$$\Delta S = S(t) - S^p(t). \quad (10)$$

Отклонение по времени  $\Delta t$  движения грузового автомобильного транспорта определится из выражения:

$$\Delta t = \frac{|S(t) - S^p(t)|}{V_{cp}}. \quad (11)$$

Отклонение по времени равно абсолютной величине разницы планового и фактического пройденного расстояния в момент времени  $t$ , делённого на среднюю скорость. В целях диспетчерского управления можно рассматривать величину  $\Delta$  со знаком. Если фактически пройденное расстояние в момент времени  $t$  окажется больше планового расстояния, то движение транспортного средства осуществляется со средней скоростью выше запланированной. В этом случае величина  $\Delta t$  окажется положительной. Если фактически пройденное расстояние в момент времени  $t$  окажется меньше планового расстояния, то имеет место

«отставание», т.е. движение со средней скоростью ниже запланированной. В этом случае величина  $\Delta t$  окажется отрицательной. Подставляя вместо  $S(t)$ ,  $V_{cp}$ ,  $S^p(t)$  их выражения из формул (5), (7), (9) и проводя преобразования, получим (12).

На рис. 1 схематически отображена автоматическая система контроля графика движения транспортного средства на маршруте.

Описанная выше модель позволяет системе постоянно и автоматически отслеживать величину  $\Delta t$ . При этом технолог системы задаёт предельно допустимые значения величины  $\Delta t$ , при превышении которых система формирует сигнал диспетчеру о необходимости проведения регулирующих воздействий с целью возврата процесса перевозок к плановому состоянию или, если это невозможно, с целью уменьшения отрицательных последствий допущенного нарушения. На рисунке графически отображён процесс увеличения отклонения движения ТС от запланированного времени и момент времени, при котором зафиксирован факт достижения предельно допустимой величины отклонения, что в условиях Севера может быть небезопасно для водителя транспортного средства.

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(c_{\phi}(\phi_n - \phi(t))^2 + (c_{\psi}(\psi_n - \psi(t))^2) - \frac{[l_{p(i+1)} - l_{p(i)}]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]} \cdot [t - t_{p(i+1)}]}}{\frac{[l_{p(i+1)} - l_{p(i)}]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]}}. \quad (12)$$



## Оценка плана перевозки грузов автомобильным транспортом между контрольными точками

Оценка плана перевозки грузов автомобильным транспортом между контрольными точками основана на сравнении планового и фактического времени прохождения транспортным средством контрольных пунктов маршрута, отмеченных специалистами по организации перевозок для контроля, безопасности и надёжности перевозок грузов. В качестве контрольных пунктов на маршруте в системе обязательно указываются начальный и конечный пункты, а также один, два или три промежуточных контрольных пункта в зависимости от длины маршрута. С целью автоматической оценки плана перевозки грузов автомобильным транспортом для каждого контрольного пункта указывается предельно допустимая величина отклонения от запланированного времени ( $+\Delta t_{\text{пр}}$ ) и отставания ( $-\Delta t_{\text{пр}}$ ). Если фактическая величина отклонения, допущенная при прохождении контрольного пункта, укладывается в интервал  $[-\Delta t_{\text{пр}}, +\Delta t_{\text{пр}}]$ , то система автоматически засчитывает факт запланированного прохождения контрольного пункта. При этом фактическое время прохождения контрольного пункта определяется следующим образом. Для каждого контрольного пункта определяется и математически описывается некоторая пространственная зона, включающая местоположение контрольного пункта, которая называется «зона влияния контрольного пункта». Если навигационные отметки, поступающие от транспортного средства, привязываются к зоне контрольного пункта, считается, что транспортное средство находится на соответствующем контрольном пункте. Правила, по которым система автоматически определяет фактическое время прохождения контрольного пункта, формулируются следующим образом:

1) если контрольный пункт является начальным пунктом маршрута, то фактическое время начала маршрута засчитывается системой по времени формирования последней навигационной отметки, поступившей от транспортного средства, находящегося в пределах зоны первого контрольного пункта — начального пункта на маршруте;

2) если контрольный пункт является заключительным пунктом маршрута, то фактическое время окончания маршрута засчитывается по времени формирования первой отметки, поступившей из зоны последнего контрольного пункта — заключительного пункта на маршруте;

3) если контрольный пункт является промежуточным пунктом на маршруте, то фактическое время прохождения промежуточного контрольного пункта засчитывается по времени формирования навигационной отметки из зоны промежуточного контрольного пункта, которое оказалось максимально близким или совпало с плановым временем прохождения данного контрольного пункта на маршруте.

С целью организации автоматической оценки плановой перевозки грузов технолог системы указывает, какое количество контрольных пунктов на маршруте должно пройти без сбоев (т.е. не превышая заданных предельных отклонений от планового маршрута), чтобы маршрут целиком засчитывался как запланированный. Обычно допускается прохождение не более одного контрольного пункта на маршруте с превышением предельно допустимого отклонения при увеличении времени или при отставании, чтобы маршрут был засчитан системой как запланированный. Например, если для маршрута определены пять контрольных пунктов, то технолог может указать значение «четыре контрольных пункта» для зачёта запланированного прохождения маршрута. При этом для системы не имеет значения, какой пункт из пяти будет пройден незапланированно. Если транспортное средство проходит не менее чем указанное технологом число контрольных пунктов на маршруте, то перевозка автоматически засчитывается в системе как запланированная. Иначе перевозка засчитывается как незапланированная.

### Цифровая модель автозимника

Объекты цифровой модели временного маршрута — автозимника следующие:

1) Трасса, включает:

1.1) Цифровое описание пространственной модели трассы.

1.2) Семантическое описание специфических участков (переправа, опасные участки и т.д.).

1.2.1) Контрольные пункты (остановки).

1.2.2) Опасные участки с семантикой (опасные моменты, возникающие на маршруте).

2) Периоды времени (действие определённых опасностей с возможностью программной обработки данных ситуаций в различные периоды года или в различные периоды суток, или тогда и тогда).

3) Местоположение опасных пунктов и их протяжённость в описании характеристики движения.

Если ситуация на маршруте ухудшается, диспетчер передаёт оперативную обстановку водителю транспортного средства. Стандартные сообщения заранее программируются на случай всех возможных неблагоприятных ситуаций. При этом диспетчер выбирает нужное сообщение из списка и отправляет водителю с просьбой подтвердить принятие сообщения. Подтверждение сообщения обязательно, если диспетчер передаёт команду «Изменить маршрут». Диспетчер набирает короткий текст примерно 20 символов, который передаётся на бортовой навигационный терминал и отражается на экране терминала. На экране терминала отражается также время по часам системы [14, 15].

У водителя транспортного средства также есть заранее сформированные сообщения — вызов полиции, пожарников, скорой помощи, препятствие на маршруте, которые он может выбирать из списка и посылать диспетчеру вместо голосовой связи.

4) Семантическое и пространственное описание контрольных пунктов.

Семантическое и пространственное описание контрольных пунктов зависит от типа контрольного пункта.

При завершении оперативных суток в системе появляется информация о результатах перевозочного процесса. Информация доступна всем легитимным пользователям. Она может включать остатки объёмов грузов на складах, прогноз поступления грузов на день, неделю, месяц, время поступления прогнозируемых партий груза.

Формируется прогноз времени движения транспортных средств по контрольным пунктам маршрута, прогнозируется время доставки грузов потребителю.

## **Сравнение традиционных и предлагаемых принципов контроля движения транспортных средств на временных автомобильных дорогах (автозимников)**

1. Принципы контроля движения в традиционной системе управления:

1.1. Управление осуществляется только в определённые моменты времени (начала маршрута и конец маршрута).

1.2. Контроль осуществлялся только в конкретных точках (перевалочных пунктах).

2. Принципы контроля при использовании цифровой модели маршрута.

Внедрение навигационного оборудования и цифровой модели трассы позволяет:

1) Определять расстояние и время движения до очередного контрольного пункта.

2) Контролировать на каждом запланированном этапе между контрольными пунктами отклонение от графика движения с использованием функции, описывающей плановое расстояние от начальной точки маршрута как функции времени:  $F(l) = F(l, t)$ . Функция позволяет определять отклонение от графика движения — время задержки ( $T_z$ ).

## **Контроль текущего состояния перевалочного пункта — ключевого объекта транспортной инфраструктуры**

Цифровая модель каждого перевалочного пункта, в том числе терминала, может быть описана в терминах систем массового обслуживания. Это описание включает параметрическое описание отдельных объектов терминала (свободные площади, загрузка постов обслуживания, очереди транспортных средств в зоны обслуживания потоков различных грузов (навалочные, пакетированные, тарно-штучные, контейнерные, наливные, негабаритные и грузы большой массы и т.д.), очереди на обслуживание по классу и направлению). Формируется прогноз возникновения ситуации отказа от обслуживания из-за перегрузки мощностей (текущий приём заявок превышает плановый на оперативный день). В перспективе в системе должна сохраняться динамическая информация о состоянии терминала и прогнозироваться возможность перенаправления, перераспределения части грузов на другие терминалы.



С точки зрения основных функций терминала, планирование обслуживания входящего потока заявок осуществляется с использованием следующих исходных данных:

1. Прогноз времени прибытия грузов на терминал по суткам или часам.
2. Прогноз времени обслуживания (объём груза, время на обработку и т.д.).
3. Прогноз времени нахождения в очереди на обслуживание.
4. Прогноз загрузки рабочих зон по специализации (пункты обслуживания по специализации).

Исходные данные для прогноза:

$n$  — количество постов;  
 $n_1, n_2, \dots, n_n$  — количество постов по специализации;

$O$  — очереди на обслуживание;

$O_1(t), O_2(t), \dots, O_n(t)$  — очереди к постам по специализации

Параметры потоков заявок:

$P_1^1, P_1^2, \dots, P_1^n$  — количество заявок на следующий день к постам по специализации;

$P_2^1, P_2^2, \dots, P_2^n$  — количество заявок на второй день (от текущей даты) к постам по специализации;

$P_m^1, P_m^2, \dots, P_m^n$  — количество заявок на последующие дни (от текущей даты) к постам по специализации;

$m$  — горизонт прогноза в днях.

## ВЫВОДЫ

Разработанная методическая основа для повышения уровня автоматизации базовых функций диспетчерского управления перевозкой грузов автомобильным транспортом в смешанном мультимодальном сообщении на основе использования информации, формируемой глобальной навигационной системы ГЛОНАСС, позволяет по оценкам специалистов сократить, в среднем, время на обработку грузов на 30 % и время принятия решений на 50 %.

Разработанные новые подходы к формированию системы перевозки, повышающие эффективность использования автомобильного транспорта, работающего под контролем навигационных систем диспетчерского управления, позволяют также на 95 % сократить сходы автомобилей с запланированного маршрута.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппова Н. А. Методология организации и функционирования систем доставки грузов в северные регионы: Монография / Под. ред. В. М. Беляева — М.: Издательство Техполиграфцентр, 2015. — 208 с.
2. Филиппова Н. А. Методы оценки эффективности транспортного обслуживания Восточно-Сибирского региона // Материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции «Экологическая безопасность Восточно-Сибирского региона». — Иркутск, 2003. — С. 221–227.
3. Филиппова Н. А., Беляев В. М. Анализ процесса управления северным заводом в современных рыночных условиях // Грузовое и пассажирское автохозяйство. — 2010. — № 9. — С. 17–20.
4. Филиппова Н. А., Беляев В. М. Адаптивная математическая модель для оптимизации завоза грузов в условиях Севера // Грузовое и пассажирское автохозяйство. — 2013. — № 11. — С. 17–20.
5. Коноплянко В. И., Кочерга В. Г., Зырянов В. В. Использование навигационных спутниковых систем при управлении дорожным движением: Сб. трудов междунар. НТК «Современные проблемы дорожно-транспортного комплекса». — Ростов н/Д, 1998. — С. 108.
6. Ларин О. Н. Методология организации и функционирования транспортных систем регионов. — Челябинск: ЮУрГУ, 2007. — 206 с.
7. Свириденко С. С. Совершенствованные информационные технологии. — М.: Радио и связь, 1989. — 132 с.
8. ГОСТ Р 54620-2011 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Автомобильная система вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования. — М., 2011.
9. Омникomm. Комплексное решение. Доставка Just-in-time под контролем OMNICOMM [Электронный ресурс]: <https://www.omnicomm.ru/case/db-schenker/>. Доступ 17.07.2019.
10. Filippova N. A., Belyaev V. M., Shilimov M. V., Koshkarev P. P., Odinkova I. V. The Analytical Test of Methodological Approaches to the Increasing the Level of Automation of the Basic Functions of the Car Dispatching of the Cargo Delivery to Northern Regions of the Russian Federation // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). — 2017. — Vol. 12. — No. 21. — pp. 11532–11535.
11. Efimenko D. B., Maksimychov O. I., Ostroukh A. V., Zbavitel P. Yu., Ivakhnenko A. M., Karelina M. Y. Technology of Monitoring and Control Algorithm Design for Earth-Moving Machine // International Journal of Applied Engineering Research. — 2016. — Vol. 11. — No. 9. — pp. 6430–6434.
12. Bogumil V., Efimenko D. Urban Transport Dispatch Control System Helps to Increase Intelligent Transport Systems Effectiveness. — 11<sup>th</sup> European transport congress. — Prague. — September 19–20. — 2013. — pp. 20–25.
13. Баскин А. С., Москвин Г. И. Береговые системы управления движением судов. — М.: Транспорт, 1986. — 160 с.
14. Bogumil V. N., Kudryavtsev A. A., Duque-Sarango María José Analysis of the possibility of using telematics tools for the collection and processing of data on the dynamics of passenger traffic in the Bus Rapid Transit system (for example, Quito, Ecuador // The Revista Facultad de Ingeniería (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia). — pp. 49–55.
15. Bogumil V., Vlasov V. Intelligent transportation systems for road users and public transport. — Saarbrücken. — LAP Lambert Academic Publishing. — 2015. — 153 p.





# Navigation Control of Cargo Transportation in the North of Russia



**Nadezhda A. FILIPPOVA**



**Vladimir M. VLASOV**



**Vladimir M. BELYAEV**

*Filippova, Nadezhda A., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia.  
Vlasov, Vladimir M., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia.  
Belyaev, Vladimir M., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia\*.*

## ABSTRACT

To develop the northern territories and ensure a normal life for people working there, significant quantities of construction materials, fuel, machinery, equipment, food and other goods are needed, a significant part of which must be transported to these territories.

The peculiarity of the processes of transportation of goods to the Northern regions by road is that most of the transportation process is carried out using temporary roads which are called winter (or snow) roads [1, 2]. Unlike permanent paved roads with corresponding infrastructure maintenance elements, winter roads have a traffic track representing a snow-cleared lane without specially prepared layers of pavement. The track has temporary landmarks [3, 4]. However, in bad weather, sudden changes in temperature, the route can be «lost», which negatively affects reliability and safety of the transportation process.

Geoinformatics tools allow to create a virtual spatial model of a temporary road, which can be shown on an electronic map [5–7]. Satellite navigation tools form actual navigation data, which are «linked» to the route by means of geoinformatics. The current location of a

vehicle on a winter road track can be displayed using an electronic terrain map on a display screen of an on-board telematic unit [8–10].

The objective of the article is to consider the main tasks that are solved by the supervisory control system when monitoring movement of vehicles on temporary winter roads.

Using mathematical methods and special methods of analysis and planning of road transportation, a methodological basis has been developed to increase the level of automation of basic functions of the dispatch control of road transportation of goods in mixed multimodal traffic based on the use of information generated by GLONASS global navigation system. It is shown that the use of geoinformatics, mobile communications and satellite navigation will significantly improve reliability and safety of the processes of cargo transportation in the North of Russia. According to experts, the use of the proposed methodology allows reducing time for cargo handling by an average of 30 % and decision-making time by 50 %, as well as increasing the efficiency of using vehicles by reducing by 95 % the number of deviations from the planned schedule.

**Keywords:** transportation, road transport, geoinformatics, satellite navigation, spatial digital model of the route, cargo of the northern delivery, temporary roads.

\*Information about the authors:

**Filippova, Nadezhda A.** – Ph.D. (Eng), associate professor of the department of road transportation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, madizp@mail.ru.

**Vlasov, Vladimir M.** – D.Sc. (Eng), head of the department of transport telematics of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, ttr\_madi@inbox.ru.

**Belyaev, Vladimir M.** – D.Sc. (Eng), professor of the department of management of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, belyaev-v@mail.ru.

Article received 17.07.2019, accepted 30.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 218

**Background.** Transport is one of the decisive factors for the successful development of productive forces, exploration and mining, and ensuring vital functions in the northern regions of countries, part of which is located beyond the Arctic Circle.

In the Northern regions of Russia, the transport network remains mainly seasonal (waterways, winter roads). The availability of these transport routes is largely dependent on climatic conditions.

At present, more than half of the length of the road network of newly developed northern regions consists of winter roads. Significant labor costs for their seasonal creation and maintenance lead to the fact that the cost of road transport on winter roads is 70 % higher than on roads of III–IV class.

The use of Intelligent Transport Systems (ITS) technologies in the areas of the Far North and areas equated to them will provide an opportunity to predict the state of temporary transport routes, monitor the processes of cargo transportation, monitor the status of the transportation process, integrate transport and logistics information and to provide access to it at any time to all participants to the transportation process. This will improve the efficiency and safety of the process of cargo delivery to the Northern regions.

Crossing frozen rivers and transportation using a winter road require increased attention from all traffic participants. The practical use of winter roads in bad weather increases the level of risk during transportation. To increase traffic safety and to improve technical and operational performance, it is necessary to use ERA-GLONASS system. Vehicles manufactured in Russia after 2017 should be equipped with ERA-GLONASS emergency response system [8], the main purpose of which is automatic generation and transmission of a signal to the 112 [emergency call number] service in case of an accident. For this purpose, a vehicle is equipped with a special mobile navigation communication unit, which in case of an accident determines severity of an accident, position of a vehicle and transmits a distress signal through any mobile operator whose signal in this place will be the strongest. An on-board unit includes a distress signal button, which a driver can press in an emergency to manually call the operator of ERA-GLONASS system.

The enterprises of cargo road transportation should introduce modern satellite communications and navigation technologies as part of an automated navigation system for dispatch control and vehicle traffic control. Each vehicle of an enterprise must be equipped with a set of telematic devices.

**Objective.** The objective of the article is to consider the main tasks that are solved by the dispatch control system when monitoring cargo transportation by vehicles on temporary winter roads. In this regard, in particular, issues of development of a spatial model of a temporary automobile road (winter road) are considered.

**Methods.** The authors use mathematical and specific informatics methods.

### Results.

#### Determining the distance traveled by trucks on a route using a digital model

Automatic control of the plan of cargo transportation along the route is carried out on the basis of the use of the «distance function», which for a given point in time determines the distance traveled by the controlled vehicle from the starting point of the route [11, 12].

In general, the distance function is written as follows:

$$S = f(\phi(t), \psi(t), dt), \quad (1)$$

where  $t$  is point in time at which the value of the distance function is determined;

$(\phi(t), \psi(t))$  – coordinates of the model point to which the current navigation mark is attached at time  $t$ .

In practice, the digital route model is implemented using a piecewise-broken function that simulates sections of the route. In this case, the distance function uses a table of route distances with entries of the following structure: «Number of the digital model segment», «Length of the segment,  $m$ ». The distance from the start point of the route (distance traveled)  $S$  is calculated as follows.

1. If the navigation mark is tied to a point that is the end of the  $n$ -th segment, then the distance traveled is calculated by the formula:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (2)$$

where  $l_i$  – length of the  $i$ -th segment of the model,  $m$ . If the current navigation mark obtained at time  $t$  is tied to a point that is an intermediate point of the  $n$ -th segment with coordinates  $(\phi(t), \psi(t))$ , then the distance traveled is calculated by the formula:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + S_n(t), \quad (3)$$

where  $l_i$  – length of the  $i$ -th segment of the model, m;

$S_n(t)$  – Cartesian distance from the beginning of the  $n$ -th segment to the model point with coordinates  $(\phi(t), \psi(t))$ , to which the navigational mark obtained at time  $t$  is tied, m.

The value of  $S_n(t)$  is determined by the formula

$$S_n(t) = \sqrt{(c_\phi(\phi_n - \phi(t))^2 + (c_\psi(\psi_n - \psi(t))^2)}, \quad (4)$$

where  $(\phi(t), \psi(t))$  – coordinates of the model point to which the current navigation mark is attached at time  $t$ ;

$(\phi_n, \psi_n)$  – coordinates of the start point of the  $n$ -th segment;

$C_\phi$  – coefficient of conversion of a degree measure of latitude to metric;

$C_\psi$  – coefficient of conversion of a degree measure of longitude to metric.

Substituting the expression (4) in (3) we get:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + \sqrt{(c_\phi(\phi_n - \phi(t))^2 + (c_\psi(\psi_n - \psi(t))^2)}. \quad (5)$$

#### Estimation of deviation of the planned time of vehicle movement at an arbitrary point in time and control of deviation by the dispatch system

The deviation of cargo transportation by road transport from the planned traffic time at any moment is estimated automatically based on a comparison of the planned and actual location of the vehicle on the route at a given time. The planned location of the vehicle is determined on the basis of information from control traffic points, as each vehicle should pass each control point at exact scheduled time.

To simplify the calculations, we consider the case when the vehicle is between the control points of the route with numbers  $i$  and  $(i + 1)$ . Moreover, its location according to the plan also corresponds to the distance between the control points with numbers  $i$  and  $(i + 1)$ . Let  $t_{p(i)}, t_{p(i+1)}$  be the planned times for passing the control points  $i$  and  $(i + 1)$ . Let  $l_i, l_{(i+1)}$  be the distance from the beginning of the route to the control point with numbers  $i$  and  $(i + 1)$ , respectively. Then the value  $S^p(t)$  which is the planned distance from the beginning of the route at time  $t$  falling into the time interval  $[t_{p(i)}, t_{p(i+1)}]$ , is determined by the formula:

$$S^p(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + S_n^p(t), \quad (6)$$

where  $l_i$  – length of the  $i$ -th segment of the model, m;

$S_n^p(t)$  – Cartesian distance from the beginning of the  $n$ -th segment to the model point corresponding to the position at the planned time  $t$ , m.

The planned average speed  $V_{av}$  on the route section between stops with numbers  $i$  and  $(i + 1)$  is determined from the expression:

$$V_{av} = \frac{[l_{(i+1)} - l_i]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]}. \quad (7)$$

Then the value of  $S_n^p(t)$  can be calculated by the formula:

$$S_n^p(t) = \frac{[l_{(i+1)} - l_i]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]} \cdot [t - t_{p(i)}]. \quad (8)$$

The first term (fraction) in formula (8) determines the planned average speed of movement between the control points with numbers  $i$  and  $(i + 1)$ . The second term (difference) determines the planned time elapsed from the moment of passing the control point with number  $i$  to the current time  $t$ . Inserting the expression (8) to (6) we obtain:

$$S^p(t) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + \frac{[l_{p(i+1)} - l_{p(i)}]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]} \cdot [t - t_{p(i)}]. \quad (9)$$

Let's consider the case when both the planned and actual location of the vehicle belong to the same segment between the control points with numbers  $i$  and  $(i + 1)$ .

The difference  $\Delta S$  between the actual and planned distance at time  $t$  is determined by the formula:

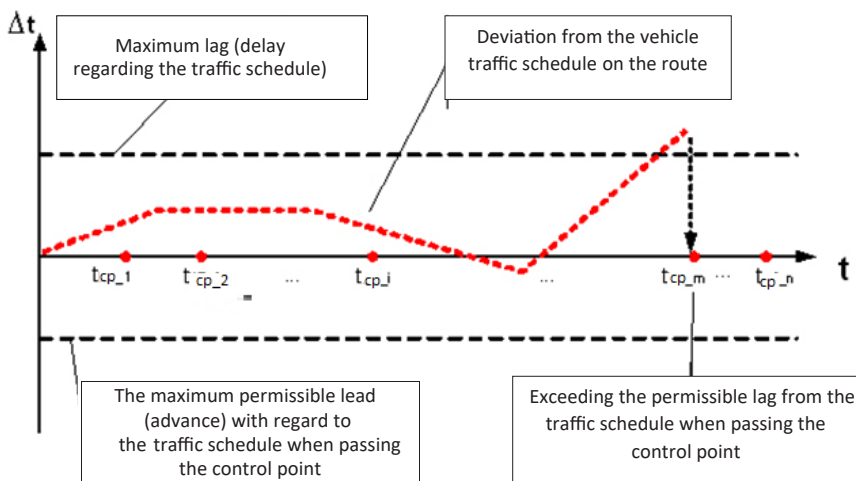
$$\Delta S = S(t) - S^p(t). \quad (10)$$

The time deviation  $\Delta t$  of movement of cargo vehicle is determined from the expression:

$$\Delta t = \frac{|S(t) - S^p(t)|}{V_{av}}. \quad (11)$$

The time deviation is equal to the absolute value of the difference between the planned and actual distance traveled at time  $t$  divided by the average speed. For the purposes of dispatch control, one can consider the value of  $\Delta$  with a sign. If the actual distance traveled at time  $t$  is greater than the planned distance, then there is movement of the vehicle at an average speed higher than planned. In this case,  $\Delta t$  will be positive. If the actual distance traveled at time  $t$  is less than the planned distance, then there is a «lag» (delay), i.e. driving at an average speed lower than planned. In this case,  $\Delta t$  will be negative. Substituting  $S(t), V_{av}, S^p(t)$  with their expressions





**Pic. 1. Scheme of control of vehicle movement on the route.**

from formulas (5), (7), (9) and having performed the transformations, we obtain:

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(c_{\phi}(\phi_n - \phi(t))^2 + (c_{\psi}(\psi_n - \psi(t)))^2} - \frac{[I_{p(i+1)} - I_{p(i)}] \cdot [t - t_{p(i+1)}]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]}}{\frac{[I_{p(i+1)} - I_{p(i)}]}{[t_{p(i+1)} - t_{p(i)}]}}. \quad (12)$$

Pic. 1 schematically shows an automatic system for monitoring the respect of the schedule by a vehicle on a route.

The model described above allows the system to continuously and automatically monitor the  $\Delta t$  value. In this case, the system technologist sets the maximum permissible values of  $\Delta t$ . When they are exceeded, the system generates a signal to the dispatcher about the need for regulatory actions in order to return the transportation process to its planned state or, if this is impossible, in order to reduce the negative consequences of the violation. The picture graphically displays the process of increasing the deviation of the vehicle movement from the schedule, and the point in time at which the fact of reaching the maximum permissible deviation is recorded, which can be unsafe for vehicle driver in the northern conditions.

#### **Estimation of the plan of cargo transportation by road transport between control points**

Estimating the plan of cargo transportation by road transport between control points is based on a comparison of the planned and actual time when the vehicle passes the control points of the route, particularly specified by experts in

organization of transportation for the reasons of control, safety and reliability of cargo transportation. As control points on the route, the system must indicate the start and end points, as well as one, two or three intermediate control points, depending on the length of the route. In order to automatically estimate the respect of the plan of cargo transportation by road transport for each control point, the maximum permissible amount of deviation (lead) from the planned time ( $+\Delta t_{\text{per}}$ ) and lag ( $-\Delta t_{\text{per}}$ ) are indicated. If the actual deviation from the schedule allowed during passage of the control point falls within the interval  $[-\Delta t_{\text{per}}, +\Delta t_{\text{per}}]$ , the system automatically takes into account the fact of planned passage of the control point. In this case, the actual time taken to pass the control point is determined as follows. For each control point, a certain spatial area is determined and mathematically described, including the location of the control point, which is called the « zone of influence of the control point». If the navigational marks coming from the vehicle are tied to the zone of the control point, it is considered that the vehicle is located at the corresponding control point. The rules by which the system automatically determines the actual time taken to pass the control point are formulated as follows:

1) if the control point is the starting point of the route, then the actual start time of the route is counted by the system according to the time of formation of the last navigation mark received from the vehicle, located within the zone of the first control point which is the starting point on the route;





2) if the control point is the final point of the route, then the actual time of the end of the route is calculated according to the time of formation of the first mark received from the zone of the last control point which is the final point on the route;

3) if the control point is an intermediate point on the route, then the actual time of passing by the intermediate control point is counted as the time when the navigation mark was formed within the zone of the intermediate control point, which turned out to be as close as possible or coincided with the planned time of passage of this control point on the route.

In order to organize an automatic assessment of the planned cargo transportation, the system technologist indicates how many control points on the route should be passed without failures (i.e., not exceeding the specified limit deviations from the planned travel time) so that the entire route is counted as planned. Usually it is allowed to pass no more than one control point on the route outside fixed time, i.e. with exceeding the maximum permissible deviation when overtaking or when lagging, for the system should consider the travel plan as respected. For example, if five control points are defined for a route, then the technologist can specify the value «four control points» to confirm that the travel plan has been respected. At the same time, it does not matter for the system which point out of

five will not be passed within the set schedule. If the vehicle passes no less than the number of control points specified by the technologist on the route within the schedule, travel is automatically considered as conform to the plan in the system. Otherwise, transportation is counted as not conforming to the plan.

#### **Digital model of a winter road**

The objects of the *digital* model of the temporary winter road are as follows:

1) Track, includes:

1.1) Digital description of the spatial model of the road.

1.2) Semantic description of specific sections (river crossing, dangerous sections, etc.).

1.2.1) Control points (stops).

1.2.2) Dangerous areas with semantics (dangerous moments arising on the route).

2) Time periods (impact of certain dangers/threats with the possibility of programmed processing of these situations at different periods of the year or at different periods of the day, or in both cases).

3) Location of dangerous points and their extent in the description of the characteristics of traffic.

If the situation on the route worsens, the dispatcher informs the driver on the operational situation. Standard messages are pre-programmed for all possible adverse situations. In this case, the dispatcher selects the desired message from the list and sends it to the driver





with a request to confirm reception of the message. Confirmation of the message is mandatory if the dispatcher sends a «Change Route» command. The dispatcher types a short text of approximately 20 characters, which is transmitted to the on-board navigation terminal and is displayed on the terminal screen. The system time is also shown on the terminal screen [14, 15].

The driver of the vehicle also has pre-formed messages: calling the police, firefighters, ambulance, and an obstacle on the route, which he can choose from the list and send to the dispatcher instead of voice communication.

4) Semantic and spatial description of control points.

The semantic and spatial description of control points depends on the type of control point.

At the end of the operational day, information about the results of the transportation process appears in the system. Information is available to all legitimate users. It may include balances of cargo volumes in warehouses, forecast of cargo arrival for a day, week, month, time of arrival of forecasted consignments.

A forecast of time of movement of vehicles at control points of the route is formed, time of delivery of goods to the consumer is predicted.

#### **Comparison of traditional and proposed principles for monitoring movement of vehicles on temporary roads (winter roads)**

1. Principles of motion control in a traditional control system:

1.1. Management is carried out only at certain points in time (the beginning of the route and the end of the route).

1.2. Control is carried out only at specific points (transshipment points).

2. Control principles when using a digital route model:

The introduction of navigation equipment and of a digital track model allows to:

1) determine the distance and time of travel to the next control point.

2) control deviation from the traffic schedule on each planned stage between control points using a function that describes the planned distance from the starting point of the route as a function of time:  $F(l) = F(l, t)$ . The function allows to determine the deviation from the traffic schedule which is delay time ( $T_d$ ).

#### **Monitoring the current state of the transshipment point: the key object of the transport infrastructure**

The digital model of each transshipment point, including the terminal, can be described in terms of queuing systems. This description includes a parametric description of individual terminal facilities (free areas, loading service posts, vehicle queues in the service areas of various cargo flows (bulk, packaged, tare-piece, container, bulk, oversized and large loads, etc.), queues for service by class and direction). A forecast is formed for occurrence of a denial of service situation due to capacity overload (current acceptance of applications exceeds the volume planned for the operational day). In the future, dynamic information about the state of the terminal should be stored in the system and the possibility of redirecting, redistributing part of the cargo to other terminals should be predicted.

From the point of view of the basic functions of the terminal, planning of processing of the

incoming application flow is carried out using the following initial data:

1. Forecast of time of arrival of goods to the terminal by days or hours.

2. Service time forecast (cargo volume, processing time, etc.).

3. Forecast of time spent in the queue for service.

4. Forecast of loading of work areas by specialization (service points by specialization).

Initial data for the forecast:

$n$  – number of posts;

$n_1, n_2, \dots, N_n$  – number of posts by specialization;

$O$  – service queues;

$O_1(t), O_2(t), \dots, O_n(t)$  – queues for posts by specialization.

Applications flow parameters:

$P^1_1, P^1_2, \dots, P^1_n$  – number of applications for the next day by specialized posts;

$P^2_1, P^2_2, \dots, P^2_n$  – number of applications for the second day (from the current date) by specialized posts;

$P^m_1, P^m_2, \dots, P^m_n$  – number of applications for next days (from the current date) by specialized posts,

where  $m$  is forecast horizon in days.

**Conclusions.** The developed methodological basis for increasing the level of automation of basic functions of dispatch control of cargo transportation by road transport in mixed multimodal traffic based on the use of information generated by GLONASS global navigation system allows, according to experts, to reduce, on average, time for cargo processing by 30 % and decision-making time by 50 %.

The developed new approaches to formation of the transportation system, which increase the efficiency of the use of road transport, which works under control of the navigation systems of the dispatch control, can also reduce deviations of vehicles from the planned travel time by 95 %.

## REFERENCES

1. Filippova, N. A. Methodology of organization and functioning of cargo delivery systems in the northern regions: Monograph [*Metodologiya organizatsii i funktsionirovaniya sistem dostavki gruzov v severnie regiony: Monografiya*]. Ed. by V. M. Belyaev Moscow, Publishing house Technopoligrafcentr, 2015, 208 p.

2. Filippova, N. A. Methods for assessing the effectiveness of transport services in the East Siberian region [*Metody otsenki effektivnosti transportnogo obsluzhivaniya Vostochno-Sibirskogo regiona*]. *Proceedings*

*of the All-Russian scientific and practical conference Environmental safety of the East Siberian region*, Irkutsk, 2003, pp. 221–227.

3. Filippova, N. A., Belyaev, V. M. Analysis of the process of managing the northern delivery in modern market conditions [*Analiz protsessa upravleniya severnym zavozom v sovremennykh rynochnykh usloviyakh*]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtokhozyaistvo*, 2010, Iss. 9, pp. 17–20.

4. Filippova, N. A., Belyaev, V. M. Adaptive mathematical model for optimizing the delivery of goods in the North [*Adaptivnaya matematicheskaya model dlya optimizatsii zavoza gruzov v usloviyakh Severa*]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtokhozyaistvo*, 2013, Iss. 11, pp. 17–20.

5. Konoplyanko, V. I., Kocherga, V. G., Zyryanov, V. V. Use of navigation satellite systems for traffic control [*Ispolzovanie navigatsionnykh sputnikovyykh sistem pri upravlenii dorozhnym dvizheniem*]. *Proceedings of the international scientific technical conference «Modern problems of the road transport complex»*. Rostov-on-Don, 1998, p. 108.

6. Larin, O. N. Methodology of organization and functioning of transport systems of regions [*Metodologiya organizatsii i funktsionirovaniya transportnykh sistem regionov*]. Chelyabinsk, SUSU publ., 2007, 206 p.

7. Sviridenko, S. S. Improved information technology [*Sovershenstvovaniye informatsionnye tekhnologii*]. Moscow, Radio i Svyaz' publ., 1989, 132 p.

8. GOST R54620-2011 Global Navigation Satellite System. Accident emergency response system. Automotive emergency call system. General technical requirements [*GOST R54620-2011 Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Sistema ekstrennogo reagirovaniya pri avariakh. Avtomobilnaya sistema vyzova ekstrennykh operativnykh sluzhb. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya*]. Moscow, 2011.

9. Omnikomm. Complete solution. Just-in-time delivery under the control of OMNICOmm [*Omnikomm. Kompleksnoe reshenie. Dostavka Just-in-time pod kontrolem OMNICOmm*]. [Electronic resource]: <https://www.omnicomm.ru/case/db-schenker/>. Last accessed 17.07.2019.

10. Filippova, N. A., Belyaev, V. M., Shilimov, M. V., Koshkarev, P. P., Odinkova, I. V. The Analytical Test of Methodological Approaches to the Increasing the Level of Automation of the Basic Functions of the Car Dispatching of the Cargo Delivery to Northern Regions of the Russian Federation. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 2017, Vol. 12, Iss. 21, pp. 11532–11535.

11. Efimenko, D. B., Maksimych, O. I., Ostroukh, A. V., Zbavitel, P. Yu., Ivakhnenko, A. M., Karelina, M. Y. Technology of Monitoring and Control Algorithm Design for Earth-Moving Machine. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, Vol. 11, Iss. 9, pp. 6430–6434.

12. Bogumil, V., Efimenko, D. Urban Transport Dispatch Control System Helps to Increase Intelligent Transport Systems Effectiveness. *11<sup>th</sup> European transport congress*, Prague, September 19–20. 2013, pp. 20–25.

13. Baskin, A. S., Moskvina, G. I. Coastal ship traffic control systems [*Beregovie sistemy upravleniya dvizheniem sudov*]. Moscow, Transport publ., 1986, 160 p.

14. Bogumil, V. N., Kudryavtsev, A. A., Duque-Sarango, M. J. Analysis of the possibility of using telematics tools for the collection and processing of data on the dynamics of passenger traffic in the Bus Rapid Transit system. *The Revista Facultad de Ingenieria (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia)*, pp. 49–55.

15. Bogumil, V., Vlasov, V. Intelligent transportation systems for road users and public transport. Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2015, 153 p.







# Принятие решений по результатам автоматического диагностирования деталей и узлов подвижного состава



*Бурченков Валерий Васильевич – Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь\*.*

**Валерий БУРЧЕНКОВ**

В статье рассмотрена планово-предупредительная система ремонта, основной недостаток которой заключается в том, что она является по существу разомкнутой системой технического контроля, не учитывающей объективную оценку подвижного состава «по состоянию».

Целью исследования являлись детальный обзор и обобщение имеющихся исследований и разработка предложений по совершенствованию системы ремонта подвижного состава.

На основе анализа и обобщения исследований в данной сфере предложено для сокращения материальных и трудовых затрат на техническое обслуживание вагонов сделать систему технической диагностики замкнутой. В качестве обратной связи целесообразно использовать автоматическую систему тестового диагностического контроля, осуществляющую определение дефектов вагонов на ходу поезда, что позволит существенно сократить количество ручных операций по осмотру подвижного состава в парках прибытия сортировочных станций и автоматизирует принятие решений о последующей эксплуатации контролируемого подвижного состава, исходя из его фактического состояния.

Предложена методика для оценки результатов технической диагностики подвижного состава, в которой использованы вероятностные оценки с разделением наиболее значимых дефектов объекта контроля на три класса по степени ответственности. Установлено, что распределению Вейбулла соответствуют усталостные дефектные явления, а распределению Релея – износные явления с постоянной или периодической рабочей нагрузкой.

Для выявления дефектных вагонных колёс и буксовых узлов предложена динамическая система, в состав которой входят: объект контроля – колесо или букса, аппаратура автоматического тестового диагностического контроля и решающее устройство для принятия решения о дальнейшем следовании выявленного дефектного вагона (например, о движении без ограничений, движении до ближайшего ремонтного депо для профилактического осмотра и ремонта, немедленном исключении из эксплуатации). Оптимальное уравнение разделяющей функции «ложной тревоги» и «пропуска» получено на основе критерия Байеса, который минимизирует средний риск принятия неправильного решения.

**Ключевые слова:** железная дорога, безопасность движения, подвижной состав, тестовое диагностирование, классификация дефектов.

\*Информация об авторе:

**Бурченков Валерий Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры вагонов Белорусского государственного университета транспорта, Гомель, Беларусь, [Lenadva@tut.by](mailto:Lenadva@tut.by).

Статья поступила в редакцию 30.06.2019, принята к публикации 22.08.2019.

**For the English text of the article please see p. 238.**



## ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация перевозочного процесса обусловила развитие технической диагностики, получившей широкое распространение на железнодорожном транспорте. Вместе с тем, к настоящему времени сложились условия, когда без широкого внедрения объективных методов и «отвечающих современному уровню цифровых средств контроля технического состояния локомотивов и вагонов» [1, с. 9] трудно рассчитывать на существенное повышение эффективности использования подвижного состава и улучшение качества его технического обслуживания и ремонта [1].

Созданы «разнообразные внешние и встроенные, универсальные и специализированные средства технического диагностирования подвижного состава» [2, с. 14] и накоплен большой опыт их применения. Однако, сделанное в этой области ещё значительно отстаёт от потребностей практики.

Как отмечается авторами исследований, «для поддержания вагонов и локомотивов в постоянной эксплуатационной исправности на железных дорогах Российской Федерации и Беларуси нашла применение планово-предупредительная система ремонта, в основу которой положены следующие принципы» [3, с. 78–80]:

а) «периодичность ремонта, установленная в плановом порядке, определение объёма работ для восстановления работоспособности вагона (локомотива) по видам периодических ремонтов»;

б) «организация межремонтного технического обслуживания вагонов, установление продолжительности межремонтного периода в ремонтном цикле в зависимости от типа вагона и условий его работы»;

в) «периодическое освидетельствование, ревизия и проверка состояния узлов и агрегатов вагона» [3, с. 78–80].

Наряду с известными преимуществами эта система имеет и недостатки. Главный из них заключается в том, что она является по существу разомкнутой системой технического контроля, предусматривающей обязательное выполнение определённого перечня работ и не учитывающей объективную оценку подвижного состава «по состоянию». Ситуация усугубляется тем, что «для осмотра состава в пунктах техни-

ческого обслуживания (ПТО) выделяется ограниченное количество времени (в пределах 20–30 минут)» [3, с. 96].

Значительного сокращения материальных и трудовых затрат на техническое обслуживание вагонов при одновременном повышении уровня их технического состояния можно достичь, если сделать систему технической диагностики замкнутой. Предложено в качестве обратной связи использовать решающее устройство, которое определит условия последующей эксплуатации проконтролированного подвижного состава, исходя из его фактического состояния, и позволит «существенно сократить количество ручных операций по осмотру подвижного состава в парках прибытия станций» [4, с. 44]. Для этой цели актуально использование автоматизированных систем тестового неразрушающего контроля и диагностики, осуществляющих определение дефектов вагонов на ходу поезда при подходе к станции. При этом отбраковка узла или детали вагона «будет производиться автоматически, без участия оператора» [2; 5–9].

Интерес к техническому тестовому диагностированию локомотивов и вагонов связан ещё и с тем, что «сложность конструкции, интенсивность эксплуатации и повышение требования к надёжности и безопасности не позволяют интуитивным и ручным способом определить их техническое состояние» [4, с. 46]. «Применение специализированных средств диагностирования даёт возможность достоверно определить техническое состояние подвижного состава» [10, с. 41].

Как замечают исследователи, «автоматизированные диагностические комплексы контроля технического состояния вагонов и локомотивов на ходу поезда должны выявлять следующие неисправности наиболее ответственных узлов подвижного состава: контроль температуры буксовых узлов и заторможенных колёс; контроль геометрических размеров и дефектов колёс по поверхности катания; контроль габаритных размеров вагонов; контроль параметров ударно-тягового механизма автосцепок; выявление волоочащихся деталей неисправной тормозной системы вагонов и т.д.» [2, с. 147].



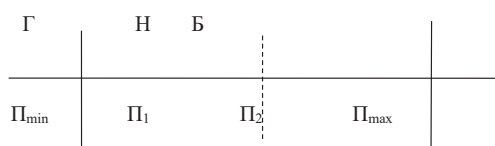


Рис. 1. Трёхпозиционное оценивание состояния объекта (узла).

Для оценки результатов технической диагностики локомотивов предложен вероятностный подход. На железнодорожном транспорте существует проблема оценки достоверности результатов диагностики локомотивов и вагонов [4, с. 106]. «Под достоверностью диагностирования принято понимать количественную оценку степени соответствия результатов диагностирования фактическому техническому состоянию объекта. Эта оценка является вероятностной и для её определения необходимо накопление статистического материала. Исследуемый узел объекта контроля в результате диагностического анализа может быть признан годным или забракован (и соответственно обозначен Г или Б)» [4, с. 106–107].

Те же авторы подчёркивают, что «качество диагностического оборудования можно оценить допустимой вероятностью ошибки диагностирования  $P_d$ . Эту величину можно определить экспериментально по эталонному образцу методом многократных испытаний. Если количество испытаний равно  $N$ , количество правильно принятых решений  $N_p$ , число ошибочных решений  $N_0$ , то оценка  $P_d$  при достаточно больших значениях  $N$  определится из выражения» [4, с. 107]:

$$P_d \approx 1 - N_p/N = N_0/N = \alpha + \beta. \quad (1)$$

### ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВОВ

Последовав совету исследователей, «обратимся к вероятностным оценкам достоверности диагностики с позиций эксплуатации локомотивов и экономичности их обслуживания. Пропуск дефекта оборудования локомотива может привести к нарушению безопасности движения в пути следования. Кроме потерь от остановок поездов, что можно оценить количественно, возможны и более тяжёлые случаи, которые оцениваются по другим критериям (например, потерь от крушений подвижного состава и аварий)» [4].

В то же время ошибочное признание годного объекта неисправным связано с дополнительными затратами при ремонте. Сопоставление и оптимальный выбор показателей среди этих составляющих производят обычно эмпирически. «С технической точки зрения снижение вероятностей ошибок прямо связано с качеством технологического оборудования и алгоритмами диагностирования» [4, с. 108].

«Параметр, выбранный в качестве оценочного для диагностирования, сравнивается с установкой — граничным значением этого параметра. Если значение параметра не превышает установку, объект считается годным, в противном случае он бракуется» [4, с. 109]. «Условия принятия диагностического решения во времени меняются, при этом повышается вероятность ошибки. Пороговые значения для принятия решения разные у каждого экземпляра диагностируемого изделия, вследствие чего конкретное значение установки расширяется до поля возможных значений, что затрудняет процесс диагностирования. Значительное влияние на увеличение числа ошибок диагностирования оказывают внешние условия (влажность, температура, помехи, электромагнитные поля). Это влияет как на работу диагностического устройства, так и на сам объект диагностирования» [4, с. 109].

«Вследствие указанных причин принятие решения о состоянии объекта будет более объективным не по порогу, а по диапазону полей допусков» (рис. 1)» [4].

«Здесь  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$  минимальное и максимальные значения диагностируемого параметра,  $P_1$  и  $P_2$  — зона неопределённого решения (на рис. 1 это соответствует решению Н). Алгоритм принятия решения модифицируется следующим образом:

- если диагностируемый параметр находится в диапазоне  $[P_{\min}; P_1]$ , то принимается решение о годности объекта;
- если параметр находится в пределах  $[P_2; P_{\max}]$ , то объект считается неисправным;
- при значениях параметра в диапазоне  $[P_1; P_2]$  решение о годности считается не принятым, и процесс диагностики должен быть повторён.

При этом для определения годности применяют другие дополнительные крите-

рии и способы диагностирования или повторение эксперимента» [4, с. 46; 15].

«Покажем, что в случае использования описанного формирования решения вероятность ошибки снижается. Для этого применяется вероятностный подход и рассматривается один из двух альтернативных случаев (устройство исправно или неисправно). При исправном устройстве плотность распределения вероятности контролируемого параметра достаточно точно аппроксимируется распределением Релея» [4, с. 110]:

$$p(x) = (x/\sigma^2) \exp[-(x/\sigma)^2], \quad (2)$$

где  $x$  — значение контролируемого параметра;

$\sigma$  — среднеквадратическое отклонение;

$p(x)$  — плотность распределения вероятности.

«Распределение (2) имеет явно выраженный асимметричный характер с максимумом и с падением характеристики к нулю и является частным случаем распределения Вейбулла с плотностью:

$$\xi(x) = \frac{\alpha}{\sigma} (x/\sigma)^{\alpha-1} \exp[-(x/\sigma)^\alpha] \quad (3)$$

при  $\alpha = 2$  и частным случаем распределения случайной величины  $s = \sqrt{x_n^2/n}$  с плотностью:

$$P(x) = \frac{\sqrt{2n}}{\sqrt{\Gamma(n/2)}} \left( \frac{x\sqrt{n}}{\sqrt{2}} \right)^{n-2} \exp \left\{ -\frac{n}{2} \left( \frac{x}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

при  $n = 2$  [4, с. 111].

К распределению Вейбулла приводят усталостные явления, а к распределению Релея — износные явления с постоянной или периодической рабочей нагрузкой с постоянной амплитудой. Таким образом, распределение Релея имеет в определённом смысле универсальный характер и может быть использовано при изучении соответствующих потоков отказов.

«Колёсные пары относятся к ходовым частям и являются одним из наиболее ответственных элементов вагона. Поэтому к ним предъявляют особые, повышенные требования Госстандарта, Правил технической эксплуатации железных дорог, Инструкции по освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колёсных пар, а также других нормативных документов при проектировании, изготовлении и содержании» [13, с. 46].

Особое внимание следует уделять контролю состояния колёсных пар на ходу поезда, что позволяет заранее выявлять дефектные колёсные пары, передавать полученную информацию на «ближайший пункт технического осмотра ПТО с целью детального осмотра техническим персоналом» [14–18].

«В структурном виде система автоматической тестовой диагностики буксовых узлов представляет собой сложную динамическую систему, в состав которой входят: объект контроля — колесо или букса, аппаратура тестового диагностического контроля и решающее устройство для определения условий дальнейшей эксплуатации проконтролированного подвижного состава» [4, с. 138]. Это устройство обеспечивает принятие решения (на основании класса, присвоенного выявленному дефекту) о дальнейшем следовании дефектного вагона (например, о движении без ограничений, движении до ближайшего ремонтного депо для профилактического осмотра и ремонта, немедленном исключении из эксплуатации). Общая функциональная схема тестового аппаратного диагностирования приведена на рис. 2.

«Преобразователь параметров преобразует пространство состояний контролируемого объекта  $E$  в пространство электрических сигналов  $S$ , подлежащих дальнейшей обработке:

$$S_i = Q(E_i), \quad (5)$$

где  $Q$  — оператор преобразования пространства состояний объекта в пространство сигналов. Алгоритм функционирования этого оператора соответствует действию аналого-цифрового преобразователя, используемого для измерения непрерывных величин измеряемых дефектов и выдающего цифровой эквивалент в форме, согласованной с работой формирователя признаков» [12, с. 145; 19].

«Формирователь признаков (кода состояния объекта) преобразует пространство сигналов  $S$  в пространство признаков  $X$ , характеризующих состояние объекта:  $X_i = R(S_i)$ , (6)

где  $R$  — оператор преобразования пространства сигналов в пространство признаков.

Классификатор на основе анализа признаков состояния объекта выполняет





Рис. 2. Структурная схема системы автоматического тестового диагностического контроля буксовых узлов и колёс при движении поезда.

Таблица 1

Распределение цифровых показателей дефектов колёс по классам неисправностей

№ п/п	Наименование дефекта или контролируемого параметра	Цифровые показатели		
		Разрешена эксплуатация	Условно допустимая эксплуатация с остановкой на ближайшей станции	Немедленное исключение из эксплуатации
1	Прокат по кругу катания колеса, мм	0–3	3–7	7 и более
2	Ползун на поверхности катания, мм	0–0,5	0,5–1,0	более 1,0
3	Выщербины или вмятины на поверхности гребня, мм	0–1,0	1,0–4	более 4
4	Местное или общее увеличение ширины бандажа или обода цельнокатаного колеса, мм	0–3	3–6	более 6
5	Кольцевые выработки на поверхности катания на расстоянии до 40 мм от наружного торца бандажа, глубиной, мм	0–0,5	0,5–2	более 2
6	Навар на поверхности катания, высотой, мм	0–0,1	0,1–0,5	более 0,5

функцию классификации, то есть вырабатывает сигнал, указывающий на принадлежность вектора признаков соответствующему классу состояний:

$$\gamma = L(X_i), \quad (7)$$

где  $L$  – алгоритм работы классификатора» [12, с. 146].

Регистратор, руководствуясь принятым классификатором решением  $\gamma_i$ , выдаёт информацию  $J_{Ei}$  о принадлежности состояния контролируемого объекта соответствующему классу состояний, то есть:

$$J_{Ei} = H(\gamma_i), \quad (8)$$

где  $H$  – оператор преобразования сигнала классификатора информатором.

«Таким образом, обобщённая аналитическая запись процесса аппаратного тестового обнаружения неисправности, построенная на основании выражений (5), (6), (7) и (8), имеет вид:

$$J_{Ei} = H(L(R(Q(E_i)))) \text{ [12, с. 146].} \quad (9)$$

Решающее устройство, на основании дефектов составных частей и недопустимых значений параметров колёсных пар,

приведённых в Руководящем документе ВНИИЖТа [13] и в стандарте государственного объединения «Белорусская железная дорога» СТП БЧ 17.310-2015, определяет градации цифровых показателей дефектов. Распределение цифровых показателей дефектов колёс по классам неисправностей представлено в таблице 1.

Разнесение дефектов колёс на три категории соответствует алгоритму функционирования «автоматизированной системы контроля подвижного состава АСК ПС, обеспечивающей автоматическую классификацию параметров колёсных пар по трём группам: «Тревога 0» – нормальная эксплуатация подвижной единицы; «Тревога 1» – условно допустимая эксплуатация подвижной единицы со слежением; «Тревога 2» – немедленная остановка поезда и осмотр дефектной подвижной единицы» [18, с. 38].

Программное обеспечение системы АСК ПС предусматривает управление различными подсистемами диагностики,



начиная с периферийных установок, автоматизированных рабочих мест АРМ ПТО и бригад вагонников до контроля результатов исполнения. Здесь и реализуются преимущества цифровой технологии: «детерминированные тестовые данные о результатах контроля каждого конкретного вагона и локомотива собираются в единую базу для последующего анализа и работы с ними. Это обеспечивает поток объективной и точной информации, позволяющей цифровому комплексу формировать управляющие воздействия без участия операторов» [20, с. 154].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование тестового технического диагностирования позволит существенно повысить достоверность оценки технического состояния проконтролированного подвижного состава.

Классификация дефектов подвижного состава и его ответственных деталей повышает наглядность отображения информации и систематизирует сведения о выявленных дефектах в проконтролированном подвижном составе.

Применение автоматизированных диагностических систем контроля позволяет одновременно выявить и устранить неисправности ходовых частей подвижного состава, возникающие в процессе эксплуатации, а также существенно сократить количество ручных операций по осмотру подвижного состава в парках приёма и обеспечить полную автоматизацию процесса слежения за такими вагонами на ходу поезда.

Сочетание предварительно обработанных данных о проконтролированных поездах на подходе к ПТО узловых станций повысит эффективность функционирования интегрированной цифровой модели вагонного парка в масштабе АСК ПС всей железной дороги.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Е. Н., Дзюба Ю. В., Батраев В. В. О направлениях развития цифровой железной дороги // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 1. — С. 9–13.
2. Бойник А. В., Загарий Г. И., Кошевой С. В. и др. Диагностирование устройств железнодорожной автоматики и агрегатов подвижных единиц. — Харьков: ЧП Издательство «Новое слово», 2008. — 304 с.

3. Сенько В. И. Гурский Е. П., Чернин И. Л. и др. Грузовые вагоны железных дорог: Учеб. пособие / Под общ. ред. В. И. Сенько. — Гомель: БелГУТ, 2018. — 531 с.

4. Наговицин В. С. Системы диагностики железнодорожного подвижного состава на основе информационных технологий. — М.: ВИНТИ РАН, 2004. — 248 с.

5. Иванова Т. В., Налабордин Д. Г. Оценка предотказных состояний буксового узла грузового вагона // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2017. — № 1. — С. 46–47.

6. Мишин И. М. Техническое обслуживание и ремонт вагонов за рубежом // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2018. — № 1. — С. 44–45.

7. Бурченков В. В., Холодилов О. В. Техническая диагностика состояния подвижного состава и перспективы её развития в Западной Европе и США // Вестник БелГУТ; Наука и транспорт. — 2017. — № 1. — С. 5–9.

8. Гартнер Е. Железные дороги США: особенности грузовых и пассажирских перевозок // Железные дороги мира. — 2007. — № 4. — С. 9–32.

9. Шобель А. Дистанционный мониторинг технического состояния подвижного состава // Железные дороги мира. — 2013. — № 6. — С. 54–59.

10. Криворудченко В. Ф., Ахмеджанов Р. А. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта. — М.: Маршрут, 2005. — 436 с.

11. Гондоров В. А. Современные средства диагностики подвижного состава на ходу поезда // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2017. — № 4. — С. 36–37.

12. Трестман Е. Е., Лозинский С. Н., Образцов В. Л. Автоматизация контроля буксовых узлов в поездах. — М.: Транспорт, 1983. — 352 с.

13. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колёсных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. «Технический контроль колёсных пар и их элементов», РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017.

14. Редекер Р. Удалённый мониторинг технических средств железных дорог // Железные дороги мира. — 2012. — № 10. — С. 66–68.

15. Бурченков В. В. Автоматизация контроля технического состояния подвижного состава. — Гомель: БелГУТ, 2008. — 235 с.

16. Шобель А. Напольные системы мониторинга подвижного состава // Железные дороги мира. — 2014. — № 3. — С. 51–59.

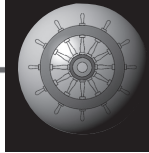
17. Лозинский С. Н., Алексеев А. Г., Карпенко П. Н. Аппаратура автоматического обнаружения перегретых букс в поездах. — М.: Транспорт, 1978. — 160 с.

18. Миронов А. А. Перспективные направления совершенствования средств контроля КТСМ-02 и АСК ПС // Автоматика, связь, информатика. — 2009. — № 1. — С. 38–41.

19. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 304 с.

20. Негрей В. Я., Бурченков В. В. Перспективы использования цифровых технологий на сортировочных станциях // Труды седьмой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018, Москва)». — М.: Изд-во ОАО «НИИАС», 2018. — С. 153–154.





# Decision Making Based on the Results of Automatic Diagnostics of Parts and Assemblies of Rolling Stock



*Burchenkov, Valery V., Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus\*.*

**Valery V. BURCHENKOV**

## ABSTRACT

The article reviews a preventive maintenance system for repairs, the main disadvantage of which is that it is essentially an open system of technical control that does not take into account objective assessment of rolling stock «as it is». The objective of the study was to review and summarize the existing researches and to word the proposals to develop the system of rolling stock maintenance. Based on the analysis of the researches in that field it is proposed to reduce material and labor costs for maintenance of cars by making the system of technical diagnostics closed. As a feedback, it is advisable to use an automatic test diagnostic control system that detects car defects while the train is running. It will significantly reduce the number of manual operations for inspecting rolling stock in the arrival parks of sorting stations and automate decision-making on possibility of subsequent operation of controlled rolling stock based on its actual condition.

A technique is proposed for evaluating the results of technical diagnostics of rolling stock in which probabilistic estimates are used, dividing the most significant defects of the controlled object into three classes according to the degree of their significance for operation safety. It has been established that Weibull distribution corresponds to fatigue defective phenomena, while Rayleigh distribution corresponds to wear phenomena with constant or periodic workload.

To identify defective car wheels and axle boxes, a dynamic system is proposed, which includes: the controlled object which is a wheel or axle box, automatic test diagnostic equipment and a resolver for deciding on further operation of the identified defective car. The optimal equation of the separating function of «false alarm» and «acceptance» is obtained on the basis of the Bayes criterion, which minimizes the average risk of making a wrong decision.

**Keywords:** railway, traffic safety, rolling stock, test diagnostics, classification of defects.

\*Information about the author:

**Burchenkov, Valery V.** – Ph.D. (Eng), associate professor of the department of cars of Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus, [Lenadva@tut.by](mailto:Lenadva@tut.by).

Article received 30.06.2019, accepted 22.08.2019.

**For the original Russian text of the article please see p. 232.**

**Background.** The intensification of the transportation process led to development of technical diagnostics, which is widely used in railway transport. At the same time, conditions have now developed when, without widespread introduction of objective methods and «digital means of monitoring the technical condition of locomotives and cars that meet the current level» [1, p. 9], it is difficult to count on a significant increase in efficiency of rolling stock operation and improving quality of its maintenance and repair [1].

«A variety of external and built-in, universal and specialized means of technical diagnostics of rolling stock have been created» [2, p.14] and extensive experience in their application has been accumulated. However, what has been done in this area still lags far behind the needs of practice.

**Objective.** The objective of the article is to review and summarize studies on decision making process based on the results of automatic diagnosis of parts and assemblies of rolling stock.

**Methods.** The author uses general scientific and engineering methods, comparative and content analysis methods.

**Results.** «To maintain the cars and locomotives in constant operational condition on the railways of the Russian Federation and Belarus, a preventive maintenance system is being used that is based on the following principles» [3, pp. 78–80]:

a) «frequency of repairs established in a planned manner, determining the amount of work to restore serviceability of a car (locomotive) according to the type of periodic repair;

b) organization of overhaul maintenance of cars, establishment of duration of an overhaul period in the repair cycle, depending on the type of car and its working conditions;

c) periodic inspection, certification and checking of the condition of units and assemblies of a car» [3, pp. 78–80].

Along with the well-known advantages, this system also has disadvantages. The main one is that it is essentially an open system of technical control, providing for mandatory performance of a certain list of works and not taking into account objective assessment

of rolling stock «as it is». The situation is aggravated by the fact that «a limited amount of time (within 20–30 minutes) is allotted for inspection of the train at maintenance points» [3, p. 96].

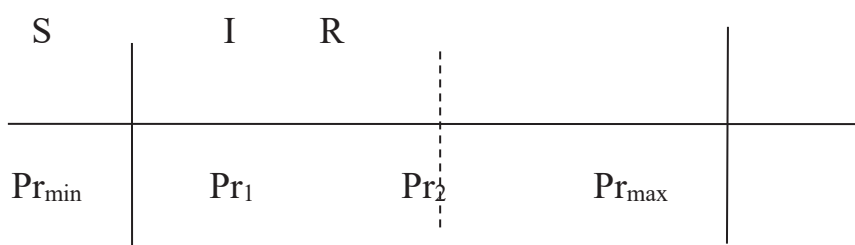
A significant reduction in material and labor costs for maintenance of cars and at the same time the increase in their technical condition can be achieved **if the technical diagnostic system is closed**. It is proposed to use a resolver as feedback, which will determine the conditions for subsequent operation of the controlled rolling stock based on its actual state and «will significantly reduce the number of manual operations for inspecting the rolling stock in the arrival parks of stations» [4, p. 44]. For this purpose, the use of automated non-destructive testing and diagnostics test systems that determine the defects of cars within the moving train while approaching the station is relevant. In this case, rejection of a unit or a part of a car «will be carried out automatically, without participation of an operator» [2; 5–9].

The interest in the technical test diagnosis of locomotives and cars is also related to the fact that «complexity of a design, intensity of operation and increasing requirements for reliability and safety do not allow intuitive and manual way to determine their technical condition» [4, p. 46]. «The use of specialized diagnostic tools makes it possible to reliably determine the technical condition of rolling stock» [10, p. 41].

«Automated diagnostic systems for monitoring the technical condition of cars and locomotives, while the train is running, should identify the following malfunctions of the most critical components of rolling stock: temperature monitoring of axle boxes and braked wheels; control of geometric dimensions and defects of wheels along the running surface; control of overall dimensions of cars; control of parameters of draw-and-buffer mechanism of automatic couplings; identification of dragging parts of the faulty brake system of cars, etc.» [2, p. 147].

To assess the results of technical diagnostics of locomotives, a probabilistic approach is proposed. In railway transport, there is a problem of assessing reliability of results of diagnostics of locomotives and cars





Pic. 1. Three-position assessment of the state of an object (node).

[4, p. 106]. «Diagnostic reliability means quantitative assessment of the degree of correspondence of diagnostic results to the actual technical condition of the object. This estimate is probabilistic and accumulation of statistical material is necessary to proceed with the estimate. The investigated unit of the controlled object following diagnostic analysis can be recognized as suitable or rejected (and accordingly designated S or R)» [4, pp. 106, 107]. The same author noted that «the quality of the diagnostic equipment can be assessed by the admissible probability of an error in diagnosing  $P_A$ . This value can be determined experimentally from the reference sample by the method of repeated tests. If the number of tests is  $N$ , the number of correctly made decisions is  $N_M$ , the number of erroneous decisions is  $N_0$ , then  $P_A$  estimate for sufficiently large values of  $N$  will be determined from the expression» [4, p. 107]:

$$P_A \approx 1 - N_M/N = N_0/N = \alpha + \beta. \quad (1)$$

#### Probabilistic assessment of reliability of locomotive diagnostics

Following the advice of the researchers, «let us turn to probabilistic estimates of reliability of diagnostics from the standpoint of operation of locomotives and cost-effectiveness of their maintenance. Missing a defect in the equipment of a locomotive can lead to a violation of traffic safety during the trip. In addition to losses from train stops, which can be quantified, more severe cases are possible, which are evaluated according to other criteria (for example, losses from rolling stock wrecks and accidents)» [4].

At the same time, erroneous recognition of a suitable object as malfunctioning one is associated with additional repair costs.

Comparison and optimal selection of indicators are usually carried out empirically. «From a technical point of view, reduction in probability of errors is directly related to the quality of technological equipment and diagnostic algorithms» [4, p. 108].

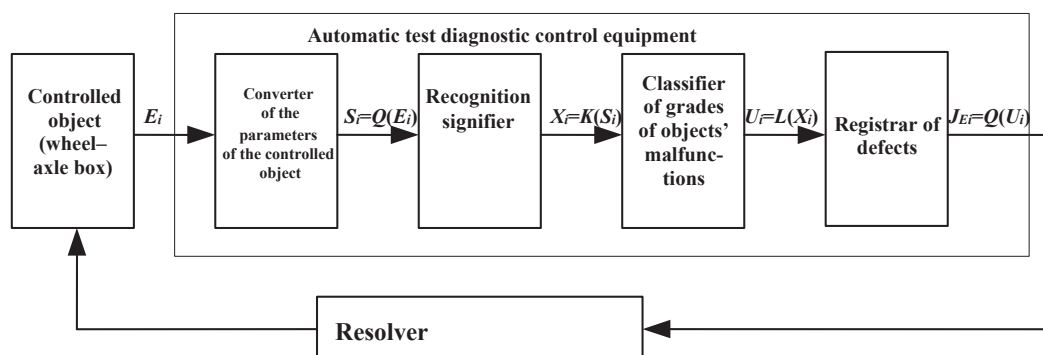
«The parameter selected as evaluative for diagnostics is compared with the boundary value of this parameter. If the parameter value does not exceed the setting, the object is considered suitable, otherwise it is rejected» [4, p. 109]. «The conditions for making a diagnostic decision change over time, while the probability of error increases. The threshold values for decision making are different for each unit of the diagnosed product, as the result the specific value of the setting expands to the field of possible values, complicating thus the diagnosing process. A significant impact on the increase in the number of diagnostic errors is exerted by external conditions (humidity, temperature, interference, electromagnetic fields). This affects both operation of a diagnostic device and a tested object itself» [4, p. 109].

«For these reasons, a decision on the condition of an object will be more objective, if it will be made not by the threshold, but by the range of tolerance fields» (Pic. 1).

«Here  $Pr_{\min}$  and  $Pr_{\max}$  are the minimum and maximum values of the diagnosed parameter,  $Pr_1$  and  $Pr_2$  are the zone of the indefinite solution (in Pic. 1 this corresponds to the solution I). The decision algorithm is modified as follows:

- if the diagnosed parameter is in the range  $[Pr_{\min}; Pr_1]$ , then a decision is made on suitability of the object;
- if the parameter is within  $[Pr_2; Pr_{\max}]$ , then the object is considered faulty;
- with parameter values in the range  $[Pr_1; Pr_2]$  the decision on suitability is





**Pic. 2. Structural diagram of a system of automatic test diagnostic control of axle boxes and wheels during train movement.**

considered not made, and the diagnostic process should be repeated.

Moreover, to determine suitability, other additional criteria and methods for diagnosing or repeating the experiment are used» [4, p. 46; 15].

«We show that in the case of using the described solution algorithm, the probability of an error decreases. For this, a probabilistic approach is applied and one of two alternative cases is considered (the device is fault-free or faulty). With a working device, the probability distribution density of the controlled parameter is rather accurately approximated by the Rayleigh distribution» [4, p. 110]:

$$p(x) = (x/\sigma^2) \exp[-(x/\sigma)^2], \quad (2)$$

where  $x$  – value of the controlled parameter;

$\sigma$  – standard deviation;

$p(x)$  – probability distribution density.

«Distribution (2) has a clearly expressed asymmetric nature with a maximum and with a decrease in the characteristic to zero and is a special case of the Weibull distribution with density:

$$\xi(x) = \frac{\alpha}{\sigma} (X/\sigma)^{\alpha-1} \exp[-(X/\sigma)^\alpha], \quad (3)$$

when  $\alpha = 2$  and a particular case of distribution of a random variable  $S = \sqrt{x_n^2}/n$  with density:

$$P(x) = \frac{\sqrt{2n}}{\sigma S(n/2)} \left( \frac{x\sqrt{n}}{\sigma\sqrt{2}} \right)^{n-2} \exp \left\{ -\frac{n}{2} \left( \frac{x}{\sigma} \right)^2 \right\}, \quad (4)$$

when  $n = 2$ » [4, p. 111].

Fatigue phenomena lead to the Weibull distribution, and wear phenomena with constant or periodic workload with constant

amplitude lead to the Rayleigh distribution. Thus, the Rayleigh distribution is, in a certain sense, universal in nature and can be used to study the corresponding failure flows.

«Wheel sets belong to the running parts and are one of the most critical car elements. Therefore, special, increased requirements of Gosstandart [state standard], the Rules for technical operation of railways, Instructions for inspection, repair and assembling of car wheel sets, as well as other regulatory documents in design, manufacture and maintenance are applied to them» [13, p. 46].

Particular attention should be paid to monitoring the condition of wheel sets during train movement, which allows to pre-identify defective wheel sets, transmit the information «to the nearest point of technical maintenance for the purpose of detailed inspection by technical personnel» [14–18].

«In a structural form, the system for automatic test diagnostics of axle box assemblies is a complex dynamic system, which includes: the controlled object which is a wheel or an axle box, test diagnostic control equipment and a resolver for determining the conditions for further operation of controlled rolling stock» [4, p. 138]. This device provides decision making (on the basis of the class assigned to the detected defect) about further operation of the defective car (for example, on operation without restrictions, taking it to the nearest repair depot for routine inspection and



Table 1

## Distribution of digital indicators of wheel defects by fault classes

No.	Name of defect or controlled parameter	Digital indicators		
		Operation allowed	Conventional operation with stop at the nearest station	Immediate decommissioning
1	High flange, mm	0–3	3–7	7 and more
2	Adjustable slide on the running surface, mm	0–0,5	0,5–1,0	more than 1,0
3	Shelled treads or dents on the surface of the ridge, mm	0–1,0	1,0–4	more than 4
4	Local or general increase in the width of bandage or rim of a wrought wheel, mm	0–3	3–6	more than 6
5	Ring workings on the running surface at a distance of up to 40 mm from the outer end of the bandage, depth, mm	0–0,5	0,5–2	more than 2
6	Weld-on deposit on the running surface, height, mm	0–0,1	0,1–0,5	more than 0,5

repair, immediate decommissioning). The general functional diagram of the test hardware diagnostics is shown in Pic. 2.

«The parameter converter converts the conditions' space of the controlled object  $E$  into the space of electrical signals  $S$  to be further processed:

$$S_i = Q(E_i), \quad (5)$$

where  $Q$  is operator of transforming the conditions' space of an object into a signal space. The functioning algorithm of this operator corresponds to the action of an analog-to-digital converter used to measure continuous values of measured defects and issuing a digital equivalent in a form consistent with operation of a signifier» [12, p.145; 19].

«The signifier (forming object conditions' coding) converts the space of signals  $S$  into the space of signs  $X$  characterizing the state of the object:

$$X_i = R(S_i), \quad (6)$$

where  $R$  is operator of transforming the space of signals into the space of signs.

Based on the analysis of signs of the conditions of an object, the classifier performs the classification function, that is, it generates a signal indicating that the feature vector belongs to the corresponding class of states:

$$\gamma = L(X_i), \quad (7)$$

where  $L$  is algorithm of the classifier» [12, p. 146].

The registrar, guided by the decision  $\gamma_i$ , made by the classifier, provides information  $J_{Ei}$  that the state of the controlled object belongs to the corresponding class of states, that is,

$$J_{Ei} = H(\gamma_i), \quad (8)$$

where  $H$  is operator of transforming the classifier signal by an informant.

«Thus, a generalized analytical record of the process of hardware test fault detection, built on the basis of expressions (5), (6), (7) and (8), has a form:

$$J_{Ei} = H(L(R(Q(E_i)))) \text{ [12, p. 146].} \quad (9)$$

The resolver, on the basis of defects in components and invalid parameter values of wheel sets given in Guidance document of VNIIZhT [13] and in the standard of the state association Belarusian Railway STP BCh 17.310-2015, determines the gradation of digital indicators of defects. The distribution of digital indicators of wheel defects by fault classes is presented in Table 1.

The allocation of wheel defects into three categories corresponds to the functioning algorithm of the «ASK PS automated rolling stock control system, which provides automatic classification of wheel set parameters into three groups: «Alarm 0» – normal operation of a moving unit; «Alarm 1» – conditionally permissible operation of a moving unit with further monitoring; «Alarm 2» – an immediate stop of a train and inspection of a defective moving unit» [18, p. 38].

The software of the ASK PS system provides for control of various diagnostic subsystems, starting from peripheral installations, workstations of automated workplaces ARM PTO and workers, to monitoring performance results. Here the advantages of digital technology are realized: «deterministic test data on the results of the control of each specific car and locomotive

are collected into a single database for subsequent analysis and processing. This provides a stream of objective and accurate information that allows the digital complex to form control actions without participation of operators» [20, p. 154].

**Conclusion.** The use of test technical diagnostics will significantly increase reliability of assessing the technical condition of controlled rolling stock.

The classification of defects in rolling stock and its critical parts increases visibility of information and systematizes data about detected defects of the controlled rolling stock.

The use of automated diagnostic monitoring systems can simultaneously identify and eliminate malfunctions of the running parts of rolling stock that arise during operation, as well as significantly reduce the number of manual operations to inspect rolling stock at the receiving tracks and ensure full automation of the monitoring of such wagons during train movement.

The combination of pre-processed data on controlled trains at the approaches to maintenance points of the central stations will increase the efficiency of the integrated digital model of the car fleet within the ASK PS of the entire railway.

REFERENCES

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

2. Boynik, A. V., Zagariy, G. I., Koshevoy, S. V. [et al]. Diagnostics of railway automation devices and devices of moving units [Diagnostirovanie ustroystv zheleznodorozhnoi avtomatiki i agregatov podvizhnykh edinits]. Kharkov, Private Enterprise Publishing House «Novoe slovo», 2008, 304 p.

3. Senko, V. I. Gursky, E. P., Chernin, I. L. [et al]. Freight cars of railways: Study guide [Gruzovye vagony zheleznykh dorog: Ucheb. posobie]. Ed. by V. I. Senko. Gomel, BelSUT, 2018, 531 p.

4. Nagovitsin, V.S. Diagnostic systems for railway rolling stock based on information technology [Sistemy diagnostiki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava na osnove informatsionnykh tekhnologii]. Moscow, VINITI RAS publ., 2004, 248 p.

5. Ivanova, T. V., Nalabordin, D. G. Assessment of precautionary states of an axle box unit of a freight car [Otsenka predotkaznykh sostoyanii buksovogo uzla gruzovogo vagona]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo*, 2017, Iss. 1, pp. 46–47.

6. Mishin, I. M. Maintenance and repair of cars abroad [Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont vagonov za rubezhom]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo*, 2018, Iss. 1, pp. 44–45.

7. Burchenkov, V. V., Kholodilov, O. V. Technical diagnostics of the state of rolling stock and the prospects for its development in Western Europe and the USA [Tekhnicheskaya diagnostika sostoyaniya podvizhnogo sostava i perspektivy ee razvitiya v Zapadnoi Evrope i SShA]. *Vestnik BelGUT; Science and transport*, 2017, Iss. 1, pp. 5–9.

8. Gartner, E. US Railways: Features of freight and passenger transportation [Zheleznie dorogi SShA: osobennosti gruzovykh i passazhirskikh perevozok]. *Zheleznie dorogi mira*, 2007, Iss. 4, pp. 9–32.

9. Shobel, A. Remote monitoring of the technical condition of rolling stock [Dstantsionnyy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava]. *Zheleznie dorogi mira*, 2013, Iss. 6, pp. 54–59.

10. Krivorudchenko, V. F., Akhmedzhanov, R. A. Modern methods of technical diagnostics and non-destructive testing of parts and components of rolling stock of railway transport [Sovremennye metody tekhnicheskoi diagnostiki i nerazrushayushchego kontrolya detalei i uzlov podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow, Marshrut publ., 2005, 436 p.

11. Gondorov, V. A. Modern diagnostic tools for rolling stock in moving train [Sovremennye sredstva diagnostiki podvizhnogo sostava na khodu poezdakh]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo*, 2017, Iss. 4, pp. 36–37.

12. Trestman, E. E., Lozinsky, S. N., Obratstov, V. L. Automation of control of axle boxes in trains [Avtomatizatsiya kontrolya buksovykh uzlov v poezdakh]. Moscow, Transport publ., 1983, 352 p.

13. Guidance document on repair and maintenance of wheel sets with axle boxes of freight cars of the main railways of 1520 (1524) mm gauge. «Technical control of wheel sets and their elements», RD VNIIZhT 05.27.01-2017 [Rukovodyashchiy dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovymi uzlami gruzovykh vagonov magistralnykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm. «Tekhnicheskii kontrol kolesnykh par i ikh elementov», RD VNIIZhT 05.27.01-2017].

14. Redeker, R. Remote monitoring of technical means of railways [Udalenniy monitoring tekhnicheskikh sredstv zheleznykh dorog]. *Zheleznie dorogi mira*, 2012, Iss. 10, pp. 66–68.

15. Burchenkov, V. V. Automation of control of the technical condition of rolling stock [Avtomatizatsiya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava]. Gomel, BelGUT publ., 2008, 235 p.

16. Schobel, A. Floor monitoring systems of rolling stock [Napolnie sistemy monitoring podvizhnogo sostava]. *Zheleznie dorogi mira*, 2014, Iss. 3, pp. 51–59.

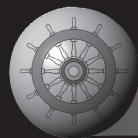
17. Lozinsky, S. N., Alekseev, A. G., Karpenko, P. N. Equipment for automatic detection of overheated axle boxes in trains [Apparatura avtomaticheskogo obnaruzheniya peregretykh buks v poezdakh]. Moscow, Transport publ., 1978, 160 p.

18. Mironov, A. A. Prospective directions for improvement of control means KTSM-02 and ASK PS [Perspektivnye napravleniya sovershenstvovaniya sredstv kontrolya KTSM-02 i ASK PS]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2009, Iss. 1, pp. 38–41.

19. Baranov, L. A. Level quantization and temporal discretization in digital control systems [Kvantovanie po urovnyu i vremennaya diskretizatsiya v tsifrovyykh sistemakh upravleniya]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1990, 304 p.

20. Negrey, V. Ya., Burchenkov, V. V. Prospects for the use of digital technologies at marshalling yards [Perspektivy ispolzovaniya tsifrovyykh tekhnologii na sortirovochnykh stantsiyakh]. *Proceedings of the seventh scientific and technical conference «Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2018, Moscow)»*. Moscow, Publishing house of OJSC NIIAS, 2018, pp. 153–154. ●





# Инновационная экосистема железнодорожного транспорта: практика ведущих компаний



Максим ЖЕЛЕЗНОВ



Олег КАРАСЁВ



Алексей БЕЛОШИЦКИЙ



Егор ШИТОВ

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

**Карасёв Олег Игоревич** — Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия.

**Белошицкий Алексей Валерьевич** — Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия.

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

Железнодорожная отрасль является одной из ключевых сфер транспортной деятельности для многих стран мира, в частности для Российской Федерации. Инновационное развитие данной отрасли и компаний, входящих в неё, является важным аспектом развития экономики и инфраструктуры соответствующих стран.

Инновационная экосистема создаёт необходимую для такого развития благоприятную среду.

Целью данной статьи является анализ компонентов инновационной экосистемы – способов организации инновационной деятельности, предполагающих их классификацию на внутренние и внешние типы организации. Исследование проводится на основе сравнительного анализа практики наиболее конкурентоспособных мировых железнодорожных компаний.

Результаты позволяют сделать вывод, что большим уровнем конкурентоспособности и технологического развития характеризуются железнодорожные компании, применяющие инструменты как внешнего, так и внутреннего типов. Если внешний тип организации инновационной деятельности оказывает положительное влияние на снижение издержек, а также способствует активному взаимодействию с внешними про-

фильными компаниями, то односторонняя ориентация на него ведёт к росту зависимости от сторонних организаций. Осуществление исследований и разработок в рамках собственных инновационных лабораторий и R&D центров позволяет железнодорожным компаниям существенно снизить подобную зависимость, однако приводит к высокому уровню издержек, повышает риски получения результатов, не соответствующих лучшему мировому уровню. Оптимальным и эффективным способом организации инновационной деятельности железнодорожной компании является смешанный тип, включающий элементы самостоятельного проведения исследований и разработок и активного взаимодействия с внешними организациями, компаниями и специалистами, что подтверждается деятельностью большинства анализируемых компаний. При этом важен выбор направлений технологического развития, в рамках которых возможно и целесообразно проведение самостоятельных исследований и разработок в настоящее время, а также тех, формирование компетенций по которым для самостоятельной деятельности или участия в инновационных консорциумах возможно в перспективе.

**Ключевые слова:** инновационная экосистема, железнодорожная отрасль, исследования и разработки, инновационно-ориентированное мероприятие хакатон, стартап, бизнес-инкубатор, бизнес-акселератор, венчурный фонд, стимулирование инноваций.

\*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.

**Карасёв 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.

**Белошицкий Алексей Валерьевич** – магистр по направлению «Экономика», заместитель директора Центра хранения и анализа больших данных Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия, alex.v.beloshitskiy@gmail.com.

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

Статья поступила в редакцию 01.07.2019, принята к публикации 29.08.2019.

For the English text of the article please see p. 252.



**С**овременный этап развития мировой экономики определяется становлением парадигмы шестого технологического уклада и укоренением принципов индустрии 4.0 [1]. Магистральным направлением развития в указанных условиях является массовая цифровизация всех отраслей экономики и социальной сферы.

Локомотивами осуществления прорывного научно-технологического и социально-экономического развития, в частности внедрения передовых технологий, могут стать отрасли с необходимым масштабом производства [2].

Одной из отраслей, обладающих необходимым научно-техническим заделом, масштабом и потенциальным синергетическим эффектом, распространяемым на смежные отрасли, является железнодорожная [3].

В этой связи целью данной статьи является анализ компонентов инновационной экосистемы — способов организации инновационной деятельности, предполагающих их классификацию на внутренние и внешние типы организации применительно к железнодорожному транспорту. Исследование проводится на основе сравнительного анализа практики наиболее конкурентоспособных мировых железнодорожных компаний.

## **ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ И ЦИФРОВИЗАЦИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Задачи инновационного развития в условиях четвёртой промышленной революции и обусловленной ею парадигмы цифровизации являются актуальными для большинства стран мира.

В Российской Федерации реализация мероприятий, направленных на повышение уровня цифровизации экономики и социальной сферы Российской Федерации, осуществляется в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 07 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». Для достижения указанных целей были разработаны национальные проекты (программы), включая национальную программу «Цифровая экономика Российской Федерации» (далее — Национальная програм-

ма). Цели Национальной программы направлены на всеобъемлющую цифровизацию приоритетных отраслей экономики и социальной сферы Российской Федерации [4]. Осуществление прорывного научно-технологического и социально-экономического развития планируется обеспечить, в том числе посредством реализации приоритетных проектов с применением «сквозных» цифровых технологий, к числу которых относятся: большие данные, квантовые технологии, компоненты робототехники и сенсорики, нейротехнологии и искусственный интеллект, новые производственные технологии, промышленный интернет, системы распределённого реестра, технологии беспроводной связи, технологии виртуальной и дополненной реальности. Выполнение задач по осуществлению прорывного развития и массовой цифровизации, в том числе путём реализации проектов на основе применения «сквозных» цифровых технологий предполагает также необходимость модернизации инновационной экосистемы как на макро-, так и на микроуровне.

Паспорт Национальной программы включает в себя ряд мероприятий, ориентированных на улучшение инновационной экосистемы ведущих отечественных государственных корпораций и компаний с государственным участием, особенно в части развития цифровой повестки, включая:

- разработку и утверждение стратегий цифровой трансформации;
- назначение заместителей должностных лиц в государственных корпорациях и компаниях с государственным участием, реализующих стратегии цифровой трансформации, наделённых полномочиями и обеспеченных ресурсами для реализации соответствующих инициатив и проектов — назначение Chief Digital Officers;
- формирование комплексной системы финансирования проектов на основе применения «сквозных» цифровых технологий и платформенных решений при активном участии государственных корпораций и компаний с государственным участием.

Один из разделов стратегии цифровых трансформаций посвящён вопросам развития системы управления инновациями и инновационной инфраструктуры, взаи-





**Рис. 1. Место и роль международных ассоциаций в инновационной экосистеме железнодорожной отрасли.**

модействию компаний со сторонними организациями.

Критичность развития данного направления применительно к железнодорожному транспорту подтверждается приоритетом научно-технологического развития Российской Федерации — «Связанность территории Российской Федерации за счёт создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики» [5].

Потенциал и критичность железнодорожной отрасли как одного из локомотивов научно-технологического развития Российской Федерации подтверждается исторически: начало развития мобильной связи в России характеризуется её первоначальным внедрением и модернизацией на железных дорогах. 30 мая 2019 г. ОАО

«РЖД» было выбрано в качестве лидера разработок в области, связанной с развитием квантовой связи [6].

### МИРОВЫЕ ПРАКТИКИ ОРГАНИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ИННОВАЦИОННЫХ ЭКОСИСТЕМ: МЕЖДУНАРОДНЫЕ АССОЦИАЦИИ

Существует множество примеров лучших мировых практик организации инновационной деятельности и реструктурирования инновационной экосистемы [7, 8].

Применительно к деятельности железных дорог всё большее влияние приобретают международные ассоциации, занимающие отдельное положение в инновационной экосистеме (см. рис. 1).

Значимая роль подобных организаций, представляющих собой аналог сетевых международных альянсов, заключается в нескольких ключевых аспектах (которые включают, но не ограничиваются перечисленными):

**Таблица 1**

#### Иновационные программы Shift2Rail

Структурные и функциональные подсистемы	ИП 1	ИП 2	ИП 3	ИП 4	ИП 5
Долгосрочные потребности и социально-экономические исследования	Эффективные и надёжные поезда, включая поезда повышенной вместимости и скоростные поезда	Продвинутые системы управления и контроля пассажирского потока	Эффективная, устойчивая и надёжная инфраструктура с повышенной пропускной способностью	Информационные решения для привлекательности железнодорожных сервисов	Технологии для достижения устойчивости и привлекательности европейских грузоперевозок
Умные материалы и процессы					
Системная интеграция, безопасность и совместимость					
Энергетика и устойчивое развитие					
Человеческий капитал					

- объединение ключевых компетенций, умений, ресурсов, технологий и опыта различных участников в целях получения синергии;

- обсуждение критических вопросов, проблем и инициатив, затрагивающих интересы большого круга стейкхолдеров, включая коммерческие компании и государственные органы власти;

- определение приоритетных векторов долгосрочного развития отрасли, включая направления научно-технологического развития, и взаимодействия со смежными секторами экономики [9].

Международные ассоциации выступают в роли визионеров, формируя магистральное видение развития отрасли для большинства ключевых её участников, в том числе железнодорожных операторов, владельцев инфраструктурных объектов, производителей железнодорожной и вспомогательной техники и оборудования. Обладая доступом к международной межотраслевой экспертизе, международные ассоциации представляют собой одновременно квалифицированных заказчиков и ответственных исполнителей глобальных исследований, посвящённых определению трендов и тенденций.

Среди наиболее характерных примеров можно отметить:

- форсайт-исследование Международного союза железных дорог (далее – МСЖД) «A Global Vision for Railway Development»;

- форсайт-исследование ERRAC «Rail 2050 Vision».

*Форсайт-исследование МСЖД «A Global Vision for Railway Development»* содержит долгосрочное видение развития железнодорожной отрасли, а также определяет ряд ключевых движущих сил, необходимых для его скорейшего достижения [10], включая:

- согласованное управление знаниями, учитывающее технические требования к результатам исследований и разработок, а также потенциальные риски, стоимость и открывающиеся возможности;

- обеспечение открытого доступа к отраслевым экспертным знаниям;

- активную международную кооперацию посредством формирования устойчивых партнёрств с участием малого и научно-исследовательского секторов;

- развитие межотраслевой кооперации.

По заявлению бывшего генерального директора МСЖД Жан-Пьера Лубину, подведомственная ему организация заинтересована в содействии кооперации её участников из различных регионов и совместном поиске ответов на ключевые вызовы железнодорожной отрасли. В частности, для подобных целей на базе МСЖД функционирует международный железнодорожный исследовательский совет, представляющий собой платформу взаимодействия и обмена результатами исследований и инноваций в сфере железнодорожного транспорта.

В целях развития международной кооперации, поддержки и координации научно-исследовательской и инновационной деятельности в области развития железнодорожных перевозок в 2014 г. была сформирована Shift2Rail, представляющая собой первую *европейскую* инициативу в железнодорожной отрасли, направленную на ведение исследований, поиск инноваций и рыночных решений.

Shift2Rail является ярким примером института (ассоциации), объединяющего заинтересованные стороны и занимающегося акселерацией разработок и внедрением инноваций в железнодорожной отрасли. Настоящая инициатива образована на срок до 2024 г. с общим объёмом финансирования более 900 млн евро.

Научно-исследовательская деятельность Shift2Rail сконцентрирована в рамках пяти приоритетных направлений – инновационных программ (далее – ИП) [11], охватывающих все ключевые структурные и функциональные подсистемы железнодорожной отрасли (таблица 1).

Реализация представленных пяти ИП подразумевает использование как бюджетных, так и внебюджетных источников финансирования, включая собственные средства компаний, входящих в состав Shift2Rail. Одной из ключевых обязанностей участников данной европейской инициативы является самостоятельное проведение исследований и разработок в областях, аналогичных ИП. Таким образом Shift2Rail оказывает непосредственное влияние на инновационную систему и развитие железнодорожной отрасли в целом.



Как подчёркнуто выше, международные ассоциации играют значимую роль в инновационной экосистеме железнодорожной отрасли, выступая в роли визионеров и координаторов инновационной деятельности, реализуемой ключевыми заинтересованными представителями отрасли.

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: ПРАКТИКА ВЕДУЩИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОМПАНИЙ**

Железнодорожные компании часто представляют собой многопрофильные холдинговые структуры, основным видом деятельности которых являются различные направления: грузовые перевозки, пассажирские перевозки, обслуживание инфраструктурных объектов, предоставление локомотивной тяги и т.д. Подобная специфика обуславливает широкое распространение в организационной структуре компаний развитых научно-технических блоков, включающих в себя как кластеры в составе научно-исследовательских центров, институтов и лабораторий, так и с участием специализированных аффилированных и партнёрских вузов.

В зону ответственности указанных институтов в области организации инновационной политики железнодорожных компаний входят (включая, но не ограничиваясь перечисленным):

- подготовка и переподготовка высококвалифицированных кадров в соответствии с приоритетами и задачами научно-технологического и инновационного развития;
- проведение аналитических и стратегических исследований в целях определения узких зон и приоритетов развития компании в кратко-, средне- и долгосрочном временном периоде;
- организация и осуществление исследований и разработок в соответствии с системой сквозных научно-технологических и стратегических приоритетов;
- осуществление внешнего и внутреннего (между структурными подразделениями, дочерними и зависимыми компаниями, филиалами головной компании) технологического трансфера;
- взаимодействие с участниками внешней инновационной среды в целях повыше-

ния уровня конкурентоспособности и научно-технологического развития.

Описанные выше способы организации являются компонентами инновационной экосистемы железнодорожных компаний. Данные способы организации также условно делятся на два типа:

- внутренний тип организации инновационной деятельности отличается наличием структурной единицы, централизованно занимающейся проведением исследований и разработок; самостоятельным развитием и коммерциализацией инновационных решений; отсутствием взаимодействия с внешними организациями;
- внешний тип организации инновационной деятельности отличается отсутствием структурной единицы, централизованно занимающейся проведением исследований и разработок; приобретением готовых решений и услуг; широкими партнёрскими связями; взаимодействием с технологическими центрами, инкубаторами и стартапами.

В условиях массовой цифровизации всех отраслей экономики и социальной сферы, когда технологический и инновационный циклы подвергаются значительному сокращению по времени реализации, одним из общемировых трендов является активизация сотрудничества компаний с участниками внешней инновационной среды по принципу «открытых инноваций», в том числе с представителями малого и среднего предпринимательства (далее — МСП). Данный принцип подразумевает кооперацию с третьими лицами (например, университетами, конкурентами или клиентами), что открывает доступ к комплементарным знаниям, рынкам и сетям [12].

В практике ведущих зарубежных железнодорожных компаний (см. табл. 2) в области организации исследований и разработок наибольшее распространение получили следующие инструменты:

- 1) организация деятельности самостоятельных инновационных лабораторий и/или центров исследований и разработок;
- 2) организация и проведение инновационно-ориентированных мероприятий, включая хакатоны;
- 3) взаимодействие со стартапами и МСП, в рамках функционирования:
  - корпоративных или партнёрских бизнес-акселераторов и бизнес-инкубаторов;



**Практика организации инновационной деятельности ведущими зарубежными  
железнодорожными компаниями**

	РЖД	CR (Китай)	DB (Германия)	FSI (Италия)	IR (Индия)	JR (Япония)	Korail (Юж. Корея)	NR (Англия)	BB (Австрия)	SBB (Швейцария)	SNCF (Франция)
Инновационный (R&D) центр	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Бизнес-акселератор	—	*	✓	—	*	✓	*	*	✓	*	✓
Бизнес-инкубатор для стартапов	—	*	✓	✓	✓	*	*	*	*	*	✓
Корпоративный венчурный фонд	—	—	✓	*	*	—	*	—	*	✓	✓
Хакатоны	—	—	✓	✓	*	✓	—	✓	✓	✓	✓

«✓» — соответствующий инструмент используется в компании;

«\*» — присутствуют косвенные признаки применения соответствующего инструмента в компании;

«—» — соответствующий инструмент не применяется в компании.

• корпоративных и мультикорпоративных венчурных фондов.

Проведение инновационно-направленных мероприятий, взаимодействие с внешними партнёрами, включая стартапы, бизнес-инкубаторы и бизнес-акселераторы, обеспечивает доступ к передовым разработкам и технологиям, лежащим за пределами внутреннего контура компании и специфики отрасли [12].

В таблице 2 представлено распределение выделенных инструментов организации исследований и разработок в ведущих зарубежных железнодорожных компаниях. В рамках анализа исследовались компании со схожей с функционированием российской компании ОАО «РЖД» бизнес-моделью.

Отметим, что ОАО «РЖД» развивает многие не присущие зарубежной практике формы поддержки инновационной деятельности, в том числе в отношении студентов транспортных вузов, продуктивное сотрудничество с РАН. Так, ярким примером инициативы ОАО «РЖД» по поддержке инновационной деятельности как внутри, так и вне корпорации является «Единое окно инноваций». Данная система, работающая по принципу «одного окна» и реализованная в виде специализированного интернет-портала обеспечивает приём инновационных предложений и их последующее рассмотре-

ние специалистами ОАО «РЖД». Предложения по инновационным решениям могут поступать как от физических, так и от юридических лиц различных организационно-правовых форм<sup>1</sup>.

Основными видами деятельности рассмотренных зарубежных компаний являются:

- пассажирские и грузовые железнодорожные перевозки;
- предоставление логистических услуг;
- предоставление доступа к железнодорожным инфраструктурным объектам.

В практике всех представленных в таблице 2 железнодорожных компаний активно реализуются мероприятия, направленные на развитие критического мышления сотрудников, внедрение принципов проектного управления (включая принципы бережливого производства) и систем управления знаниями. Указанные инициативы способствуют, в том числе, развитию внутрикорпоративного предпринимательства: реализации инновационных проектов сотрудниками компании отдельно от основной занятости [13].

Для грамотного управления инновациями необходимо, чтобы персонал осознавал их востребованность, а также чтобы все участники данного процесса обладали профессиональными компетенциями [14].

Наибольшая инновационная активность и применение широкого спектра различных инструментов были выделены в следующих компаниях:

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]: <https://innovation.rzd.ru/front/>.



- Deutsche Bahn (DB): Германия;
- SNCF: Франция;
- JR Group (JR): Япония;
- SBB-CFF-FFS (SBB): Швейцария;
- FS Italiane (FSI): Италия.

Важной особенностью представленных ведущих железнодорожных компаний является применение смешанного типа организации инновационной деятельности. В международной практике также имеются компании, в организационной структуре которых отсутствуют внутренние подразделения, ответственные за управление, координацию и осуществление исследований и разработок, например: Amtrak (США), NSB (Норвегия).

В свою очередь, все указанные в таблице 2 железнодорожные компании активно применяют стратегию выстраивания взаимовыгодных долгосрочных партнёрских отношений и организации совместных предприятий, включая организацию совместных центров исследований и разработок: например, в Китае это совместный инновационный центр China Railway и телекоммуникационной компании Huawei.

SNCF является участником взаимовыгодных партнёрских соглашений более чем с 30 индустриальными компаниями, научно-исследовательскими институтами и международными лабораториями в различных секторах экономики. В рамках данных соглашений SNCF придерживается концепции открытых инноваций, способствующей общему развитию железнодорожной отрасли.

Железнодорожная компания SBB-CFF-FFS является интегратором различных инновационных решений в Швейцарии и уделяет существенное внимание развитию практики выстраивания взаимовыгодных и долгосрочных партнёрских соглашений с научно-исследовательскими институтами и университетами.

## ВЫВОДЫ

Анализируя достоинства и недостатки внешнего и смешанного типов организации инновационной деятельности следует отметить, что большим уровнем конкурентоспособности и технологического развития характеризуются железнодорожные компании, применяющие инструменты как внешнего, так и внутреннего типов.

Внешний тип организации инновационной деятельности оказывает положительное

влияние на снижение издержек, требуемых для организации и поддержания собственной инфраструктуры и подразделений, ответственных за проведение исследований и разработок, а также способствует лучшему пониманию технологических и рыночных трендов и тенденций вследствие активного взаимодействия с внешними профильными организациями и компаниями. Однако придерживаясь в рамках осуществления инновационной деятельности исключительно внешнего типа, железнодорожные компании в значительной степени зависят от сторонних организаций по большинству аспектов своей деятельности.

Реализация решений, соответствующих внутреннему типу организации инновационной деятельности, то есть, осуществление исследований и разработок в рамках собственных инновационных лабораторий и R&D центров, позволяет железнодорожным компаниям существенно снижать подобную зависимость. Недостатком внутреннего типа является высокий уровень издержек, требуемых для проведения исследований и разработок, подготовки высококвалифицированных кадров, а также их обеспечения необходимым оборудованием и ресурсами. Проведение исключительно собственных исследований и разработок сопровождается риском получения результатов, не соответствующих лучшему мировому уровню.

Оптимальным и эффективным способом организации инновационной деятельности железнодорожной компании является смешанный тип, включающий в себя как элементы самостоятельного проведения исследований и разработок, так и активного взаимодействия с внешними организациями, компаниями и специалистами. Это подтверждается тем, что большинство анализируемых компаний придерживается данного типа организации инновационной деятельности, самостоятельно осуществляя исследования и разработки в рамках собственных R&D центров и/или инновационных лабораторий, а также активно сотрудничая с третьими компаниями и стартапами.

Определение направлений технологического развития, в рамках которых возможно и целесообразно проведение самостоятельных исследований и разработок

в целях получения результатов, соответствующих высокому уровню конкурентоспособности, осуществляется ведущими зарубежными железнодорожными компаниями в соответствии с текущими знаниями, компетенциями и технологиями, которыми они обладают и которые необходимы для достижения подобных результатов. Развитие направлений технологического развития, по которым железнодорожная компания не обладает достаточным опытом и знаниями, осуществляется в рамках внешнего типа организации инновационной деятельности, в частности, в рамках политики чистого потребления технологических и продуктовых решений в виде готовых технологий (услуг).

В дальнейшем, при условии повышения квалификации сотрудников компании и дочерних организаций и приобретения соответствующих знаний и компетенций, развитие подобных технологий и решений, включая решения следующего поколения, может осуществляться компанией самостоятельно или в рамках консорциума.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / Научный совет по программе фундамент. исслед. президиума Российской академии наук «Экономика и социология знания». — М.: ИСПИ РАН, 2012. — 359 с.
2. Алябьев С. и др. Инновации в России — неисчерпаемый источник роста // Центр по развитию инноваций McKinsey Innovation Practice. — 2018. — 112 с.
3. Железнов М. М. О концепции информационно-технологического совершенствования системы ведения путевого хозяйства на основе инновационных технологий, в том числе спутниковых // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». — 2012. — № 5. — С. 1–7.
4. Паспорт Национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (утверждён президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24 декабря 2018 г. № 16).

5. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642).

6. Совещание по вопросам развития технологий в области искусственного интеллекта // Президент России: официальный сайт. [Электронный ресурс]: <http://kremlin.ru/events/president/news/60630>. Доступ 25.06.2019.

7. Железнов М. М. Концепция мониторинга и содержания инфраструктуры транспортных железнодорожных коридоров стран СНГ «пространства 1520» на основе спутниковых и геоинформационных технологий // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». — 2011. — № 2. — С. 34–37.

8. Розенберг И. Н., Железнов М. М. Перспективы развития технологий мониторинга и содержания инфраструктуры транспортных железнодорожных коридоров стран СНГ «Пространства 1520» на основе спутниковых и геоинформационных технологий // Вестник транспорта Поволжья. — 2012. — № 6. — С. 36–39.

9. Железнов М. М. О приоритетных направлениях научных исследований ОАО «ВНИИЖТ» // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». — 2013. — № 6. — С. 28–33.

10. Глобальное видение развития железнодорожного транспорта. Форсайт-исследование Международного совета по железнодорожным исследованиям // UIC Communication Department. — 2015. — 44 с.

11. Программа исследований и разработок // Shift2Rail: официальный сайт. [Электронный ресурс]: <https://shift2rail.org/research-development/>. Доступ 27.06.2019.

12. Гроссфельд Т., Роландт Т. Д. А. Логика открытых инноваций: создание стоимости путём объединения сетей и знаний // Форсайт. — 2008. — Т. 2. — № 1. — pp. 24–29. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16390108>/ Доступ 29.08.2019.

13. Железнов М. М. Основные этапы развития научного знания и высоких технологий в путевом комплексе. Инновационный трансферт в инфраструктуру железнодорожного транспорта // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта: сб. тр. членов и научных партнёров Объединённого учёного совета ОАО «РЖД» / Под ред. Б. М. Лапидуса. — М.: Интекст, 2013. — С. 176–184.

14. Федюкович Е. В. Корпоративное предпринимательство: экономические и организационные аспекты // Российское предпринимательство. — 2016. — Т. 17. — № 8. — С. 951–966.

15. Терехова Т. А. Компетентностный подход в управлении инновационными изменениями // Психология в экономике и управлении. — 2010. — № 1. — С. 31–37. ●

**Авторы выражают признательность коллегам, принимавшим участие в исследованиях, результаты которых были использованы при подготовке данной статьи: Тростьянскому Сергею Сергеевичу, магистру по направлению «Экономика», заместителю директора Центра хранения и анализа больших данных МГУ имени М. В. Ломоносова; Ракову Дмитрию Александровичу, магистру по направлению «Менеджмент», 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.**





# Innovative Railway Transport Ecosystem: Practices of Leading Companies



Maxim M. ZHELEZNOV



Oleg I. KARASYOV



Alexey V. BELOSHITSKY



Egor A. SHITOV

*Zheleznov, Maxim M., Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russia.  
Karasyov, Oleg I., Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.  
Beloshitsky, Alexey V., Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.  
Shitov, Egor A., Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia\*.*

## ABSTRACT

The railway industry is one of the key areas of transport activity for many countries, in particular for the Russian Federation. The innovative development of this industry and of its corporate actors is an important aspect of development of economy and infrastructure of the respective countries.

An innovative ecosystem creates an enabling environment necessary for such development.

The objective of this article is to analyze the components of the innovation ecosystem: the ways of organizing innovative activities, suggesting their classification into internal and external types of organizations. The study is based on a comparative analysis of the practices of the most competitive world railway companies.

The results show that railway companies using tools of both external and internal types are characterized by a high level of competitiveness and technological development. If the external type of organization of innovative activity has a positive effect on reducing

costs, and also promotes active interaction with core external companies, then a one-sided orientation to it leads to an increase in dependence on third-party organizations.

Carrying out research and development within the framework of own innovative laboratories and R&D centers allows railway companies to significantly reduce this dependence, but leads to a high level of costs, increases the risk of obtaining results that do not correspond to the best world standards. The optimal and effective way to organize the innovation activity of a railway company is to implement a mixed type organization, which includes elements of independent research and development and active interaction with external organizations, companies and experts. This choice is confirmed by the activities of most of the analyzed companies. At the same time, it is important to choose the directions of technological development, within which it is possible and expedient to conduct independent research and development at the present time, as well as those requiring further development of competencies for independent research activities as well as for participating in innovative consortia.

**Keywords:** innovation ecosystem, railway industry, research and development, hackathon event, startup, business incubator, business accelerator, venture capital fund, innovation stimulation.

\*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.

**Karasyov, Oleg I.** – Ph.D. (Economics), director of the Center of scientific-technological forecasting of the economic faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, oikarasev@econ.msu.ru.

**Beloshitsky, Alexey V.** – Master in Economics, deputy director of the Center of storage and analysis of big data of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, alex.v.beloshitskiy@gmail.com.

**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 01.07.2019, accepted 29.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 244.



**Background.** The current stage of development of the world economy is determined by the formation of the paradigm of the sixth wave of innovation and the rooting of the principles of the industry 4.0 [1]. The main direction of development in these conditions is the massive digitalization of all sectors of the economy and social sphere.

Industries with the necessary scale of production can become the drivers of breakthrough scientific, technological and socio-economic development, in particular of introduction of advanced technologies [2].

One of the industries with the necessary scientific and technical backlog, scale and potential synergistic effect on related industries is the railway industry [3].

**Objective.** In this regard, the *objective* of this article is to analyze the components of the innovation ecosystem and the ways of organizing innovative activities, to suggest their classification comprising internal and external types of organization with regard to railway transport.

**Methods.** The study is based on a comparative analysis of the practices of the most competitive railway companies.

#### **Results.**

#### **Innovative development and digitalization in the Russian Federation**

The tasks of innovative development under the conditions of the fourth industrial revolution and the digitalization paradigm are relevant for most countries of the world.

In the Russian Federation, measures aimed at increasing the digitalization of the economy and social sphere are carried out in accordance with the Decree of the President of the Russian Federation dated May 07, 2018 No. 204 «On national goals and strategic tasks of development of the Russian Federation for the period until 2024». To achieve these goals, national projects (programs) were developed, including the national program «Digital economy of the Russian Federation» (hereinafter – the National Program). The objectives of the National Program are aimed at comprehensive digitalization of priority sectors of the economy and social sphere of the Russian Federation [4]. The implementation of breakthrough scientific, technological and socio-economic development is planned to be ensured, inter alia, through implementation of priority projects using «end-to-end» digital technologies, which include: big data, quantum technologies, components of

robotics and sensorics, neurotechnologies and artificial intelligence, new manufacturing technologies, industrial Internet, distributed registry systems, wireless technologies, virtual and augmented reality technologies. Fulfillment of the tasks of breakthrough development and mass digitalization, including through implementation of projects based on the use of «end-to-end» digital technologies, also implies the need to modernize the innovation ecosystem at both the macro and micro levels.

The passport of the National Program includes a number of activities aimed at improving the innovation ecosystem of leading domestic state-owned corporations and companies with state participation, especially regarding development of the digital agenda, including:

- development and approval of digital transformation strategies;
- appointment of deputy officials in state corporations and companies with state participation, implementing digital transformation strategies, empowered and provided with resources for implementation of relevant initiatives and projects that is the appointment of Chief Digital Officers;
- development of an integrated project financing system based on the use of «end-to-end» digital technologies and platform solutions with active participation of state corporations and companies with state participation.

One of the sections of digital transformation strategies is devoted to development of innovation management system and innovation infrastructure, interaction of companies with third-party organizations.

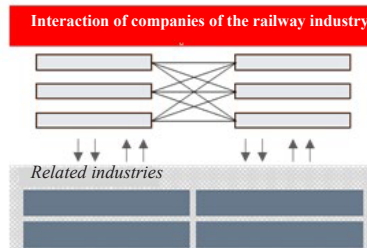
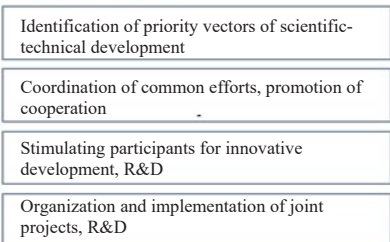
The criticality of development of this direction with respect to railway transport is confirmed by the priority of scientific and technological development of the Russian Federation in terms of «The connectedness of the territory of the Russian Federation through creation of intelligent transport and telecommunication systems, as well as the attaining and keeping leadership positions in creation of international transport and logistics systems, development and use of space and airspace, the oceans, the Arctic and the Antarctic» [5].

The potential and criticality of railway sector as one of the drivers of scientific and technological development in the Russian Federation are confirmed historically: during their early



### Innovation ecosystem of the railway industry

#### International associations (UIC, Shift2Rail, ERRAC, IRRB etc.)



**Pic. 1. The place and role of international associations in the innovation ecosystem of the railway industry.**

developments mobile communications in Russia were initially introduced and then modernized on the railways. On May 30, 2019, JSC Russian Railways was selected as a leader in developments in the field related to development of quantum communications [6].

#### World practices of organizing innovation activity and innovation ecosystems: international associations

There are many examples of world best practices in organizing innovation activity and restructuring an innovation ecosystem [7, 8].

With regard to the activities of railways, international associations, occupying an important position in the innovation ecosystem, are becoming increasingly influential (see Pic. 1).

The significant role of such organizations, analogous to network international alliances, is explained through several key aspects (which include, but are not limited to, the listed):

- combining key competencies, skills, resources, technologies and experience of various participants in order to obtain synergy;
- discussion on critical issues, problems and initiatives affecting the interests of a wide range of stakeholders, including commercial companies and state authorities;
- identification of priority vectors for long-term development of the industry, including areas of scientific and technological development, and interaction with related sectors of the economy [9].

International associations act as visionaries, forming a long-distance vision for development of the industry for most of its key participants, including railway operators, owners of infrastructure facilities, manufacturers of railway and auxiliary machinery and equipment. With access to international interdisciplinary

expertise, international associations are both qualified customers and responsible actors of global research dedicated to identify future trends.

Among the most characteristic examples are:

- foresight study of the International Union of Railways (hereinafter referred to as UIC) «A Global Vision for Railway Development»;
- foresight study ERRAC «Rail 2050 Vision».

*The UIC foresight study* «A Global Vision for Railway Development» contains a long-term vision of development of the railway industry, and also identifies a number of key driving forces necessary for its speedy achievement [10], including:

- coordinated knowledge management, taking into account technical requirements for research and development results, as well as potential risks, costs and opportunities;
- providing open access to industry expertise;
- active international cooperation through formation of sustainable partnerships with participation of small and research sectors;
- development of intersectoral cooperation.

According to the statement of the former UIC Director General, Jean-Pierre Loubinoux, the UIC is interested in facilitating cooperation among its participants from various regions and in joint search for answers to key challenges of the railway industry. In particular, for such purposes, the international railway research board (IRRB) has been created under the auspices of the UIC, being a platform for interaction and exchange of research and innovation results in the field of railway transport.

In order to develop international cooperation, support and coordinate research and innovation in the field of railway development, Shift2Rail initiative was put forward in 2014, which is the first *European* initiative in the railway industry

Table 1

Innovation programs of Shift2Rail

Structural and functional subsystems	IP 1	IP 2	IP 3	IP 4	IP 5
Long term needs and socio-economic studies	Efficient and reliable trains, including high-capacity trains and high-speed trains	Advanced passenger flow management and control systems	Efficient, resilient and reliable infrastructure with increased throughput	Information solutions for attractive rail services	Technologies to achieve sustainability and attractiveness of European cargo transportation
Smart materials and processes					
System integration, security, and compatibility					
Energy and sustainability					
Human capital					

aimed at research, innovation and market solutions.

Shift2Rail is a prime example of an institution (association) that brings together stakeholders and accelerates development and innovation in the railway industry. This initiative was established for a period up to 2024 with a total funding of more than Euro 900 million.

Research activities of Shift2Rail are concentrated in the framework of 5 priority areas – innovative programs (hereinafter referred to as IP) [11], covering all key structural and functional subsystems of the railway industry (Table 1).

The implementation of the presented 5 IP implies the use of both budgetary and extrabudgetary sources of financing, including own funds of the companies involved in Shift2Rail. One of the key responsibilities of the participants in this European initiative is independent conduct of research and development in areas similar to IP. Thus, Shift2Rail has a direct impact on the innovation system and development of the railway industry as a whole.

As emphasized above, international associations play a significant role in the innovation ecosystem of the railway industry, acting as visionaries and coordinators of innovative activities implemented by key industry stakeholders.

**Organization of innovation activity: practices of leading railway companies**

Railway companies are often multidisciplinary holding structures whose main activities refer to various areas: cargo transportation, passenger transportation, maintenance of infrastructure facilities, provision of locomotive traction, etc. Such specifics determine wide presence within

the organizational structure of companies of developed scientific and technical entities that include clusters in research centers, institutes and laboratories, as well as clusters with participation of specialized affiliated and partner universities.

The area of responsibility of these institutions in the field of organization of innovation policy of railway companies includes (including, but not limited to):

- training and retraining of highly qualified personnel in accordance with priorities and objectives of scientific, technological and innovative development;
- conducting analytical and strategic studies in order to identify narrow areas and development priorities of the company in the short, medium and long-term time period;
- organization and implementation of research and development in accordance with the system of end-to-end scientific, technological and strategic priorities;
- implementation of external and internal (between structural divisions, subsidiaries and dependent companies, branches of the parent company) technological transfer;
- interaction with participants in the external innovation environment in order to increase the level of competitiveness and to enhance research and technological development.

The organization methods described above are components of the innovation ecosystem of railway companies. These methods of organization are also conditionally divided into two types:

- *internal type* of organization of innovative activity is characterized by the presence of a structural unit that is comprehensively engaged in research and development; by independent



Table 2

### Practices of organizing innovative activities by leading foreign railway companies

	Russian Railways	CR (China)	DB (Germany)	FSI (Italy)	IR (India)	JR (Japan)	Korail (South Korea)	NR (England)	ÖBB (Austria)	SBB (Switzerland)	SNCF (France)
Innovation (R&D) center	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Business accelerator	—	*	✓	—	*	✓	*	*	✓	*	✓
Startup business incubator	—	*	✓	✓	✓	*	*	*	*	*	✓
Corporate venture fund	—	—	✓	*	*	—	*	—	*	✓	✓
Hackathons	—	—	✓	✓	*	✓	—	✓	✓	✓	✓

«✓» — the corresponding instrument is used in the company;

«\*» — there are indirect signs of using the corresponding instrument in the company;

«—» — the corresponding instrument is not used in the company.

development and commercialization of innovative solutions; by lack of interaction with external organizations;

• *external type* of organization of innovative activity is distinguished by the absence of a structural unit within corporate HQ that is exclusively responsible for research and development; by acquisition of ready-made solutions and services; by wide-range partnerships; by interaction with technology centers, incubators and startups.

In the context of mass digitalization of all sectors of the economy and social sphere, when the technological and innovation cycles are significantly reduced in terms of implementation time, one of the global trends is intensification of cooperation between companies and the actors belonging to the external innovation environment following the principle of «open innovation», including representatives of small and medium-sized enterprises (hereinafter — SME). This principle implies cooperation with third parties (for example, universities, competitors or customers), which opens up access to complementary knowledge, markets and networks [12].

Practices of leading foreign railway companies (see Table 2) in the field of organizing research and development show that the following tools were most widely used:

1) organization of independent innovation laboratories and / or research and development centers;

2) organization and conduct of innovation-oriented activities, including hackathons;

3) interaction with startups and SME, within the framework of functioning of:

• corporate or partner business accelerators and business incubators;

• corporate and multi-corporate venture funds.

Carrying out innovation-oriented events, interaction with external partners, including startups, business incubators and business accelerators, provides access to advanced developments and technologies that lie outside the company's internal control and industry specifics [12].

Table 2 shows the distribution of selected research and development organization tools within leading foreign railway companies. As part of the analysis, we studied companies with a business model similar to the JSC Russian Railways.

It is worth noting that JSC Russian Railways is developing many forms of support of innovative activities that are not typical of other companies' corporate practices, e.g. regarding the students of transport universities, development of close and efficient interaction with Russian academy of sciences. Single innovation «window» (office) of Russian Railways is another eloquent example of the initiative in the field of support of intercorporate and extra corporate innovative activities. This initiative is implemented through dedicated Website that enables reception of innovative proposals and offers and their processing by corporate experts. Suggestions can be sent by individuals as well as by legal entities with different legal status\*.

The main activities of the reviewed companies are:

• passenger and cargo railway transportation;  
• provision of logistics services;  
• provision of access to railway infrastructure facilities.

\* [Electronic resource]: [https:// innovation .rzd .ru/ front/](https://innovation.rzd.ru/front/).



All railway companies presented in Table 2 are actively implementing measures aimed at developing critical thinking of employees, principles of project management (including the principles of lean production) and knowledge management systems. These initiatives contribute, inter alia, to development of internal business: implementation of innovative projects by company employees independently from their main employment [13].

For competent management of innovations, it is necessary to develop employees' awareness about the importance of innovation and professional competencies of all the stakeholders [14].

The greatest innovative activity and the use of a wide range of different tools can be highlighted regarding the following companies:

- Deutsche Bahn (DB): Germany;
- SNCF: France;
- JR Group (JR): Japan;
- SBB-CFF-FFS (SBB): Switzerland;
- FS Italiane (FSI): Italy.

An important feature of leading railway companies is that they implement a mixed type of organization of innovative activity. There are also companies that have no internal units responsible for management, coordination and implementation of research and development, for example: Amtrak (USA), NSB (Norway).

In turn, all the railway companies listed in Table 2 actively apply the strategy of building mutually beneficial long-term partnerships and joint ventures, including organization of joint research and development centers: for example, in China it is a joint innovation center of China Railway and Huawei telecommunications company.

SNCF is a party to mutually beneficial partnerships with more than 30 industrial companies, research institutes and international laboratories in various sectors of the economy. Under these agreements, SNCF adheres to the concept of open innovation, contributing to overall development of the railway industry.

The railway company SBB-CFF-FFS is an integrator of various innovative solutions in Switzerland and pays significant attention to development of the practices of signing mutually beneficial and long-term partnership agreements with research institutes and universities.

**Conclusions.** Analyzing advantages and disadvantages of the external and mixed types of organization of innovative activity, it should be

noted that railway companies using tools of both external and internal types are characterized by a high level of competitiveness and technological development.

The external type of organization of innovation activity has a positive effect on reducing the costs required to organize and maintain its own infrastructure and departments responsible for conducting research and development, and also contributes to a better understanding of technological and market trends thanks to active interaction with external organizations and companies. However, adhering to an exclusively external type in implementation of innovative activities, makes those railway companies largely dependent on outside organizations regarding most aspects of their activities.

The implementation of solutions that correspond to the internal type of organization of innovation activity, that is, implementation of research and development within their own innovation laboratories and R&D centers, allows railway companies to significantly reduce this dependence. The disadvantage of the internal type is high level of costs required for research and development, training of highly qualified personnel, as well as providing them with necessary equipment and resources. Conducting exclusively own research and development is associated with the risk of obtaining results that do not correspond to the best world standards.

The optimal and effective way of organizing the innovation activity of a railway company passes, in our opinion, through implementation of a mixed type, which includes both elements of independent research and development, and active interaction with external organizations, companies and specialists. This is confirmed by the fact that most of the analyzed companies adhere to this type of organization of innovative activity, independently carrying out research and development within their own R&D centers and/or innovative laboratories, as well as actively cooperating with other companies and startups.

The identification of areas of technological development, within the framework of which it is possible and expedient to conduct independent research and development in order to obtain results corresponding to a high level of competitiveness, is carried out by leading foreign railway companies in accordance with current knowledge, competencies and technologies that they possess and which are necessary to achieve such results. The exploration of technological



development areas in which a railway company does not have sufficient experience and knowledge is carried out within the framework of the external type of organization of innovation activity, in particular, within the framework of the policy of net consumption of technological and product solutions in the form of ready-made technologies (services).

In the future, subject to further training of employees of a company and its subsidiaries and acquisition of relevant knowledge and competencies, development of such technology, including next-generation solutions, can be carried out by such a company independently or as part of a consortium.

## REFERENCES

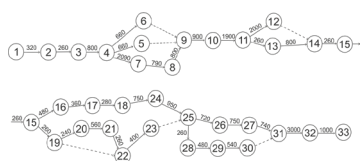
1. Sadovnichy, V. A., Akaev, A. A., Korotaev, A. V., Malkov, S. Yu. Modeling and forecasting of world dynamics [Modelirovanie i prognozirovaniye mirovoi dinamiki]. Scientific council on the fundamental research program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences «Economics and Sociology of Knowledge». Moscow, ISPI RAS publ., 2012, 359 p.
2. Alyabyev, S. [et al]. Innovation in Russia is an inexhaustible source of growth [Innovatsii v Rossii – neisчерpaemiy istochnik rosta]. McKinsey Innovation Practice Center for Innovation Development, 2018, 112 p.
3. Zhelezov, M. M. On the concept of information and technological improvement of the track management system based on innovative technologies, including satellite [O kontseptsii informatsionno-tekhnologicheskogo sovershenstvovaniya sistemy vedeniya putevogo khozyaistva na osnove innovatsionnykh tekhnologii, v tom chisel sputnikovyykh]. Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways, 2012, Iss. 5, pp. 1–7.
4. Passport of the National Program «Digital economy of the Russian Federation» (approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for strategic development and national projects, Minutes dated December 24, 2018 No. 16) [Pasport Natsionalnoi programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiiskoi Federatsii» (utverzhden prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossiiskoi Federatsii po strategicheskomu razvitiyu i natsionalnym proektam, protokol ot 24 dekabrya 2018 g. No. 16)].
5. The strategy of scientific and technological development of the Russian Federation (approved by Decree of the President of the Russian Federation of December 1, 2016 No. 642) [Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii (utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 1 dekabrya 2016 g. No 642)].
6. Meeting on development of technologies in the field of artificial intelligence [Soveshchaniye po voprosam razvitiya tekhnologii v oblasti iskusstvennogo intellekta]. President of Russia: official website. [Electronic resource]: <http://kremlin.ru/events/president/news/60630>. Last accessed 25.06.2019.
7. Zhelezov, M. M. The concept of monitoring and maintaining the infrastructure of the railway transport corridors of CIS countries «1520 space» based on satellite and geographic information technologies [Kontseptsiya monitoringa i soderzhaniya infrastruktury transportnykh zheleznodorozhnykh koridorov stran SNG «Prostranstvo 1520» na osnove sputnikovyykh i geoinformatsionnykh tekhnologii]. Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways, 2011, Iss. 2, pp. 34–37.
8. Rosenberg, I. N., Zhelezov, M. M. Prospects for development of technologies for monitoring and maintaining the infrastructure of the CIS railway transport corridors «Space 1520» based on satellite and geoinformation technologies [Perspektivy razvitiya tekhnologii monitoringa i soderzhaniya infrastruktury transportnykh zheleznodorozhnykh koridorov stran SNG «Prostranstvo 1520» na osnove sputnikovyykh i geoinformatsionnykh tekhnologii]. Vestnik transporta Povolzhya, 2012, Iss. 6, pp. 36–39.
9. Zhelezov, M. M. On the priority areas of scientific research of JSC VNIIZhT [O prioretnykh napravleniyakh nauchnykh issledovaniy OAO VNIIZhT]. Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways, 2013, Iss. 6, pp. 28–33.
10. Global vision for Railway Development. Foresight Study of the International Board for Railway Research [Globalnoe videnie razvitiya zheleznodorozhnogo transporta. Forsait-issledovanie Mezhdunarodnogo soveta po zheleznodorozhnym issledovaniyam]. UIC Communication Department, 2015, 44 p.
11. Research and development program [Programma issledovaniy i razrabotok]. Shift2Rail: official website. [Electronic resource]: <https://shift2rail.org/research-development/>. Last accessed 27.06.2019.
12. Grossfeld, T., Rolandt, T. D. A. The logic of open innovation: creating value by combining networks and knowledge [Logika otkrytykh innovatsii: sozdanie stoimosti putem ob'edineniya setei i znaniy]. Foresight, 2008, Vol. 2, Iss. 1, pp. 24–29. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16390108/> Last accessed 29.08.2019.
13. Zhelezov, M. M. The main stages of development of scientific knowledge and high technology in the track facilities' complex. Innovative transfer to the infrastructure of railway transport [Osnovnye etapy razvitiya nauchnogo znaniya i vysokikh tekhnologii v putevom komplekse. Innovatsionnyy transfer v infrastrukturu zheleznodorozhnogo transporta]. Basic research for long-term development of railway transport: collection of works of members and scientific partners of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. Ed. by B. M. Lapidus. Moscow, Intext publ., 2013, pp. 176–184.
14. Fedyukovich, E. V. Corporate entrepreneurship: economic and organizational aspects [Korporativnoye predprinimatelstvo: ekonomicheskie i organizatsionnye aspekty]. Rossiiskoe predprinimatelstvo, 2016, Vol. 17, Iss. 8, pp. 951–966.
15. Terekhova, T. A. Competence approach to management of innovative changes [Kompetentnostnyy podkhod v upravlenii innovatsionnymi izmeneniyami]. Psikhologiya v ekonomike i upravlenii, 2010, Iss. 1, pp. 31–37.

**The authors are grateful to the colleagues who took part in the research, the results of which were used to prepare the paper: Trostyansky Sergey S., Master in Economics, deputy director of the Center for storage and analysis of big data, Lomonosov Moscow State University; Rakov Dmitry A., Master in Management, leading specialist of the Center for storage and analysis of big data, Lomonosov Moscow State University; Smirnov Roman G., Master in Economics, leading specialist of the Center for storage and analysis of big data, Lomonosov Moscow State University; Smirnova Tatyana V., Ph.D. student at the department of statistics, leading economist at the faculty of economics of Lomonosov Moscow State University; Tereshchenko Igor A., Master in Law, leading specialist of the Center for storage and analysis of big data of Lomonosov Moscow State University; Titova Yulia A., Master in Management, leading specialist of the Center for storage and analysis of big data of Lomonosov Moscow State University.**



## ВЕРТОЛЁТЫ 260

*Безопасность экипажа. Сетевая модель деятельности лётчика в аварийных ситуациях.*



## АВТОМОБИЛИ В ГОРОДЕ 272

*Поведение водителей и риск возникновения ДТП. Анализ заторов на перекрёстках.*



## HELICOPTERS 266

*Crew safety. Network model of pilot actions in emergencies.*



## VEHICLES IN THE CITY 277

*Driver behaviour and road traffic accident risks. Analysis of traffic jams at intersections.*





## Моделирование деятельности лётных экипажей вертолётов в аварийных ситуациях



Анатолий САФОНОВ



Вячеслав ДЖАКСБАЕВ

*Сафонов Анатолий Анатольевич – Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Сызрань, Россия.*

*Джаксбаев Вячеслав Абдулаевич – Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Сызрань, Россия\*.*

При решении вопросов обеспечения безопасности полётов объектами научного исследования выступают авиационные системы различного масштаба. Предметом изучения теории безопасности полётов являются функционирование конкретной авиационной системы «экипаж–воздушное судно» (Э–ВС), выявление и оценка опасных факторов, а также их локализация или устранение.

Защитные свойства авиационной системы «экипаж–ВС» должны обеспечивать противодействие возникновению особых ситуаций. Авиационная практика показывает, что не всегда защитные свойства системы в состоянии предотвратить развитие опасности, и катастрофа становится наиболее вероятным исходом полёта. При возникновении подобных

ситуаций экипаж в интересах снижения тяжести авиационных происшествий (АП) и предотвращения собственной гибели должен применить средства спасения. В статье представлены результаты сетевого моделирования алгоритма деятельности лётчика и определения вероятности своевременного вынужденного покидания вертолёт со спасательным парашютом.

Целью исследования является оценка эффективности защитных свойств системы Э–ВС на вертолётах в интересах снижения тяжести авиационных происшествий. Для проверки гипотезы о возможности применения экипажами вертолёт средств спасения использовались вероятностно-статистические и экспериментально-расчётные методы исследования.

Ключевые слова: транспорт, авиация, вертолёты, аварийная ситуация, средства спасения, парашютная система, вероятность, алгоритм.

\*Информация об авторах:

**Сафонов Анатолий Анатольевич** – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории психологического и педагогического обеспечения обучения лётного состава филиала Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Сызрань, Россия, [safonov.tt@yandex.ru](mailto:safonov.tt@yandex.ru).

**Джаксбаев Вячеслав Абдулаевич** – кандидат технических наук, начальник кафедры аэродинамики и динамики полёта филиала Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Сызрань, Россия, [dzhaksbaev@mail.ru](mailto:dzhaksbaev@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 28.05.2019, принята к публикации 15.08.2019.

For the English text of the article please see p. 266.



С начала XXI века в авиационных стандартах [1, 2], регламентирующих управление безопасностью полётов, активно используется концепция «приемлемого риска» на основе вероятностного подхода. Однако применение вероятностно-статистических методов оценки безопасности функционирования авиационной системы является привилегией специалистов по расследованию аварий и катастроф, что, безусловно, сказывается на процессе обеспечения безопасности систем эксплуатантами авиационной техники. Анализ причин большого числа произошедших в последнее время с вертолётами авиационных событий, в том числе и с гражданскими, показал, что традиционная методика подготовки лётного состава к действиям в особых случаях не в полной мере отвечает современным требованиям. Актуальность исследований обусловлена необходимостью обучения авиационных специалистов методам оценки опасности на предмет вероятности риска безопасности и серьёзности последствий в процессе эксплуатации летательных аппаратов (ЛА).

В работе А. Г. Агроника и Л. И. Эренбурга отмечено, что «...изучение статистических материалов по авариям привело зарубежных специалистов к решению, свидетельствующему, что возможность использования средств аварийного покидания на вертолётах ограничена особенностями его боевого применения на предельно малых высотах и сравнительно больших скоростях, а также сложностями принятия лётчиком решения на покидание» [3, с. 168]. Действительно, в результате активного применения авиации США во Вьетнаме (1964–1975 гг.) было утрачено 5607 вертолётов, общая численность погибших пилотов превысила две тысячи человек [4], что и послужило основой для реализации идей противоударной защиты экипажей вертолётов.

Изучение конструктивных особенностей вертолётов ведущих западных производителей Airbus Helicopters, Boeing, Sikorsky Aircraft Corporation, Leonardo (Augusta Westland), Bell Helicopter показало, что наиболее эффективным средством спасения лётного состава являются системы пассивной защиты, основанные на применении специальных устройств,

поглощающих энергию удара при аварийной посадке. Базовые принципы обеспечения выживаемости экипажей вертолётов изложены в работе Д. Ф. Шанахана (D. F. Shanahan) [5].

Главными причинами гибели экипажей вертолётов при возникновении авиационных происшествий названы: ударная нагрузка (чрезмерное ускорение); непосредственная травма от контакта с твёрдыми поверхностями; воздействие внешних факторов окружающей среды после аварийной посадки (огонь и продукты горения, вода, вредные и токсичные вещества и пр.). Следовательно, эффективные конструкции ЛА должны обладать набором свойств, способным защитить экипаж и пассажиров от воздействия возможных источников травмирования как в процессе аварийной посадки, так и от её негативных последствий [6–9].

На вертолётах UH-60 Black Hawk и AH-64 Apache установлены амортизационные стойки шасси с двухступенчатой амортизацией, которые позволяют снизить воздействие удара до 60 % и обеспечивают выживание экипажей при приземлении со скоростью до 12,8 м/с. В дальнейшем ударная нагрузка гасится за счёт энергопоглощающих устройств кресел и деформации конструкции вертолёта. Элементы крепления силовых агрегатов предотвращают смещение двигателей и главного редуктора во внутреннее пространство фюзеляжа при ударе вертолёта о землю. Топливная система отличается повышенной живучестью. Автоматическая герметизация трубопроводов уменьшает вероятность возникновения пожара. Конструктивные элементы шасси вертолёта удалены от топливных баков и при ударе о землю не проникают внутрь фюзеляжа. В настоящее время активно рассматривается вопрос об оборудовании кабин вертолётов «подушками» безопасности (airbag).

Анализ существующих бортовых систем спасения экипажей отечественных вертолётов свидетельствует, что наряду с оборудованием отдельных типов ЛА системами противоударной защиты [10; 11], спасательные парашютные системы (ПС) по-прежнему остаются в эксплуатации.

Эффективность средств аварийного покидания ЛА определяется целым рядом



случайных величин, расчёты которых выполняются с применением теории вероятности и математической статистики. Установлено, что наиболее полно оценить эффективность применения средств спасения позволяет показатель вероятности спасения лётчика [12], попавшего в аварийную ситуацию, который определяется по формуле:

$$W_{\text{сп}} = W \cdot P_{\text{прим}}, \quad (1)$$

где  $W$  – вероятность спасения лётчика при применении средств спасения;

$P_{\text{прим}}$  – вероятность применения средств спасения в аварийной ситуации.

Вероятность спасения  $W$  можно представить в виде функции:

$$W = \begin{cases} f[v, v_y, H, \gamma, \theta, \omega_x, \omega_y, \omega_z, n_y] \\ f[v_0, t_n, u, p, A], \end{cases} \quad (2)$$

где  $v, v_y, \gamma, H, \theta, n_y$  – функции распределения параметров полёта вертолёт (горизонтальной и вертикальной составляющих), крен, тангаж, высоты полёта;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – угловые скорости вращения во всех проекциях;

$n_y$  – воздействие нормальной перегрузки на ЛА и на лётчика при возникновении аварийной ситуации; функции распределения параметров падения тела лётчика;

$v_0$  – начальная скорость при отделении от вертолёт;

$t_n$  – время нахождения тела лётчика в зоне досягаемости лопастей несущего винта вертолёт (НВ);

$u$  – горизонтальная составляющая скорости падения лётчика;

$p$  – тангенс угла падения;

$A$  – величина отбоя от первоначальной точки отделения от вертолёт.

Критериями вероятности применения ПС служат временные характеристики действий лётчика (оператора) при возникновении аварийных ситуаций:

$$P_{\text{пр}} = f[t_{\text{потр}}, t_{\text{лим}}, t_{\text{оп}}], \quad (3)$$

где  $t_{\text{потр}}, t_{\text{лим}}$  – соответственно, потребное и лимитированное (располагаемое) время для предотвращения катастрофических последствий аварийной ситуации;

$t_{\text{оп}}$  – быстродействие человека-оператора.

Требуемое время на выполнение необходимых действий определяется выражением:

$$t_{\text{потр}} = t_{\text{об}} + t_{\text{оц}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{пок}}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{об}}$  – время обнаружения восприятия и декодирования информации;

$t_{\text{оц}}$  – время оценки и переработки информации;

$t_{\text{пр}}$  – формирование концептуальной модели деятельности и принятие решения;

$t_{\text{пок}}$  – время на практическую реализацию принятого решения.

Определение располагаемого времени, необходимого для реализации действий, направленных на применение ПС, зависит от большого количества факторов в каждой конкретной аварийной ситуации. Многолетние наблюдения позволили сделать вывод, что к катастрофическим последствиям на вертолётках приводят: отказы трансмиссии (главного, промежуточного и хвостового редукторов); повреждения несущего и рулевого винтов; отказ основной и дублирующей гидросистем; разрушение элементов системы управления. Развитие особых ситуаций происходит коротко и требует незамедлительного применения парашютных систем для спасения экипажей при наличии высоты, обеспечивающей применение ПС.

Для разработки модели деятельности члена экипажа вертолёт при возникновении аварийной ситуации и применении ПС воспользуемся сетевым методом [13; 14].

Спрогнозировать и определить вероятность своевременного выполнения действий по вынужденному покиданию вертолёт при наличии заданного норматива  $t_{\text{лим}}$ , можно с помощью выражения:

$$q(t) = P\{\tau_{\text{оп}} \leq t\} = \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где  $t = t_{\text{лим}}$  – нормативно определённое располагаемое время выполнения действий.

Деятельность лётчика подразделяется на элементарные операции [15; 16]. При выполнении сетевого моделирования они называются работами, а моменты их завершения – событиями. Каждая операция характеризуется математическим ожиданием и дисперсией продолжительности работы. При условии независимости отдельных операций, величина быстродействия  $\sigma_{\text{оп}}$  характеризуется параметрами, подчинёнными нормальному закону распределения:

$$\bar{\tau}_{\text{оп}} = \sum_j \bar{\tau}_{ij}; \quad \sigma_{\tau} = \sqrt{\sum_j \sigma_{ij}^2}, \quad (6)$$

Таблица 1

**Временные характеристики деятельности командира экипажа вертолѣта Ми-8 в особой ситуации (разрушение привода РВ)**

Код операции	Содержание операции (работы)	$\bar{\tau}_j$ , мс	$\sigma_j$ , мс
1–2	Восприятие вестибулярного сигнала (стимула) от эволюций вертолѣта	320	30
2–3	Перенос взгляда на внекабинное пространство	260	30
3–4	Оценка пространственного положения и принятие решения на устранение отклонений вертолѣта	800	120
4–5	Перемещение рычага шаг-газ вниз	660	50
4–6	Отклонение ручки управления влево и на себя	660	70
4–7	Считывание и восприятие показаний приборов	2090	150
7–8	Поиск, обнаружение и восприятие светосигнального табло «ОТКАЗ»	790	50
8–9	Оценка информации и выделение совокупности информативных признаков	800	280
9–10	Актуализация из памяти сигнала о сложившейся ситуации	900	390
10–11	Формирование концептуальной модели деятельности и принятие решения на покидание вертолѣта	1900	650
11–12	Подача команды на вынужденное покидание (4–5 слов)	2000	1200
11–13	Перенос взгляда на внекабинное пространство	260	30
13–14	Оценка пространственного положения вертолѣта	800	70
14–15	Перенос взгляда на рукоятку сброса левого блистера	260	30
15–16	Левую руку перенести с РШГ на рукоятку сброса блистера	480	50
16–17	Левой рукой выдернуть рукоятку аварийного сброса блистера	360	50
17–18	Левой рукой опереться в нижний левый угол проѣма	280	30
15–19	Перенос взгляда на замок привязных ремней	260	30
19–20	Правую руку перенести с РВ на замок привязных ремней	240	30
20–21	Правой рукой расстегнуть замок привязных ремней	560	70
21–22	Перенос взгляда на полумягкую петлю	260	30
22–23	Правой рукой взяться за полумягкую петлю в верхнем проѣме блистера	400	30
18–24	Правую ногу вынести в проход между сиденьями	750	100
24–25	Приподняться, вывести парашют из чашки сиденья	950	300
25–26	Развернуться влево лицом к проѣму, поворот корпуса на 90°	720	70
26–27	Поставить левую ногу на чашку сиденья	750	250
25–28	Перенос взгляда на указатель истинной высоты полѣта	260	30
28–29	Считывание показателей радиовысотомера	480	70
29–30	Контроль покидания членами экипажа	540	150
27–31	Толчком обеих ног с одновременным движением рук к себе отделиться от вертолѣта	740	200
31–32	Выдергивание вытяжного кольца	3000	500
32–33	Раскрытие парашюта	1000	100



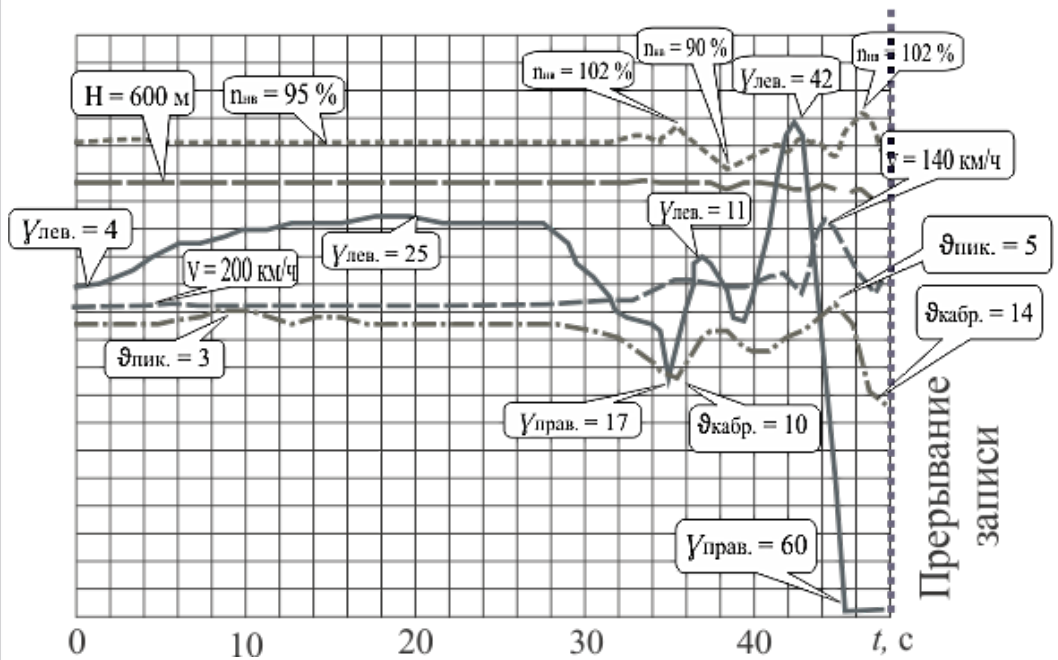


Рис. 1. Фрагмент САРП программы авиационного происшествия вертолѐта Ми-8 (разрушение привода рулевого винта).

где  $\bar{\tau}_{оп}$  и  $\sigma_{\tau}$  — соответственно математическое ожидание и дисперсии продолжительности операций.

Общее время выполнения задачи по вынужденному покиданию вертолѐта равно сумме продолжительности операций или критическому пути (алгоритму) сетевой модели  $L_i$ :

$$\tau_{оп} = \max L_i. \quad (7)$$

Для проведения моделирования выбрана деятельность командира экипажа вертолѐта Ми-8 при возникновении особой ситуации в полѐте, связанной с разрушением привода рулевого винта (РВ). Приняты допущения, что полѐтное задание выполняется по правилам визуального полѐта (ПВП) на высоте не менее 500 м. Выполняемые лѐтчиком операции — без-

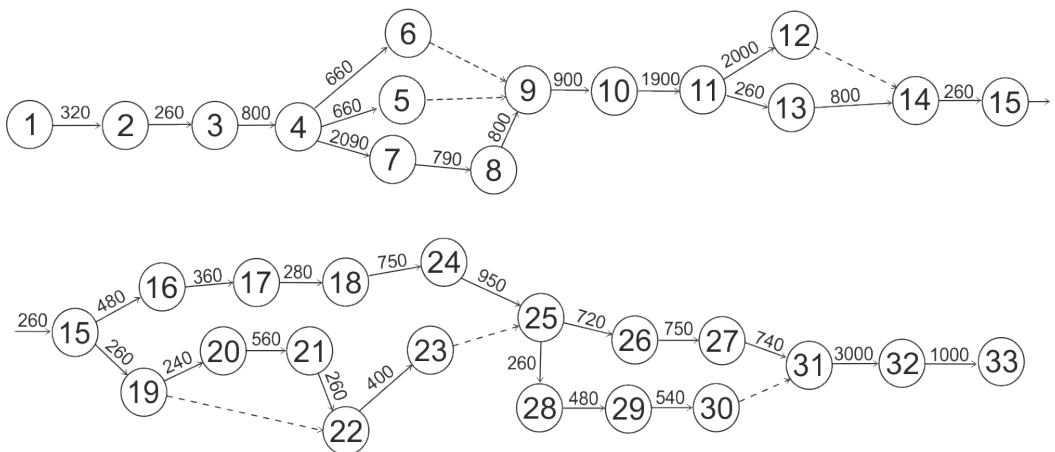


Рис. 2. Сетевая модель деятельности командира экипажа при разрушении привода рулевого винта и вынужденном покидании вертолѐта Ми-8.



ошибочные. Последовательность операций и их временные характеристики представлены в таблице 1.

Первоначальными признаками, характеризующими разрушение в полёте РВ, являются эволюции вертолёт в пространстве. ЛА резко разворачивается влево, изменения углов крена и тангажа достигают предельных значений за короткое время (рис. 1).

Первоначальной реакцией лётчика, находящегося в контуре управления, как правило, является интуитивное желание восстановить пространственное положение вертолёт, воздействуя на органы управления (операции 4–5, 4–6). Разработанная сетевая модель (рис. 2) учитывает последовательно-параллельный характер выполнения отдельных сенсорно-моторных, моторных и логических операций.

Операции (25–28, 28–29) необходимы для определения истинной высоты покидания вертолёт и выдерживания времени в свободном падении до раскрытия ПС. Критический путь для модели 1–2, 2–3, 3–4, 4–7, 7–8, 8–9, 9–10, 10–11, 11–13, 13–14, 14–15, 15–19, 19–20, 21–22, 22–23, 18–24, 24–25, 25–26, 26–27, 27–31.

Движение тела после отделения вертолёт (31–32) и раскрытие парашюта (32–33) не учитываются в продолжительности деятельности лётчика.

Вероятность применения ПС определяется выражением:

$$P_{\text{пр}} = P\{\tau_{\text{оп}} \leq t_{\text{лим}}\} = \int_0^{t_{\text{лим}}} f(\tau) d\tau = \Phi_0\left(\frac{\bar{\tau}_{\text{оп}}}{\sigma_{\tau}}\right) + \Phi_0\left(\frac{t_{\text{лим}} - \bar{\tau}_{\text{оп}}}{\sigma_{\tau}}\right), \quad (8)$$

где  $t_{\text{лим}}$  — нормативное время выполнения алгоритма действий. Использовались нормативы тренажёрной подготовки по оценке действий лётчика в особых ситуациях в полёте.

Вероятность своевременного покидания вертолёт при установленном лимите  $t_{\text{лим}} = 15$  с составит  $P_{\text{св}} = 52\%$ , при увеличении лимита времени до 20 с, соответственно и вероятность применения ПС возрастет до 96 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования и созданная на их основе сетевая модель деятельности

лётчика при возникновении аварийной ситуации позволяют более точно определить способы спасения лётных экипажей вертолёт в целях снижения степени тяжести авиационных происшествий. На этой основе можно развивать рациональные методические приёмы контраварийной подготовки лётного состава.

Для обоснования вероятности спасения лётных экипажей потребуется универсальная математическая модель, учитывающая динамику всех задействованных объектов (вертолёт, лётчика, ПС) в аварийных ситуациях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полётов. ИКАО, 2013. — 44 с.
2. Руководство по управлению безопасностью полётов (РУБП). Дос. 9859. ИКАО, 3-е изд., 2013. — 300 с.
3. Агроник А. Г., Эренбург Л. И. Развитие авиационных средств спасения. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.
4. Helicopter Losses During the Vietnam War. Updated 31 December 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.vhpa.org/heliloss.pdf>. Доступ 01.03.2019.
5. Shanahan D. F. Basic Principles of Helicopter Crashworthiness. USAARL Report No. 93–15. United States Army Aeromedical Research Laboratory Fort Rucker, Alabama, February 1993.
6. Coltman J. W. Rotorcraft crashworthy airframe and fuel system technology development program: Final Report. DOT/FAA/CT-91/7. Simula Inc. Phoenix, October 1994.
7. Joint Service Specification Guide (JSSG-2010-7).
8. Fox R. G. Helicopter Crashworthiness. Part One, Flight safety foundation. Helicopter safety, November/December 1989.
9. Aircraft design crash guide. Volume II Impact conditions and human tolerance. SIMULA INC. Final Report, December 1989.
10. Система парашютная спасательная ПС-37А. Руководство по технической эксплуатации 19490-84 РЭ. ФГУП НИИ парашютостроения, 1992.
11. Руководство по лётной эксплуатации вертолёт Ми-28Н. Книга 1. Лётная эксплуатация. — 2003. — 232 с.
12. Котляр Ю. Л. Методы оценки эффективности средств спасения и обеспечения безопасности экипажа при аварийном покидании вертолёт // Проблемы безопасности полётов. — 2008. — № 8. — С. 50–55.
13. Смирнов Б. А. Инженерная психология. Практические занятия: Учеб. пособие для университетов. — Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. — 192 с.
14. Справочник по инженерной психологии / Под ред. Б. Ф. Ломова. — М.: Машиностроение, 1982. — 368 с.
15. Шибанов Г. П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек—техника. — М.: Машиностроение, 1983. — 263 с.
16. Коваленко Г. В., Микинелов А. Л., Чепига В. Е. Лётная эксплуатация: Учеб. пособие для вузов гражданской авиации. — М.: Машиностроение, 2007. — 416 с.





# Simulation of Activities of Helicopter Flight Crews in Emergency Situations



Anatoliy A. SAFONOV



Vyacheslav A. DZHAKSBAEV

*Safonov, Anatoliy A., Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Syzran, Russia.*

*Dzhaksbaev, Vyacheslav A., Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Syzran, Russia\*.*

## ABSTRACT

*Flight safety assurance problems solving focuses on aviation systems of different size as the objects of the study. Flight safety theory addresses such subjects of the study as operation of a specific aviation system «crew–aircraft» (C–A), detection and evaluation of hazards, as well as their localization or elimination.*

*Protective features of «crew–aircraft» aviation system should provide resistance to occurrence of abnormal cases. Aviation practices show that the protective features of the system are not always able to prevent development of danger, and a catastrophe becomes the most likely outcome of a flight.*

*When encountering such abnormal cases, the crew must use rescue equipment in order to reduce severity of the aviation accident and to prevent their own death. The article presents the results of network modelling of the pilot's activity algorithm and of determining the probability of timely forced escape from of a helicopter with a rescue parachute.*

*The objective of the study is to assess effectiveness of protective features of C–A system in helicopters with the aim to reduce severity of aircraft accidents. To test the hypothesis about the possibility of using rescue equipment by helicopter crews, probabilistic statistical as well as experimental and calculation research methods were used.*

**Keywords:** *transport, aviation, helicopters, emergency, rescue equipment, parachute system, probability, algorithm.*

\*Information about the authors:

**Safonov, Anatoliy A.** – Ph.D. (Eng), head of research laboratory of psychological and pedagogical support of flight personnel training of the branch of the Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Syzran, Russia, safonov.tt@yandex.ru.

**Dzhaksbaev, Vyacheslav A.** – Ph.D. (Eng), head of the department of aerodynamics and flight dynamics of the branch of the Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Syzran, Russia, dzhaksbaev@mail.ru.

Article received 28.05.2019, accepted 15.08.2019.

**For the original Russian text of the article please see p. 260.**

**Background.** Since the beginning of 21<sup>st</sup> century, the aviation standards [1, 2] governing flight safety management systems have actively used the concept of «acceptable risk» based on a probabilistic approach. However, the use of probabilistic and statistical methods for assessing safety of functioning of the aviation system is a privilege for specialists in accident and incident investigations, and that certainly affects the process of ensuring systemic safety by aircraft operators. The analysis of causes of large number of aviation accidents and incidents that occurred with helicopters, comprising civil helicopters, showed that the traditional methodology for training flight crews for operations in abnormal cases does not fully meet modern requirements. The relevance of research is due to the need to train aviation specialists in risk assessment methods to identify hazards and severity of the consequences during the operation of aircrafts.

**Objective.** The objective of the study is to assess effectiveness of protective features of C–A system in helicopters with the aim to reduce severity of aircraft accidents.

**Methods.** To test the hypothesis about the possibility of using rescue equipment by helicopter crews, probabilistic statistical as well as experimental and calculation research methods were used.

#### **Results.**

The work of A. G. Agronik and L. I. Erenburg notes that «...the study of statistical materials on accidents led foreign experts to a solution indicating that the possibility of using emergency escape equipment in helicopters is limited by the features of its combat use at extremely low altitudes and comparatively high speeds, as well as by a difficulty for a pilot to make a decision to escape» [3, p. 168]. Indeed, as a result of the active use of US aviation in Vietnam (1964–1975), 5 607 helicopters were lost, the total number of deceased pilots exceeded two thousand people [4], and that was the reason for implementation of the ideas of shock protection of helicopter crews.

The study of design features of helicopters of leading Western manufacturers like Airbus Helicopters, Boeing, Sikorsky Aircraft Corporation, Leonardo (Augusta Westland), Bell Helicopter showed that passive protection systems based on the use of special devices that

absorb impact energy during emergency landing are the most effective means of saving the flight crew. The basic principles for ensuring survival of helicopter crews are described in the work of D. F. Shanahan [5].

The main causes of losses of helicopter crews in the event of an accident were named, they are: shock loading (excessive acceleration); direct injury from contact with hard surfaces; impact of external environmental factors after emergency landing (fire and combustion products, water, harmful and toxic substances, etc.). Therefore, effective aircraft design should have a set of properties that can protect the crew and passengers against the effects of possible sources of injury both during emergency landing and against its negative consequences [6–9].

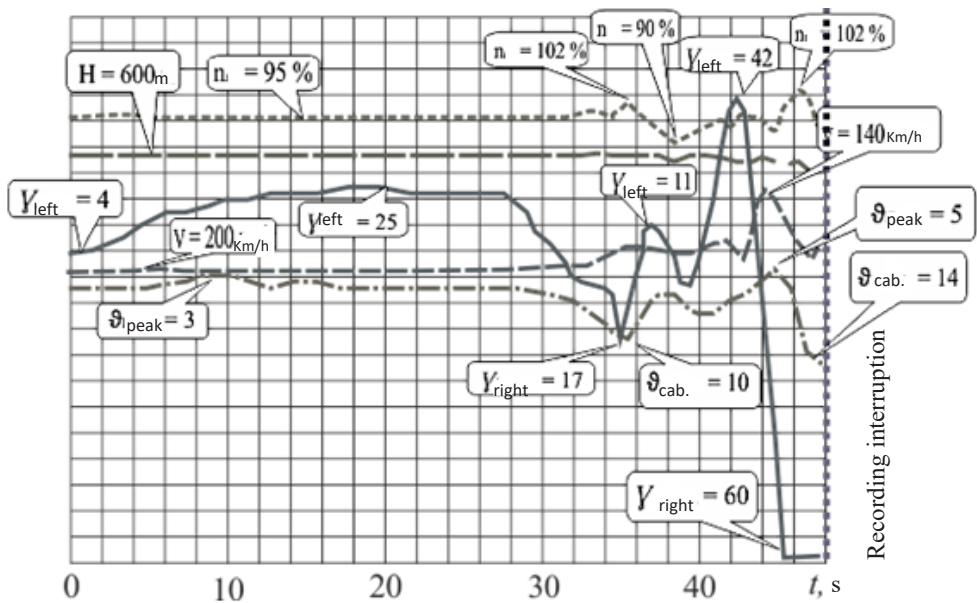
UH-60 Black Hawk and AH-64 Apache helicopters have shock absorption struts with two-stage shock absorption, which can reduce impact by up to 60 % and ensure crew survival during landing at a speed of up to 12,8 m/s. After that shock loading is absorbed due to energy absorbing devices of seats and deformation of the helicopter structure. Fastening elements of power units prevent displacement of engines and the main gearbox into the interior of the fuselage when the helicopter hits the ground. The fuel system is characterized by increased survivability. Automatic pipe sealing reduces a risk of fire. The structural elements of the helicopter chassis are put away from the fuel tanks and, when they hit the ground, do not penetrate the fuselage. Currently, the issue of equipping helicopter cabins with airbags is being actively considered.

An analysis of existing onboard crew rescue systems of domestic helicopters indicates that, along with equipment of certain types of aircraft with shockproof protection systems [10; 11], rescue parachute systems (PS) are still in operation.

The effectiveness of aircraft emergency escape is determined by a number of random variables, the calculations of which are performed using probability theory and mathematical statistics. It has been established that the efficiency of using rescue equipment can be most comprehensively assessed through the index of probability of rescuing a pilot in emergency situation [12] that can be determined by the formula:







**Pic. 1. Fragment of the APRA software recording of the accident with Mi-8 helicopter (destruction of the tail rotor drive).**

$$W_{\text{resc}} = W \cdot P_{\text{use}} \quad (1)$$

where  $W$  – probability of rescue of a pilot when using rescue equipment;

$P_{\text{use}}$  – probability of using rescue equipment in an emergency situation.

The probability of rescue  $W$  can be represented as a function:

$$W = \begin{cases} f[v, v_y, H, \gamma, \theta, \omega_x, \omega_y, \omega_z, n_y] \\ f[v_0, t_s, u, p, A], \end{cases} \quad (2)$$

where  $v, v_y, \gamma, H, \theta, n_y$  – distribution functions of the helicopter flight parameters (horizontal and vertical components), roll, pitch, flight altitude;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – angular speeds of rotation in all projections;

$n_y$  – effect of normal overload on an aircraft and on a pilot in the event of an emergency situation; distribution function of fall parameters of a pilot's body,





Table 1

**Temporal characteristics of the activities of a crew commander of the Mi-8 helicopter  
in an abnormal situation (destruction of a tail rotor drive)**

Operation code	Content of operation (job)	$\bar{\tau}_j$ , ms	$\sigma_\tau$ , ms
1–2	Perception of a vestibular signal (stimulus) from evolution of a helicopter	320	30
2–3	Transfer of sight to the outside of the cabin	260	30
3–4	Assessment of spatial position and decision making on elimination of deviations of a helicopter	800	120
4–5	Moving collective pitch lever down	660	50
4–6	Tilt a control handle to the left and toward a pilot	660	70
4–7	Reading and perception of instrument readings	2090	150
7–8	Search, detection and perception of «Failure» light-signal board	790	50
8–9	Assessment of information and highlighting a set of informative features	800	280
9–10	Activation of pre-memorized signal about the current situation	900	390
10–11	Formation of a conceptual model of activity and decision-making on escape from a helicopter	1900	650
11–12	Submission of a command for forced escape (4–5 words)	2000	1200
11–13	Transfer of sight to the outside of the cabin	260	30
13–14	Assessment of the spatial position of a helicopter	800	70
14–15	Transfer of sight to the reset handle of the left blister	260	30
15–16	Transfer the left hand from collective pitch lever to the blister reset handle	480	50
16–17	With the left hand, pull out the emergency blister relief handle	360	50
17–18	Lean with your left hand in the lower left corner of the opening	280	30
15–19	Transfer of sight to the seat belt lock	260	30
19–20	Transfer the right hand from control lever to the seat belt lock	240	30
20–21	Open the lock of the seat belts with your right hand	560	70
21–22	Transfer of sight to a semi-soft loop	260	30
22–23	With your right hand, grasp the semi-soft loop in the upper opening of the blister	400	30
18–24	Take out the right foot into the aisle between the seats	750	100
24–25	Get up, take the parachute out of the seat bucket	950	300
25–26	Turn left towards the opening; rotate the body 90°	720	70
26–27	Place the left foot on the seat bucket	750	250
25–28	Transfer of sight to the indicator of true altitude	260	30
28–29	Reading altimeter	480	70
29–30	Control of escape by crew members	540	150
27–31	By the push of both legs with simultaneous movement of the arms towards oneself to separate from a helicopter	740	200
31–32	Pulling out the release ring	3000	500
32–33	Parachute opening	1000	100




$$\tau_{\text{op}} = \max L_i. \quad (7)$$

To conduct simulation, activity of a crew commander of Mi-8 helicopter was chosen in the event of an abnormal flight situation related to destruction of the tail rotor drive. It is assumed that a flight mission is performed according to the rules of visual flight (VFR), at the altitude of at least 500 m. The operations performed by a pilot are error-free. The sequence of operations and their temporal characteristics are presented in Table 1.

The initial signs characterizing destruction of a tail rotor in flight are associated with the changes of the attitude of a helicopter in space. The aircraft turns sharply to the left, changes in roll and pitch angles reach their limit values in a short time (Pic. 1).

The initial reaction of a pilot in command is, as a rule, an intuitive desire to restore the spatial position of the helicopter by acting on control devices (operations 4–5, 4–6). The developed network model (Pic. 2) takes into account the series-parallel nature of performance of individual sensory-motor, motor and logical operations.

Operations (25–28, 28–29) are necessary to determine the true altitude of leaving the helicopter and to withstand time in free fall until the PS is opened. The critical path for the model is described as 1–2, 2–3, 3–4, 4–7, 7–8, 8–9, 9–10, 10–11, 11–13, 13–14, 14–15, 15–19, 19–20, 21–22, 22–23, 18–24, 24–25, 25–26, 26–27, 27–31.

The movement of the body after leaving the helicopter (31–32) and opening of the parachute (32–33) are not taken into account in duration of the pilot's activity.

The probability of using PS is determined by the expression:

$$P_{pr} = P\{\tau_{op} \leq t_{lim}\} = \int_0^{t_{lim}} f(\tau) d\tau = F_0\left(\frac{\tau_{op}}{\sigma_\tau}\right) + F_0\left(\frac{t_{lim} - \tau_{op}}{\sigma_\tau}\right), \quad (8)$$

where  $t_{lim}$  — standard time for execution of the algorithm of actions. The standards of simulator training were used to assess the actions of a pilot in abnormal situations in flight [15].

The probability of timely helicopter escape at a set limit  $t_{lim} = 15$  s will be  $P_i = 52$  %. If the time limit will be extended to 20 s, then the probability of using PS will respectively increase to 96 %.

**Conclusions.** The studies and the network model of the pilot's activity in the event of an emergency make it possible to more accurately determine the rescue methods for helicopter flight crews in order to reduce severity of

aircraft accidents. It is so possible to further develop rational methodological methods of training of flight crews to counter emergency.

To justify the probability of rescue of flight crews, a universal mathematical model is required that takes into account the dynamics of all the objects involved (helicopter, pilot, PS) in emergency situations.

## REFERENCES

1. Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. Safety management. ICAO, 2013, 44 p.
2. Safety Management Manual (SMM). Doc. 9859. ICAO, 3<sup>rd</sup> ed., 2013, 300 p.
3. Agronik, A. G., Erenburg, L. I. Development of aviation rescue equipment [*Razvitie aviatsonnykh sredstv spaseniya*]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 256 p.
4. Helicopter Losses During the Vietnam War. Updated 31 December 2018. [Electronic resource]: <https://www.vhpa.org/heliloss.pdf>. Last accessed 01.03.2019.
5. Shanahan, D. F. Basic Principles of Helicopter Crashworthiness. USAARL Report No. 93-15. United States Army Aeromedical Research Laboratory Fort Rucker, Alabama, February 1993.
6. Coltman, J. W. Rotorcraft crashworthy airframe and fuel system technology development program: Final Report. DOT/FAA/CT-91/7. Simula Inc. Phoenix, October 1994.
7. Joint Service Specification Guide (JSSG-2010-7).
8. Fox, R. G. Helicopter Crashworthiness. Part One, Flight safety foundation. Helicopter safety, November/December 1989.
9. Aircraft design crash guide. Volume II Impact conditions and human tolerance. SIMULA INC. Final Report. December 1989.
10. The rescue parachute system PS-37A. Guidance on technical operation 19490-84 RE [*Sistema parashutnaya spasatel'naya PS-37A. Rukovodstvo po tekhnicheskoi ekspluatatsii 19490-84 RE*]. FSUE Research Institute of Parachuting, 1992.
11. Guidelines for flight operation of Mi-28N helicopter. Book 1. Flight operation [*Rukovodstvo po letnoi ekspluatatsii vertoleta Mi-28N. Kniga 1. Letnaya ekspluatatsiya*]. 2003, 232 p.
12. Kotlyar, Yu. L. Methods for evaluating the effectiveness of rescue equipment and ensuring crew safety during emergency escape from helicopters [*Metody otsenki effektivnosti sredstv spaseniya i obespecheniya bezopasnosti ekipazha pri avariinom pokidanii vertoletov*]. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2008, Iss. 8, pp. 50–55.
13. Smirnov, B. A. Engineering Psychology. Practical classes: Study guide for universities [*Inzhenernaya psikhologiya. Prakticheskie zanyatiya: Ucheb. posobie dlya universitetov*]. Kiev, Vyshecha shkola publ., Golovnoe izd-vo, 1979, 192 p.
14. Handbook of engineering psychology [*Spravochnik po inzhenernoi psikhologii*]. Ed. by B. F. Lomov. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982, 368 p.
15. Shibanov, G. P. Quantification of human activity in human–technology systems [*Kolichestvennaya otsenka deyatel'nosti cheloveka v sistemakh chelovek–tekhnika*]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1983, 263 p.
16. Kovalenko, G. V., Mikhelov, A. L., Chepiga, V. E. Flight operation: study guide for civil aviation universities [*Letnaya ekspluatatsiya: uchebnoe posobie dlya vuzov grazhdanskoi aviatsii*]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007, 416 p.



# Влияние поведенческого фактора водителя на образование транспортного затора



Владимир БАСКОВ



Дарья КРАСНИКОВА



Екатерина ИСАЕВА

*Басков Владимир Николаевич — Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (СГТУ им. Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия.*

*Красникова Дарья Андреевна — Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (СГТУ им. Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия.*

*Исаева Екатерина Игоревна — Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (СГТУ им. Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия\*.*

Движение в автомобильном потоке подразумевает вовлечение в сложные дорожные ситуации, отрицательно влияющие на время реакции водителя, которая в свою очередь учитывается при определении тормозного пути транспортного средства и определяет безопасность дорожного движения. Эта взаимосвязь показывает влияние поведения водителей в транспортном потоке на дорожно-транспортную ситуацию.

Целью исследования было изучение поведенческих факторов, влияющих на принятие водителями решений. В ходе исследования использованы методы моделирования поведения водителей, математического моделирования, экспериментальные исследования психических и психологических функций водителей.

Моделирование поведения водителя с учётом различного сочетания множества поведенческих и иных факторов приводит к большому количеству вариантов математического описания такого поведения, что затрудняет применение данного подхода при описании поведения водителей в условиях реальной улично-дорожной сети.

Проанализированы работы, посвящённые изучению управляющего воздействия водителя с использованием неизвестных коэффициентов, описывающих модель движения транспортных средств с учётом точности управления им. Рассмотрен наиболее сложный и показательный вариант поведения водителя при проезде нерегу-

лируемого пересечения. Установлено, что при моделировании транспортного потока необходимо учитывать степень решительности водителей (через определение коэффициента решительности — случайную величину с учётом распределения вероятности его значения в совокупности с распределением вероятностей функции интенсивности транспортного потока). Проанализировано распределение коэффициента решительности водителей, полученное по экспериментальным данным.

Определено, что на формирование транспортного затора оказывает влияние стиль вождения, для оценки которого используют условную классификацию поведения водителей на дороге, а именно проявление агрессии и робости. При изучении поведения робких и агрессивных водителей рассмотрено несколько пар траекторий движения и динамика соответствующей плотности транспортного потока, которые рассчитаны на основе модели Edie's. Подтверждено, что наибольшее отрицательное влияние транспортные заторы оказывают на водителей-холериков и на водителей-сангвиников. Кроме того, прослеживается взаимосвязь между временем реакции водителя и изменением его функционального состояния.

Сделан вывод, что в целях повышения безопасности дорожного движения за счёт более точной оценки возможных рисков возникновения заторовых ситуаций необходимо учитывать поведенческие характеристики водителей и их темпераменты.

**Ключевые слова:** автомобильный транспорт, транспортный затор, транспортный поток, улично-дорожная сеть, поведенческие факторы водителей, стили вождения, темперамент, решительность водителей, безопасность дорожного движения.

\*Информация об авторах:

**Басков Владимир Николаевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой организации перевозок, безопасности движения и сервиса автомобилей Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина (СГТУ им. Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия, [baskov@mail.ru](mailto:baskov@mail.ru).

**Красникова Дарья Андреевна** — кандидат экономических наук, доцент, кафедры организации перевозок, безопасности движения и сервиса автомобилей Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина (СГТУ им. Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия, [dasha747@yandex.ru](mailto:dasha747@yandex.ru).

**Исаева Екатерина Игоревна** — кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок, безопасности движения и сервиса автомобилей Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина (СГТУ им. Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия, [katherina3@mail.ru](mailto:katherina3@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 20.05.2019, актуализирована 16.08.2019, принята к публикации 30.08.2019.

For the English text of the article please see p. 277.



## ВВЕДЕНИЕ

Водители являются важнейшим элементом в моделях транспортного потока (ТП). Поведенческий фактор в области принятия решения в большинстве случаев определяется условиями движения в ТП. Сам процесс принятия решения включает в себя неопределённое количество составляющих, которые зависят от опыта вождения, пола и возраста водителя, психофизиологических качеств водителя, погодных-климатических условий, технико-эксплуатационного состояния дороги, технического состояния и динамических свойств транспортного средства (ТС), показателей ТП, параметров дороги и т.д.

Моделирование поведения водителя с учётом различного сочетания многообразия этих факторов приводит к большому числу вариантов математического описания данного поведения, что проанализировано авторами в работе [1]. Этот факт делает невозможным применение математического подхода к описанию поведения водителей на улично-дорожной сети (УДС) в рамках моделирования движения транспортных потоков в условиях города, где на дорогах движутся десятки тысяч автомобилей [2, 3].

«Преодоление таких «узких мест» в движущемся потоке, как перекрёстки, вовлечение в сложные дорожные ситуации, транспортные заторы негативным образом сказывается на времени реакции водителя» [4]. Время реакции водителя оказывает значительное влияние на длину тормозного пути ТС, особенно это касается экстренного торможения. Все эти параметры входят в динамический габарит автомобиля, который является одним из факторов, определяющих безопасность дорожного движения.

С возрастанием скорости движения увеличивается динамический габарит автомобиля, состояние обратное ему приводит к уменьшению пропускной способности, а в итоге к образованию транспортного затора за счет увеличения времени реакции водителей. Эта взаимосвязь показывает, каким образом влияет поведение водителей в транспортном потоке на дорожно-транспортную ситуацию.

Целью исследования является определение влияния различных поведенческих факторов на действия водителя транспорт-

ного средства, особенно ведущие к образованию дорожного затора.

Имеется большое количество работ, посвящённых изучению управляющего воздействия водителя, учитывающих различные коэффициенты, которые описывают модель движения ТС с учётом точности управления им. С помощью такого подхода можно достичь высокой достоверности при проведении анализа управляемости и устойчивости автомобиля во время ускорения (в тяговом режиме), торможения и в режиме свободного качения. Во время моделирования движения каждого ТС в транспортном потоке вышеперечисленные условия движения составляют многокомпонентную модель с десятком неизвестных коэффициентов, использовать которые при моделировании достаточно сложно.

В связи с этим для использования в моделях движения транспортного потока поведенческого фактора водителя, следует упростить входящую информацию, то есть модель поведения и принятия решения водителя можно свести к *стохастическим моделям* транспортного потока [5]. Стохастические модели транспортного потока характеризуются вероятностью проезда определенного количества автомобилей через сечение дороги, к чему применимо распределение Пуассона:

$$P_n(t) = \frac{(t)^n}{n!} e^{-t}, \quad (1)$$

где  $P_n(t)$  — вероятность проезда  $n$ -го количества транспортных средств за время  $t$ ;

$\lambda$  — параметр распределения (интенсивность ТП), авт./с;

$t$  — длительность отрезков наблюдения, с;

$n$  — количество наблюдаемых ТС.

На основе *теории вероятности* можно задать вероятность принятия того или иного решения в условиях движения транспортного потока. Распределение вероятностей принятия решений необходимо определять *экспериментальным путём*.

## ПОВЕДЕНИЕ ВОДИТЕЛЕЙ НА НЕРЕГУЛИРУЕМОМ ПЕРЕКРЁСТКЕ

Наиболее сложным и показательным будет поведение водителей при проезде нерегулируемого пересечения (рис. 1).

«Поведение водителя, который подъехал к перекрёстку по второстепенной



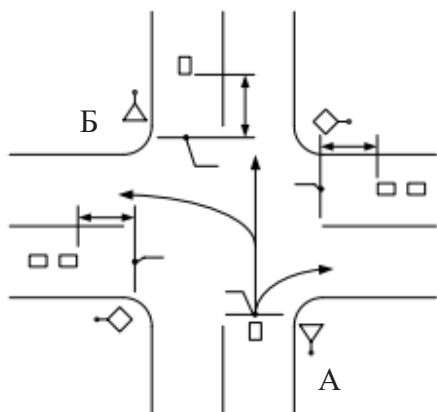


Рис. 1. Схема направлений движения ТП на нерегулируемом пересечении.

дороге, в случае правого поворота задействует определённый запас времени  $t_{зп}$ , по истечению которого производит поворот. Из теоретических основ время  $t_{тп}$ , необходимое для выполнения правого поворота, которое учитывает разгон до скорости движущегося в прямом направлении транспортного потока, определяется с помощью методов из теории автомобиля» [6].

С целью обеспечения запаса времени реакции водителя, как правило, несколько переоценивают время и принимают решения о начале манёвра при условии  $t_{зп} > t_{тп}$ .

Как считают исследователи, «степень решительности водителя при принятии решения можно определить следующим коэффициентом» [8]:

$$K_{реш} = t_{тп} / t_{фзв}, \quad (2)$$

где  $t_{фзв}$  — фактический запас времени, который определяет степень решительности при принятии решения, в течение которого водитель должен принять решение о выполнении манёвра.

Изменение коэффициента, оценивающего показатель решительности водителей, можно заключить в следующий диапазон:  $0 < K_{реш} \leq 1$ . (3)

«Распределение вероятности  $K_{реш}$  необходимо получить экспериментальным путём известными методами, например, с помощью фото-, видеофиксации транспортного потока, который проходит через рассматриваемое пересечение, с дальнейшей статистической обработкой» [8].

При движении автомобилей через нерегулируемый перекрёсток в прямом на-

правлении водитель должен принять решение с учётом запаса времени:

$$t_{зпр} = \min(t_{зп}; t_{тп}); \quad (4)$$

при осуществлении левого поворота:

$$t_{зл} = \min(t_{зп}; t_{тп}; t_{зв}). \quad (5)$$

Необходимо учесть, что показатель решительности водителя зависит от вида манёвра на пересечении (поворот налево, направо, либо проезд прямо). В связи с этим коэффициенты решительности должны рассчитываться для каждого манёвра в отдельности. Распределение коэффициента решительности водителей имеет вид, представленный на рис. 2.

«Экспериментальные данные о движении транспортного потока через нерегулируемое пересечение в значительной части зависят от параметров транспортного потока, особенно от интенсивности движения, чем больше интенсивность, тем решительнее должны действовать водители» [7].

Это видно на кривой (рис. 2) — смещение кривой распределения вправо при увеличении интенсивности движения ТП. Изменение интенсивности движения ТП также необходимо анализировать по экспериментальным данным.

То есть, в процессе моделирования параметров транспортного потока требуется принимать во внимание поведенческий фактор водителя, который можно определить с помощью «коэффициента решительности водителей. Он представляет собой случайную величину с учётом распределения вероятности его значения в совокупности с распределением вероятностей функции интенсивности ТП» [8].

## АГРЕССИВНЫЕ И РОБКИЕ ВОДИТЕЛИ

Проводились исследования, определившие зависимость уровня риска образования затора, увеличивающийся при повышении количества «агрессивных» водителей, которые держатся близко к впереди идущему автомобилю и двигаются максимально быстро по отношению к «робким» водителям, которые держат большую дистанцию и низкую скорость движения [10].

Для иллюстрации поведения робких и агрессивных водителей на рис. 3 показано несколько пар траекторий движения и динамика соответствующей плотности

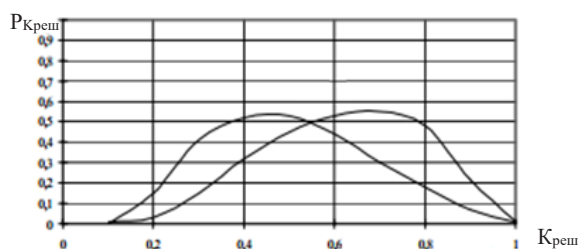


Рис. 2. График распределения коэффициента решительности водителей.

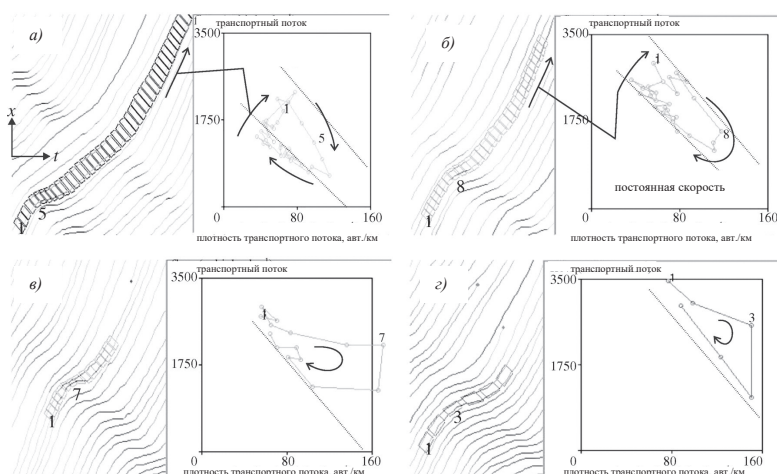


Рис. 3. Траектория движения автомобилей, динамика потоков плотности: а), б) – «робкие» водители; в), г) – агрессивные водители.

транспортного потока. Они рассчитаны на основе модели Edie's [11].

Для числа автомобилей  $n$ , находящихся в транспортном потоке внутри области  $A$ , формула имеет следующий вид:

$$k = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{|A|}, \quad q = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{|A|}, \quad v = \frac{q}{k} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad (6)$$

где  $k$ ,  $q$  и  $v$  – плотность, интенсивность и скорость транспортного потока в области  $A$ ;

$|A|$  – область  $A$ ;

$T_i$ ,  $D_i$  –  $i$ -е время движения транспортного средства и пройденное им расстояние внутри области  $A$ .

Каждый маленький круг на рис. 3 соответствует плотности потока внутри определённой области на пространственно-временной диаграмме. Единица на рисунках указывает на первое измерение, остальные измерения последовательно добавлены и выстроены в траекторию движения [11]:

• робкие водители замедлились вдоль равновесной ветви  $1 \rightarrow 5$ (а) и ускорились

вдоль «нижней» ветви  $1 \rightarrow 8$ (б), возвращаясь к исходному состоянию;

• агрессивные водители замедлились вдоль «верхней» ветви  $1 \rightarrow 7$ (в) и ускорились вдоль ветви  $1 \rightarrow 3$ (г), возвращаясь к состоянию равновесия.

Вскоре после появления такого поведения водителей, приводящего к неравновесному состоянию системы, скорость транспортных средств быстро стремится к нулю, что приводит к транспортному затору.

## ТИП ТЕМПЕРАМЕНТА И ПОВЕДЕНИЕ ВОДИТЕЛЕЙ

«В свою очередь, движение в условиях транспортного затора приводит к ухудшению функционального состояния водителя вследствие временного расстройств его некоторых психических и психологических функций» [12].

С учётом разного типа темперамента, водители по-разному ведут себя в транспортном заторе. «Их функциональное состояние при этом оценивается путём анализа сердечного ритма и определения показателя актив-





ности регуляторных систем (по методу профессора Р. М. Баевского)» [13].

Исследованиями установлено, что наибольшее отрицательное влияние транспортные заторы оказывают на водителей-холериков и на водителей-сангвиников. На водителей остальных темпераментов транспортный затор не оказывает значимого влияния.

Экспериментальные исследования [14] дали возможность определить показатель, оценивающий «характер изменения времени реакции водителей разных темпераментов после выхода из транспортного затора» [15]. Было проанализировано поведение 100 водителей крупного автотранспортного предприятия г. Саратова во время пребывания в транспортном заторе. В ходе эксперимента было обнаружено, что для разных групп водителей показатель, оценивающий характер изменения времени реакции водителей разных темпераментов после выхода из транспортного затора, разный. Например, время реакции водителя-холерика на первой половине участка пути между перекрёстками больше, а на втором участке — меньше.

Это свидетельствует о появлении опасных зон на участках транспортной сети [14], где имеет место высокий уровень вероятности возникновения транспортных заторов и дорожно-транспортных происшествий.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Таким образом, при оптимизации условий дорожного движения необходимо учитывать и принимать во внимание поведенческие характеристики водителей и их темперамент [16] с целью повышения безопасности движения посредством учёта рисков заторовых ситуаций, возникающих по вине водителей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Басков В. Н., Рейн А. Р. Оценка влияния эргономических факторов на состояние водителя и безопасность движения // Научная мысль. — 2016. — № 3. — С. 102–107.
2. Баранов Ю. Н., Катунин А. А., Шкрабак Р. В., Брагинцев Ю. Н. Основы обеспечения безопасности в системе «человек—машина—среда» // Вестник НЦБЖД. — 2014. — № 1. — С. 73–76.
3. Алекминский Д. Е., Кожин Д. О., Баранов Ю. Н. Факторы, определяющие возникновение отказа системы «человек—машина» при эксплуатации транспортного средства // Организация дорожного

движения и безопасность на дорогах европейских городов: Материалы международной молодёжной научно-практ. конференции. — Чешский технический университет в Праге 2014 г., ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК», 2014. — С. 24–27.

4. Полев Н. У. Об изменении времени реакции водителя вследствие пребывания в транспортном заторе // Вестник Национального технического университета «ХПИ». — 2011. — № 2. — С. 117–120.

5. Гецович Е. М., Лазурик В. Т., Семченко Н. А., Король В. Ю. Эмпирико-стохастический подход к моделированию транспортных потоков // Компьютерное моделирование в наукоёмких технологиях: Тр. научн.-техн. конф. с междунар. участием Харьк. нац. ун-та им. В. Н. Каразина, 18–21 мая 2010 г. — Харьков, 2010. — Ч. 1. — С. 101–104.

6. Умняшкин В. А., Филькин Н. М., Музафаров Р. С. Теория автомобиля: Учебник. — Ижевск: ИжГТУ, 2006. — 272 с.

7. Басков В. Н., Рейн А. Р. Влияние эксплуатационных факторов на психофизиологическое состояние водителя и его энергозатраты / В сб.: Информационные технологии и инновации на транспорте материалы 2-й Международной научно-практической конференции // Под общ. ред. А. Н. Новикова. — 2016. — С. 139–147.

8. Трясцин А. П., Баранов Ю. Н., Лапин А. П., Катунин А. А. Теоретические подходы к стратегии подготовки водителей транспортных средств // Мир транспорта и технологических машин. — 2012. — № 2. — С. 123–127.

9. Новиков А. Н., Трясцин А. П., Баранов Ю. Н., Самусенко В. И., Никитин А. М. Оценка эффективности функционирования системы подготовки кадров, связанных с обеспечением безопасности дорожного движения // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2014. — № 4. — С. 188–195.

10. Hennessy D. A., Wiesenthal D. L. Gender, Driver Aggression, and Driver Violence: An Applied Evaluation // Sex Roles. — Vol. 44. — No. 11/12. — June 2001. — pp. 661–676.

11. Laval J. A., Leclercq L. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic. — Phil. Trans. R. A. — 2010. — pp. 4519–4541. — DOI: 10.1098/rsta.2010.0138.

12. Ефремов Б. Д., Оверин Ю. В. Методы оценки профессиональных качеств водителей автомобилей // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2011. — № 16. — С. 95–97.

13. Крамарова М. И. Роль темперамента водителя в обеспечении безопасности дорожного движения // Технологический аудит и резервы производства. — 2012. — № 1. — С. 33–34.

14. Öz B., Özkan T., Lajunen T. An investigation of the relationship between organizational climate and professional drivers' driver behaviours // Safety Science. — 2010. — № 10. — pp. 1484–1489.

15. Кожин Д. О., Алекминский Д. Е., Евграшин В. В., Баранов Ю. Н. Исследование факторов, определяющих вероятность отказа (опасного действия) водителей автотранспортных средств // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. — 2014. — № 1. — С. 235–239.

16. Белоножко А. А., Гамаюнов П. П. Внедрение тестов, определяющих психофизиологические особенности начинающего водителя // Научно-методический электронный журнал «Концепт». — 2015. — № 35. — С. 21–25. ●





# Effect of Driver Behaviour on Traffic Jams



Vladimir N. BASKOV



Daria A. KRASNIKOVA



Ekaterina I. ISAEVA

*Baskov, Vladimir N., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia.  
Krasnikova, Daria A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia.  
Isaeva, Ekaterina I., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia\*.*

## ABSTRACT

Driving in a traffic flow implies involvement in difficult traffic situations that adversely affects response time of a driver, which in turn is considered when estimating stopping distance of a vehicle and determines road safety. This relationship shows the effect of driver behaviour in traffic flow on the road traffic situation.

The objective of the study was to study behavioural factors that influence driver's decisions. The study used methods of driver behaviour modelling, mathematical modelling, experimental studies of the mental and psychological functions of drivers.

Modelling the driver's behaviour, considering various combinations of many behavioural and other factors, leads to a large number of options for mathematical description of driver behaviour, which makes it difficult to use this approach to describe behaviour of drivers under the conditions of a real street-road network.

The research has analysed several works devoted to the study of control action of drivers, using unknown coefficients, describing a model of movement of vehicles considering accuracy of their control. Driving through an unregulated intersection is considered as the most complex and informative version of driver's behaviour. It is found that when modelling a traffic flow, it is necessary to take into account the degree

of resoluteness of drivers (through determination of a coefficient of resoluteness which is a random variable that takes into account the probability distribution of the coefficient's value in conjunction with the probability distribution of the function of traffic flow intensity). The distribution of the coefficient of resoluteness of drivers, obtained from experimental data, was subject to analysis.

It is determined that the driving style affects formation of traffic congestion. The assessment of the driving style is made through conditional classification of driver behaviour on the road, namely marked by manifestation of aggression and timidity. When studying the behaviour of timid and aggressive drivers, several pairs of trajectories and the dynamics of the corresponding traffic flow density, were considered and calculated based on Edie's model. It has been confirmed that traffic congestion has the greatest negative effect on choleric drivers and sanguine drivers. Besides, there is a relationship between the response time of a driver and the change in his functional condition.

It is concluded that to improve road safety thanks to a more accurate assessment of possible risks of formation of congestion situations, it is necessary to consider behavioural characteristics and temperaments of the drivers.

**Keywords:** road transport, traffic congestion, traffic flow, street-road network, behavioral factors of drivers, driving styles, temperament, determination of drivers, road safety.

\*Information about the authors:

**Baskov, Vladimir N.** – D.Sc. (Eng), professor, head of the department of organization of transportation, traffic safety and vehicle maintenance of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia, baskov@mail.ru.

**Krasnikova, Daria A.** – Ph.D. (Economics), associate professor of the department of organization of transportation, traffic safety and vehicle maintenance of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia, dasha747@yandex.ru.

**Isaeva, Ekaterina I.** – Ph.D. (Eng), associate professor of the department of organization of transportation, traffic safety and vehicle maintenance of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia, katherina3@mail.ru.

Article received 20.05.2019, revised 16.08.2019, accepted 30.08.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 272.

**Background.** Drivers are an essential element in traffic flow models (TF). The behavioural factor in the field of decision-making in most cases is determined by traffic conditions in a TF. The decision-making process itself includes an indefinite number of components that depend on driving experience, gender and age of a driver, psychophysiological features of a driver, weather and climate conditions, technical and operational condition of a road, technical condition and dynamic properties of a vehicle, traffic flow indicators, road parameters, etc.

Modelling the driver's behaviour, taking into account various combinations of the variety of these factors, leads to a large number of options for mathematical description of this behaviour, which was analyzed by the authors in the work [1]. This fact makes it impossible to apply a mathematical approach to describing behaviour of drivers on a street-road network (SRN) in the framework of modelling traffic flows in a city where tens of thousands of cars move on roads [2, 3].

«Overcoming such «bottlenecks» in a moving flow as intersections, involvement in difficult traffic situations, traffic jams negatively affect the driver's response time» [4]. The response time of a driver has a significant impact on the braking distance length of a vehicle, especially with regard to emergency braking. All these parameters are included in the dynamic dimensions of a car, which is one of the factors that determine road safety.

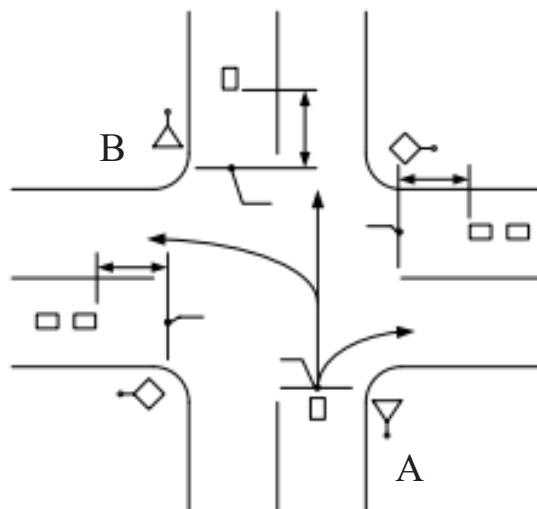
With increasing speed the dynamic dimensions of a car also increase, the reverse state leads to a decrease in transit capacity, and ultimately to formation of traffic congestion due to increase of driver's response time. This relationship shows how the behaviour of drivers in a traffic flow affects the road traffic situation.

**Objective.** The objective of the study is to determine the influence of various behavioural factors on the actions of the driver of the vehicle, especially on those that cause formation of traffic congestion.

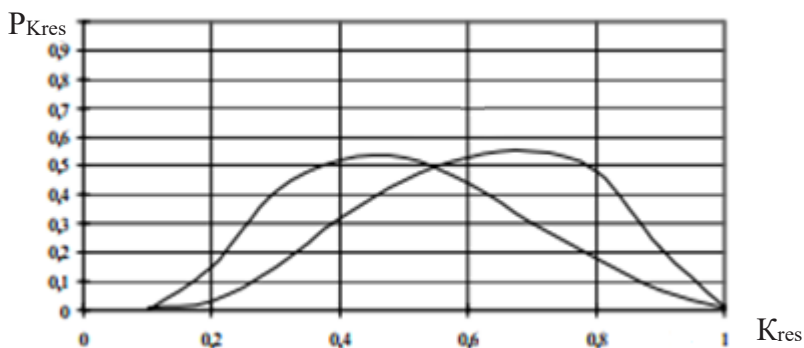
**Methods.** The authors used general scientific and engineering methods, modelling, experimental studies.

**Results.** There are many works devoted to the study of the control action of a driver, taking into account various coefficients, which describe vehicle's motion model considering accuracy of its control. This approach has high reliability when analyzing controllability and stability of a car during acceleration (traction mode), braking, and in free-wheeling mode. During simulation of movement of each vehicle in a traffic flow, the above traffic conditions make up a multicomponent model with a dozen unknown coefficients, which are difficult to be used when modelling.

In this regard, for the driver's behavioural factor to be used in traffic flow models, the input information should be simplified, that is, the driver behaviour and decision model can be reduced to *stochastic transport flow models* [5].



Pic. 1. Scheme of directions of vehicles at an unregulated intersection.



**Pic. 2. The scheme of distribution of the coefficient of resoluteness of drivers.**

Stochastic models of transport flow are characterized by a probability that a certain number of cars will pass through a section of the road to which the Poisson distribution applies:

$$P_n(t) = \frac{(t)^n}{n} e^{-t}, \quad (1)$$

where  $P_n(t)$  – probability of transit of the  $n$ -th number of vehicles during time  $t$ ;

$\lambda$  – distribution parameter (transport flow intensity), car/day;

$t$  – duration of observation segments, sec;

$n$  – number of observed vehicles.

Based on *probability theory*, it is possible to set the probability of making a decision under traffic conditions. The probability distribution of decision making must be determined *experimentally*.

#### **Drivers at an unregulated intersection**

The behaviour of drivers when driving through an unregulated intersection will be the most complex and demonstrative (Pic. 1).

«The behaviour of a driver who has approached an intersection on a secondary road, in the case of a right turn, involves a certain margin of time  $t_{mar}$ , after which he makes a turn. From the theoretical foundations, the time  $t_{it}$ , necessary to perform a right turn, comprising acceleration to speed of a traffic flow moving in the forward direction, is determined using methods of automotive engineering» [6].

In order to ensure a reserve of response time, drivers, as a rule, overestimate time somewhat, and make decisions about the beginning of a maneuver, subject to:

$$t_{mar} > t_{it}$$

According to the researchers, «the degree of resoluteness of a driver when making a decision can be determined by the following coefficient» [8]:

$$K_{res} = t_{it}/t_{acttr}, \quad (2)$$

where  $t_{acttr}$  is actual time redundancy that determines the degree of resoluteness when making a decision, during which a driver must decide on a maneuver.

The change in the coefficient that evaluates resoluteness of drivers can be included in the following range:

$$0 < K_{res} \leq 1. \quad (3)$$

«The probability distribution of  $K_{res}$  needs to be obtained experimentally by known methods, for example, by means of photo and video recording of a traffic flow that passes through the intersection under consideration with further statistical processing» [8].

When cars move through an unregulated intersection in the forward direction, a driver must make a decision taking into account time margin:

$$t_{marr} = \min(t_{mar}; t_{it}), \quad (4)$$

when making a left turn:

$$t_{marl} = \min(t_{mar}; t_{it}; t_{tr}). \quad (5)$$

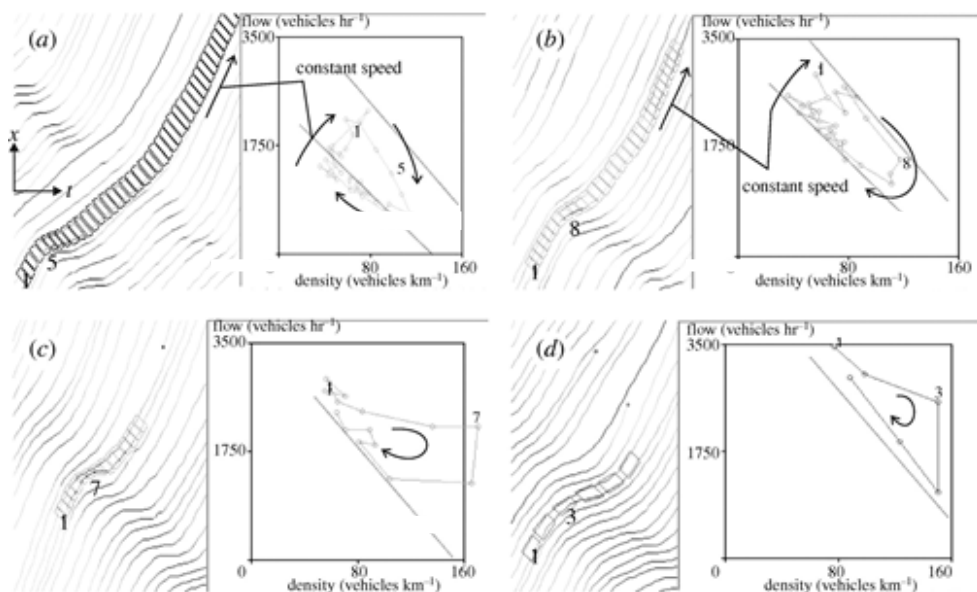
Please note that driver's resoluteness depends on the type of maneuver at the intersection (turning left, right, or driving straight). In this regard, decisive factors must be calculated for each maneuver separately. The distribution of the coefficient of determination of drivers has the form shown in Pic. 2.

«The experimental data on a traffic flow through an unregulated intersection largely depend on parameters of a traffic flow, especially on traffic intensity, the greater is intensity, the more decisively drivers must act» [7].

This can be seen on the curve (Pic. 2) that shows the shift of the distribution curve to the right with increasing traffic intensity. The change in traffic intensity also needs to be analyzed using experimental data.

That is, in the process of modelling the parameters of a traffic flow, it is necessary to take





**Pic. 3. The trajectory of cars, the dynamics of density flows:**  
a), b) – timid drivers; c), d) – aggressive drivers.

into account the behavioural factor of a driver, which can be determined using the «coefficient of resoluteness of drivers». It is a random variable considering the probability distribution of its value in combination with the probability distribution of TF intensity function» [8].

#### **Aggressive and timid drivers**

Studies were carried out that determined the dependencies of the risk level of congestion formation, increasing with an increase in the number of aggressive drivers who keep close to the vehicle in front and move as fast as possible as compared to timid drivers who keep a great distance and low speed» [10].

To study the behaviour of timid and aggressive drivers Pic. 3 shows several pairs of trajectories and dynamics of the corresponding density of a traffic flow. They are calculated based on the Edies model [11].

For  $n$ -cars located in the transport flow inside area  $A$ , the formula has the following form:

$$k = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{|A|}, \quad q = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{|A|}, \quad v = \frac{q}{k} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad (6)$$

where  $k$ ,  $q$  and  $v$  – density, intensity and speed of the transport flow in the area  $A$ ;

$|A|$  – area  $A$ ;

$T_i$ ,  $D_i$  –  $i$ -th time of movement of the vehicle and the distance traveled within the area  $A$ .

Each small circle in Pic. 3 corresponds to the flow density within a certain area in the space-time diagram. The unit in the pictures indicates the first dimension, the remaining dimensions are sequentially added and built into the trajectory of motion [11]:

- timid drivers slowed down along the equilibrium branch 1→5(a), and accelerated along the «lower» branch 1→8(b), returning to the initial state;

- aggressive drivers slowed down along the «upper» branch 1→7(c), and accelerated along the branch 1→3(d), returning to the equilibrium state.

Soon after such a behaviour of drivers manifests, leading to a nonequilibrium state of the system, speed of vehicles quickly tends to zero, which leads to traffic congestion.

#### **Type of temperament and driver behaviour**

«In turn, movement under the conditions of traffic congestion leads to deterioration in the functional condition of a driver due to a temporary distortion of some of his mental and psychological functions» [12].

Given the different types of temperament, drivers behave differently in traffic congestion. «Their functional condition is assessed by analyzing the heart rate and determining the activity index of regulatory systems (according to the method of Professor R. M. Baevsky)» [13].



Studies have found that traffic jams have the greatest negative effect on choleric drivers and sanguine drivers. Traffic congestion does not have a significant effect on drivers of other temperaments.

Experimental studies [14] made it possible to determine an indicator that evaluates the «nature of change in the response time of drivers of different temperaments after leaving a traffic congestion» [15]. The behavior of 100 drivers of a large motor transport enterprise of the city of Saratov during their stay in a traffic jam was analyzed. During the experiment, it was found that for different groups of drivers, the indicator evaluating the nature of the change in the response time of drivers of different temperaments after leaving a traffic jam is different. It was found that it is different for different groups of drivers. For example, the response time of a choleric driver in the first half of the section of the path between the intersections is longer, and in the second section it is less.

This indicates the emergence of hazardous areas in the areas of the transport network [14], where there is a high level of likelihood of traffic jams and traffic accidents.

**Brief conclusions.** Thus, when optimizing traffic conditions, it is necessary to take into account the behavioral characteristics of drivers and their temperament [16] in order to improve traffic safety by considering risks of congestion situations arising from the fault of drivers.

## REFERENCES

1. Baskov, V. N., Rein, A. R. Evaluation of the influence of ergonomic factors on the driver's condition and traffic safety [Otsenka vliyaniya ergonomicheskikh faktorov n sostoyanie voditelya i bezopasnost' dvizheniya]. *Nauchnaya mysl'*, 2016, Iss. 3, pp. 102–107.
2. Baranov, Yu. N., Katunin, A. A., Shkrabak, R. V., Braginets, Yu. N. Fundamentals of security in the «man–machine–environment» system [Osnovy obespecheniya bezopasnosti v sisteme «chelovek–mashina–sreda»]. *Vestnik NCBZhD*, 2014, Iss. 1, pp. 73–76.
3. Alekminsky, D. E., Kozhin, D. O., Baranov, Yu. N. Factors determining the occurrence of a failure of the «man–machine» system during operation of a vehicle [Faktory, opredelyayushchie vozniknovenie otkaza sistemy «chelovek–mashina» pri ekspluatatsii transportnogo sredstva]. *Organization of traffic and safety on the roads of European cities: Proceedings of the international youth scientific practical conference*. Czech Technical University in Prague 2014; UNPK, 2014, pp. 24–27.
4. Gyulev, N. U. On changing response time of a driver due to stay in traffic congestion [Ob izmenenii vremeni reaktsii voditelya vsedstvie prebyvaniya v transportnom

zatore]. *Bulletin of National Technical University «KhPI»*, 2011, Iss. 2, pp. 117–120.

5. Getsovich, E. M., Lazurik, V. T., Semchenko, N. A., Korol, V. Yu. Empirical-stochastic approach to modeling traffic flows [Empiriko-stokasticheskiy podkhod k modelirovaniyu transportnykh potokov]. *Computer Modeling in High Technology: Transport scientific and technical conference with the international participation of Kharkiv National University named after V. N. Karazin*, May 18–21, 2010. Kharkov, 2010, Part 1, pp. 101–104.
6. Umnyashkin, V. A., Filkin, N. M., Muzafarov, R. S. *Car Theory: Textbook [Teoriya avtomobilya: Uchebnik]*. Izhevsk, IzhSTU, 2006, 272 p.
7. Baskov, V. N., Rein, A. R. Influence of operational factors on the psychophysiological state of the driver and his energy consumption [Vliyaniye ekspluatatsionnykh faktorov na psikhofiziologicheskoe sostoyaniye voditelya i ego energozatraty]. *Information Technologies and Innovations in Transport Materials of the 2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference*. Ed. by A. N. Novikov, 2016, pp. 139–147.
8. Tryastin, A. P., Baranov, Yu. N., Lapin, A. P., Katunin, A. A. Theoretical approaches to the strategy of training drivers of vehicles [Teoreticheskie podkhody k strategii podgotovki voditelei transportnykh sredstv]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, 2012, Vol. 2, pp. 123–127.
9. Novikov, A. N., Tryastin, A. P., Baranov, Yu. N., Samusenko, V. I., Nikitin, A. M. Evaluation of effectiveness of the training system related to traffic safety [Otsenka effektivnosti funktsionirovaniya sistemy podgotovki kadrov, svyazannykh s obespecheniem bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya]. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2014, Iss. 4, pp. 188–195.
10. Hennessy, D. A., Wiesenthal, D. L. Gender, Driver Aggression, and Driver Violence: An Applied Evaluation. *Sex Roles*, Vol. 44, No. 11/12, June 2001, pp. 661–676.
11. Laval, J. A., Leclercq, L. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic. DOI: 10.1098/rsta.2010.0138, *Phil. Trans. R. A.*, 2010, pp. 4519–4541.
12. Efremov, B. D., Overin, Yu. V. Methods for assessing the professional qualities of car drivers [Metody otsenki professionalnykh kachestv voditelei avtomobilei]. *Technical and technological problems of service*, 2011, Iss. 16, pp. 95–97.
13. Kramarova, M. I. The role of driver temperament in ensuring traffic safety [Rol' temperamenta voditelya v obespechenii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya]. *Technological audit and production reserves*, 2012, Iss. 1, pp. 33–34.
14. Öz, B., Özkan, T., Lajunen, T. An investigation of the relationship between organizational climate and professional drivers' driver behaviours. *Safety Science*, 2010, No. 10, pp. 1484–1489.
15. Kozhin, D. O., Alekminsky, D. E., Evgrashin, V. V., Baranov, Yu. N. Study of factors determining the probability of failure (hazardous action) of motor vehicle drivers [Issledovanie faktorov, opredelyayushchikh veroyatnost' otkaza (opasnogo deistviya) voditelei avttransportnykh sredstv]. *Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and rational use prospects*, 2014, Iss. 1, pp. 235–239.
16. Belonozhko, A. A., Gamayunov, P. P. Implementation of tests determining the psychophysiological characteristics of a novice driver [Vnedrenie testov, opredelyayushchikh psikhofiziologicheskkiye osobennosti nachinayushchego voditelya]. *Scientific and Methodological Electronic Journal «Concept»*, 2015, Iss. 35, pp. 21–25.





## АВИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ОБУЧЕНИЕ

**Г**енеральный секретарь ИКАО д-р Фан Лю приняла участие в Международной авиационной конференции Университета Ханseo, которая была организована в сотрудничестве с министерством земельных ресурсов, инфраструктуры и транспорта Республики Корея и выступила с основным докладом.

Отметив быстрые технологические изменения в авиационной отрасли, включая внедрение искусственного интеллекта, дронов и технологий «блокчейн», генеральный секретарь подчеркнула необходимость авиационной подготовки, которая будет способствовать появлению «нового смелого поколения со свежими идеями и энтузиазмом».

«В том, что касается авиационной подготовки, крайне важно, чтобы мы смогли определить те данные, которые позволят нам быстро получить оптимальные решения в области авиационной подготовки, удовлетворяющие растущие требования», — заявила д-р Лю. «Основная задача

состоит в том, чтобы учебные заведения могли объединить на последовательной и функциональной основе полезную для принятия решений информацию из различных дисциплин».

Генеральный секретарь пояснила, что ИКАО извлекла уроки в процессе реформирования своих подходов к обучению, отметив, что «конвергентный подход» приобрёл критически важное значение для трансформации стратегий и решений в области подготовки. «За прошедшие годы мы заметили, что, собирая и используя широкий спектр материалов из различных источников, мы можем наилучшим образом достичь целей обучения, которые действительно будут соответствовать потребностям отрасли», — отметила она.

**На основе материалов ИКАО:**

<https://www.icao.int/Newsroom/Pages/RU/Dynamic-aviation-technology-and-growth-demands-tailored-and-multidisciplinary-training.aspx> ●

## DYNAMIC AVIATION TECHNOLOGY AND TAILORED MULTIDISCIPLINARY TRAINING

**P**ointing to the rapid technological changes in the aviation industry, including the implementation of artificial intelligence, drones, and block chain, ICAO Secretary General Dr. Fang Liu stressed the need for aviation training that will support «a bold new generation with fresh ideas and enthusiasm».

She delivered this call through her keynote addressed at Hanseo University's International Aviation Conference, which was organized in cooperation with the Republic of Korea's Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

«In the field of civil aviation training, it is critical that we identify the appropriate intelligence that will allow us to rapidly provide optimal aviation training solutions that meet the demands of growth», Dr. Liu declared. «The key

is to integrate the decision-useful information, from multiple disciplines, into training organizations in a coherent and functional way».

The Secretary General explained that ICAO had learned from the reform of its own training, noting that the «convergent approach» had become critical to the evolution of training strategies and solutions. «We have noted over the years that by collecting and leveraging a wide range of inputs, from a variety of sources, we can best realize training outcomes which truly meet the needs of the industry», she said.

**Compiled from ICAO news: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Dynamic-aviation-technology-and-growth-demands-tailored-and-multidisciplinary-training.aspx>**

**Dynamic-aviation-technology-and-growth-demands-tailored-and-multidisciplinary-training.aspx** ●



## ГАЛЕРЕЯ ИМЁН 284

*Борис Якоби – изобретатель электродвигателя.*

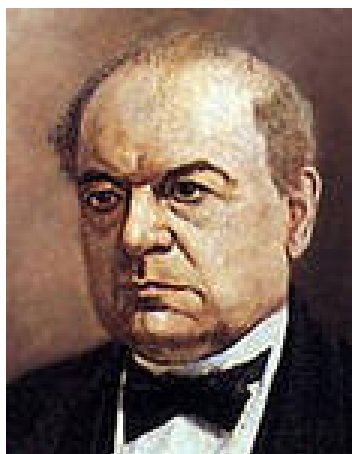
## ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛОМ 110 ЛЕТ НАЗАД 301

- Адаптация молодых специалистов.
- Аттестация и премирование сотрудников железных дорог: ассессмент существовал и тогда.
- Опыт государственно-частного партнёрства: железнодорожные училища финансировало не одно лишь государство, но и сами служащие железных дорог.
- Железные дороги и тогда были социально ответственным работодателем: только они соглашались предоставлять летнюю практику студентам.



## GALLERY OF NAMES 293

*Boris S. Jacobi, the inventor of the electric motor.*



## RAIL EDUCATION AND HRM 110 YEARS AGO 305

- Adaptation and involvement of young professionals.
- Certification and bonus plans for the railway employees: assessment existed a century ago.
- Early PPP practices: railway vocational schools were funded by public authorities and by railway employees.
- Railways have always been socially responsible employers: they were among rare companies that agreed to accept students for summer internship.

КОЛЕСО ИСТОРИИ • HISTORY WHEEL





# Борис Семёнович Якоби



*Григорьев Николай Дмитриевич — кандидат технических наук, Москва, Россия\*.*

**Николай ГРИГОРЬЕВ**

185 лет назад, в 1834 году молодой учёный Мориц Герман фон Якоби собрал в немецком Кёнигсберге (ныне российский Калининград) первый реально работающий электродвигатель. Наиболее важным в этом изобретении было открытие принципа беспрерывного вращательного движения.

Статья посвящена жизненному пути и научным достижениям знаменитого учёного, известность к которому после переезда в Россию пришла под именем Бориса Семёновича Якоби.

К его заслугам, в частности, относится разработка метода гальванопластики, положившего начало целому направлению прикладной электрохимии. Характерно, что результаты этого исследования учёный отразил в общедоступной или, используя современные термины, размещённой в открытом доступе публикации.

Научно-техническое творчество Якоби было многообразным. Он изобрёл несколько видов прибора для измерения электри-

ческого сопротивления, названного им вольтаметром. Значительные успехи были достигнуты в области телеграфии, им был сконструирован телеграфный аппарат синхронного действия с непосредственной (без расшифровки) индикацией в приёмнике передаваемых букв и цифр и первый в мире буквопечатающий телеграфный аппарат. Он руководил строительством первых кабельных линий в Санкт-Петербурге и между Санкт-Петербургом и Царским Селом. Якоби разрабатывал гальванические батареи, много работал над созданием противокорабельных мин нового типа; был инициатором формирования гальванических команд в сапёрных частях русской армии. По инициативе и под руководством Бориса Якоби было положено начало выбору в России единиц измерений, установлению метрической системы, разработке эталонов мер и весов.

Многочисленные научные достижения принесли Якоби заслуженное признание.

**Ключевые слова:** Якоби, история транспорта, электродвигатель, коммутатор, электромагниты, гальванический элемент, гальванопластика, механические генераторы, магнитоэлектрический генератор, телеграфный аппарат Якоби.

\*Информация об авторе:

**Григорьев Николай Дмитриевич** — кандидат технических наук, Москва, Россия.

Статья поступила в редакцию 13.02.2019, принята к публикации 22.05.2019.

**For the English text of the article please see p. 293.**



**Ц**елью представляемого исторического очерка является описание на основе историко-ретроспективного и научного анализа жизнедеятельности видного учёного Бориса Якоби, автора первого практически пригодного электродвигателя.

## РАННИЕ ГОДЫ

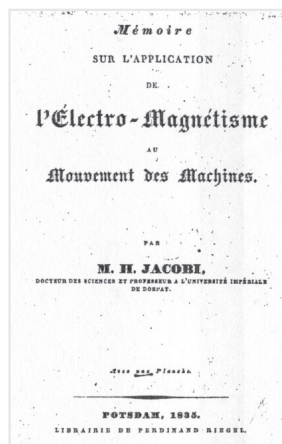
Будущий учёный в области электротехники, академик Императорской Санкт-Петербургской академии наук Мориц Герман (с 1837 г. Борис Семёнович Якоби) фон Якоби родился 21 сентября 1801 г. в г. Потсдаме (Германия) в состоятельной семье личного банкира кайзера (короля) Пруссии Фридриха Вильгельма III [1–9]. Начальное образование он получил дома и в гимназии. В 19 лет юноша поступил в Берлинский университет, а затем через год перевёлся на физико-технический факультет Гёттингенского университета. С 1823 г. после окончания курса и получения диплома инженера-строителя работал в строительном департаменте Пруссии, проектируя крупные здания и руководя их возведением в Потсдаме. Им были разработаны проекты большого дорожного моста и канала для регулирования речных вод в районе г. Ораниенбург. В 1829 г. после принятия в «Союз поощрения промышленной деятельности в Пруссии» Якоби приобрели звание архитектора.

## ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

В 1833 г. Якоби переехал в Кёнигсберг (ныне Калининград) и увлёкся теорией и практикой электромагнетизма, новой тогда отраслью знаний, вклад в развитие которой внесли многие знаменитые и, к сожалению, менее известные сейчас учёные и изобретатели, в числе которых Алессандро Вольт, Доминик Франсуа Жан Араго, Андре-Мари Ампер, Майкл Фарадей, Питер Барлоу, Ханс Кристиан Эрстед, Джозеф Генри, Уильям Стёрджен, Аньош Иштван Йедлик, Андреас фон Баумгартнер, Сальваторе Даль-Негро, Ипполит Пикси, Эмилий Ленц, Уильям Риччи. Последний именно в 1833 году в статье «Опытные исследования по электромагнетизму и магнитоэлектричеству» описал прибор, в котором ему с помощью неподвижного подковообразного магнита удалось получить вращательное



**Б. С. Якоби (1801–1874).**

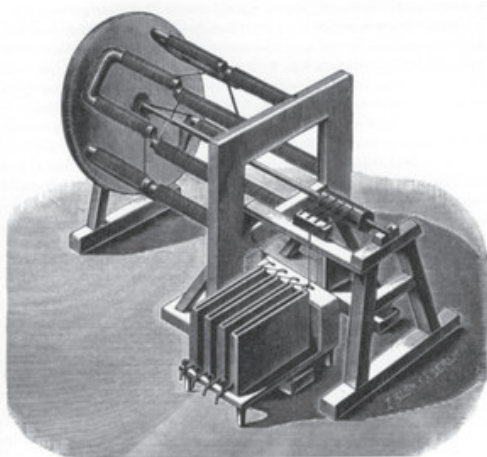


**Прижизненное издание труда Б. С. Якоби.**

движение вокруг вертикальной оси электромагнита (железной полосы, обвитой проволокой) при перемене полюсов. Якоби так отзывался об одном из подобных аппаратов: «такой прибор будет не больше, чем забавной игрушкой для обогащения физических кабинетов, его нельзя будет применять в большом масштабе с какой-нибудь экономической выгодой».

Якоби в 1834 г. собрал электродвигатель (магнитный аппарат) оригинальной конструкции с непрерывным вращением вала частотой 80–120 оборотов в минуту и мощностью 15 Вт. Это имело принципиальное значение, так как для конструкции распространённых в то время паровых и электрических установок привычной была схема возвратно-поступательного движения поршня или качательных колебаний подвижной рабочей части. В то время изобретатели предлагали использовать двигатель для приведения в движение вёсел, чтобы заменить гребцов или создать передвигаю-





**Первый в мире реально действующий электродвигатель Якоби [12; <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>].**

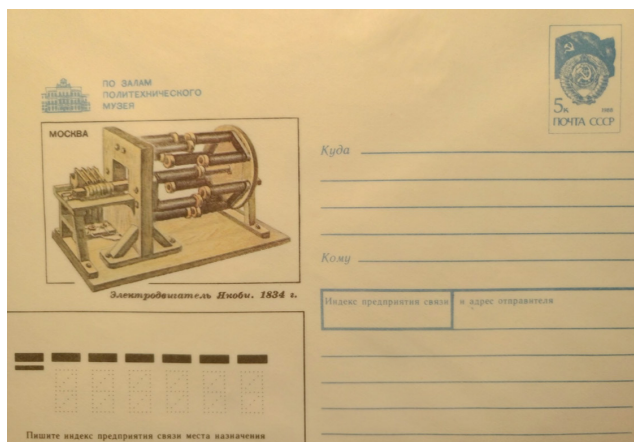
щийся механизм, подражающий движению ног лошади.

О своём электродвигателе он впервые сообщил в 1834 г. в трудах Парижской Академии наук в «Заметке о магнитной машине, в которой магнетизм используется как двигательная сила», а подробное описание под названием «Мемуар о применении электромагнитной силы к движению машин» напечатал в Потсдаме и в трудах российской Императорской академии наук.

Его электродвигатель, основанный на принципе притяжения и отталкивания между комплектами П-образных электромагнитов, работал от батареи 69 гальванических элементов английского учёного У. Р. Грове и состоял из двух групп электромагнитов по 8 стержней мягкого железа длиной по 7 дюймов (177,8 мм) и толщиной 1 дюйм (25,4 мм), обмотанных 320 футами (96 м) медной проволоки диаметром в одну четвертую линии (3,17 мм) и расположенных на двух дисках (одна группа была неподвижной, закреплённой на раме, другая вращалась вокруг оси) под прямым углом и симметрично одна по отношению к другой таким образом, чтобы полюсы приходились один против другого. Обмотки неподвижных электромагнитов были соединены последовательно. Ток в них имел одно и тоже направление. Для попеременного изменения полярности подводимого тока подвижных электромагнитов служил придуманный им коммутатор, принцип устройства которого используется до на-

стоящего времени в коллекторе тяговых электродвигателей на транспорте [10; 11 и др.]. Коммутатор состоял из четырёх металлических колец, установленных на валу и изолированных от него. Каждое кольцо с четырьмя вырезами по одной восьмой части окружности, заполненными изолирующими вкладками, было смещено на 45 градусов по отношению к предыдущему. По ровной и отполированной поверхности окружности кольца скользил рычаг, представляющий собой своеобразную щётку, второй конец которого был погружён в сосуд с ртутью, соединённый проводниками с гальванической батареей. К обмоткам электромагнитов вращающегося диска, соединённых последовательно, отходили от колец проводники, укреплённые на валу электродвигателя. С помощью коммутатора за один оборот вала восемь раз изменялись в подвижных электромагнитах направления тока и полярность, и они поочерёдно притягивались и отталкивались электромагнитами неподвижного диска. Это заставляло вращаться подвижной диск и соединённый с ним вал электродвигателя. В своём электродвигателе изобретатель впервые применил три идеи: вращательное движение вала; коммутатор с трущимися контактами, без которого невозможно обеспечить вращательное движение подвижной обмотки; использование электромагнитов, которые по сравнению с постоянными магнитами дают большую силу притяжения и при сотрясениях и ударах не размагничиваются. Действующая модель его электродвигателя в настоящее время находится в Политехническом музее г. Москвы. По рекомендации кайзера Фридриха Вильгельма III за создание электродвигателя Кёнигсбергский университет присвоил ему степень доктора философии.

Как указывают исследователи, Якоби «без сомнения первым создал практически применимый вращающийся электродвигатель» [12], при этом он однозначно указал в памятной записке в 1835 году, что он не является единственным изобретателем электромагнитного мотора как такового, ссылаясь на приоритет изобретений Джузеппе Доменико Ботто и Сальваторе Даль-Негро [12].



*Почтовый конверт с изображением электродвигателя Якоби из коллекции Политехнического музея.*

Первый электродвигатель Якоби поставил мировой рекорд того времени по своим характеристикам, который удерживался им до 1838 года, когда сам же Якоби улучшил его. Только в 1839—40 гг. другие изобретатели смогли достичь таких же характеристики, а улучшить их смогли только позднее [13].

В 1835 г. Якоби переехал в Дерпт (ныне Тарту, Эстония), стал работать профессором гражданской архитектуры в университете.

В 1837 г. он для своего электродвигателя усовершенствовал гальванический элемент английского изобретателя Дж. Ф. Даниеля, который в 1836 г. поместил медный электрод в раствор медного купороса (сульфат меди), который не взаимодействует с медью. Якоби было предложено у цинкового электрода применять в качестве электролита не раствор серной кислоты, а раствор сульфата цинка, который не взаимодействует с цинком. Деревянный ящик гальванического элемента Даниеля—Якоби, гуммированный асфальтовым цементом, был разделён на две одинаковые части пористой перегородкой из слабо обожжённой глины. В одном отделении сосуда медный электрод находился в растворе медного купороса, в другом цинковый — в растворе сульфата цинка. При замыкании электрической цепи ток шёл от цинкового электрода к медному электроду. При этом гальванический элемент давал не уменьшающееся, а стабильное постоянное напряжение почти один вольт, и, в то время, такая схема нашла широкое применение на практике.

В 1837 г. Якоби принял русское подданство, имя и отчество Борис Семёнович и переехал в Санкт-Петербург для работы в «Комиссии для производства опытов относительно приспособления электромагнитной силы к движению машин по способу профессора Якоби», созданной по ходатайству министра просвещения и президента Российской АН С. С. Уварова.

## НОВЫЙ МОТОР, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ БОТ И БУДУЩИЙ ТРАМВАЙ

В 1838 г. состоялось семичасовое плавание расстоянием 14 км против течения и сильного ветра по Неве и на каналах Санкт-Петербурга судна с 14 пассажирами, гребные колёса которого впервые приводились в движение посредством «магнетизма» созданного Якоби в стенах Санкт-Петербургского университета судового электродвигателя новой конструкции мощностью 0,75 л.с. (552 Вт). Он представлял собой комбинацию 40 небольших электродвигателей, конструктивно объединённых в один агрегат по 20 штук на двух валах высотой 1,2 м, установленных вертикально в деревянной станине длиной 0,9 м и шириной 0,77 м. Вращение вертикальных осей с помощью конических шестерён передавалось на горизонтальную ось, на которой крепились гребные колёса. Для питания током обмоток электромагнитов на судне, названном электрическим ботом, были установлены 320 гальванических элементов. Изменение направления тока в обмотках подвижных электромагнитов осуществлялось коммутаторами, аналогичными по конструкции первому электродвигателю [14].



В другом варианте электродвигатель мог катать по рельсам человека в тележке и явился после работ русского изобретателя Ф. А. Пироцкого [15] прообразом современного трамвая и электропоезда.

Опыты первых применений электромагнетизма к передвижению в больших размерах на электроприводном судне продолжались до 1840 г., пока они не привели учёного к выводу, что решение вопроса о широком применении электродвигателя зависит от создания более ёмкого, надёжного, экономичного и удобного источника тока, чем гальванические батареи. В дальнейшем после создания механических генераторов электродвигатели постоянного тока стали использоваться в регулируемом электроприводе, в крановых и подъёмных установках, в качестве пусковых у двигателей внутреннего сгорания и тяговых (на железнодорожном и морском транспорте, в метро, трамваях, троллейбусах, подводных лодках, на электрокарах). Они обладают большой перегрузочной способностью, могут обеспечить плавное и экономичное регулирование частоты вращения вала от десятков до нескольких тысяч оборотов в минуту, имеют высокое значение пускового вращающего момента при относительно небольшой кратности пускового тока [16, 17 и др.].

## ГАЛЬВАНОПЛАСТИКА

Якоби изучал и усовершенствовал гальванические элементы, применяющиеся для питания электродвигателя. В 1836 г., работая с электродами, он обратил внимание на то, что на отрицательном электроде из-за электролиза, законы которого были открыты в 1833–1834 годах английским учёным М. Фарадеем, оседает тонким ровным слоем медь, которую затем можно было целиком оторвать от электрода. Форма поверхности медного листочка полностью и в точности зеркально воспроизводила все неровности и особенности поверхности электрода. Он применил в качестве отрицательного электрода гравированную дощечку от своей визитной карточки и увидел, что оторванный от электрода листочек представляет собой негативный отпечаток дощечки с надписью. Затем сознательно и очень удачно ему удалось снять копию с монеты, которую сразу уничтожил, чтобы

не посчитали фальшивомонетчиком. Исследователь назвал этот приём гальванопластикой и стал пропагандировать его распространение и применение на практике. В 1838 г. была представлена в Императорскую Санкт-Петербургскую академию наук докладная записка об открытии им гальванопластики, которая позволяет с помощью гальванизма (электролиза медных растворов) получать медные копии изделий с поверхности предметов. Российское правительство купило у учёного идею гальванопластики за 25000 рублей серебром и предложило опубликовать все полученные сведения в открытой печати, чтобы они стали доступны всем. В 1840 г. была опубликована работа Бориса Якоби «Гальванопластика или способ по данным образцам производить медные изделия из медных растворов помощью гальванизма», вначале в «Журнале мануфактур и торговли» (1840 г., № 4), а потом издана отдельной книгой.

Это было обстоятельное практическое руководство, снабжённое чертежами и описанием. Электролитическое осаждение металлов сразу же нашло практическое применение в полиграфии, тканепечатании, медальерном деле и т.д. Оно явилось в дальнейшем основой создания методов нанесения на поверхность предмета из металла, диэлектрика, гипса, воска тонких покрытий восстановленного металла (меди, серебра, золота, цинка, железа, никеля, хрома) с защитной целью от непогоды и других причин — гальваностегии. В середине XIX века в России и за границей возникли крупные гальванотехнические промышленные предприятия, на многих заводах были созданы гальванические мастерские, что послужило началом направления прикладной электрохимии. В Москве и в Санкт-Петербурге с помощью гальванопластики позднее были украшены медью и золотом купола, статуи и барельефы Храма Христа Спасителя, Исаакиевского собора, Эрмитажа, Зимнего дворца, Петропавловского собора, произведены медные копии с форм для печатания государственных бумаг и денег, географических карт, почтовых марок, художественных гравюр, чего нельзя было достигнуть гравировкой клише. Гальванопластика постепенно была внедрена в типографское и монетное дело, а также для производства



## ГАЛЬВАНОПЛАСТИКА

или

ЭЛЕКТРОЛИЗЪ,

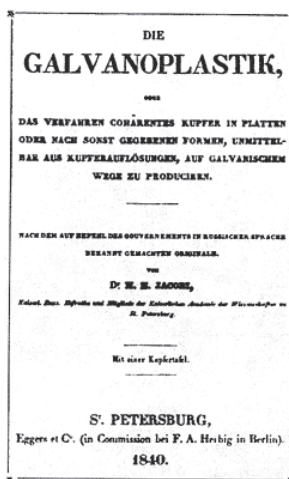
ПО ДАННЫМЪ ОБРАЗЦАМЪ ПРОИЗВО-  
ДИТЬ МѢДНЫЯ ИЗДѢЛІЯ ИЗЪ МѢДНЫХЪ  
РАСТВОРОВЪ, ПОМОЩІЮ ГАЛЬВАНИЗМА

*М. Я. Якоби.*

*Доктора Философіи, Имперскаго Советника и члена ИМ-  
ПЕРАТОРСКОЙ Академіи Наукъ.*

СЪ ДАННЫМЪ ЧЕРТЕЖЕМЪ.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГЪ,  
въ типографіи Н. Глазурова и К°. 1840.



### Обложки трудов Б. Якоби.

художественных изделий в полиграфии (гелиография, гальваногрфия и гальвано-акустика). В 1839 г. за изобретение гальвано-пластики Якоби утвердили в звании адъюнкта (помощника профессора) Императорской Санкт-Петербургской академии наук, в 1840 г. — наградили престижной в то время Демидовской премией в размере 25000 рублей (девятое присуждение), в 1842 г. — избрали экстраординарным (сверхштатным) академиком.

В 1859 г. Бориса Семёновича привлекли к изучению способов обработки платины способом гидроэлектрометаллургии (электроосаждения) и электролитического способа производства бесшовных медных труб.

### «ПОДВОДНЫЕ ОПЫТЫ»

Якоби в составе «Комитета о подводных опытах» с 1839 г. разрабатывал для русского флота и армии противокорабельные морские мины нового типа (плавучие якорные с воздушной камерой в корпусе, гальваноударные самовоспламеняющиеся и с запалом от индукционной катушки, представляющей собой первую искровую систему зажигания высокого напряжения). Занимаясь усовершенствованием методов электрического взрывания мин, он в 1842 г. построил магнитоэлектрический генератор с ручным приводом вращения зубчатой передачей вала катушки якоря в поле постоянных магнитов, в которой наводилась электродвижущая сила. На валу имелось коммутирующее устройство в виде двух полуцилиндров, представляющее собой простейший двухпластинчатый коллектор.

Это был первый магнитоэлектрический генератор, принятый на вооружение гальванических команд в сапёрных батальонах русской армии, использовавших его для дистанционного воспламенения электрическим током минных запалов. В 1847 г. были проведены испытания боевых подводных мин между Кронштадтом и Ораниенбаумом (ныне г. Ломоносов в Ленинградской области). При разомкнутой электрической цепи, соединяющей гальваническую батарею с минами, свои корабли проходили над минами, не подвергаясь опасности. При замкнутой цепи судно, проходя над миной, задевало её. Срабатывал заряд и происходил взрыв. Во время Крымской (восточной) войны в 1853—1856 годах по предложенной им системе был заминирован Кронштадтский рейд, что не позволило английским и французским военным кораблям подойти к морской базе и порту и пройти в Санкт-Петербург.

### СРЕДСТВА СВЯЗИ

Якоби после смерти в 1837 г. создателя электромагнитного телеграфа П. Л. Шиллинга [18] в 1841—1843 годах занялся созданием подземных и подводных кабелей связи, разработкой технологии их производства и подбором электроизоляционных материалов. Позднее это было использовано при осуществлении телеграфной связи из Европы в Америку. Он руководил прокладкой первых телеграфных кабельных линий между Зимним дворцом в Санкт-Петербурге и дворцом в Царском селе (ныне г. Пушкин, спутник Санкт-Пе-





тербурга), с Главным штабом и с Главным управлением путей сообщения. Впервые создал методику для контрольных и эксплуатационных испытаний для поддержания телеграфных линий в рабочем состоянии. Борис Якоби изобрёл также «контр-батарею» для телеграфирования по плохо изолированным проводам и разработал для армии переносной стрелочный телеграфный аппарат, который был принят на вооружение.

Учёным было сконструировано около 10 типов телеграфных аппаратов, в том числе в 1839 г. первый пишущий буквы, а не знаки азбуки Морзе, в 1845 г. первый аппарат синхронного действия с непосредственной (без расшифровки) индикацией в приёмнике передаваемых букв и цифр, а в 1850 г. — первый буквопечатающий телеграфный аппарат. Основными элементами его электроавтоматических и телемеханических устройств были электромагниты и электромагнитные реле. В числе сконструированных им устройств — электромеханический регистратор импульсов в пишущих телеграфах, устройства синхронизированного вращения в стрелочном и буквопечатающем телеграфах, релейные устройства для автоматического замыкания цепи в телеграфных аппаратах. Особенностью пишущего телеграфного аппарата Якоби было то, что вместо мультипликато-

ра в нём использовался электромагнит с медным стержнем, приводивший при помощи системы рычагов в действие карандаш. Передатчик представлял собою ключ, замыкающий и размыкающий электрическую цепь. При притяжении и отпуске якоря стержень с карандашом перемещался вверх и вниз, и карандаш вычерчивал волнистую линию на фарфоровой доске, которая двигалась в горизонтальном направлении перпендикулярно карандашу по каретке под действием часового механизма. Ломаная линия соответствовала определённой азбуке.

На передающей и приёмной станциях буквопечатающего телеграфного аппарата Якоби под действием движущихся электромагнитов синхронно вращались указательные стрелки. Они занимали в каждый момент одинаковое положение над циферблатами с буквами. На одной оси со стрелкой, жёстко связанное с ней, находилось типовое колесо с буквами. Чтобы передать нужную букву, телеграфист при помощи штифта устанавливал стрелку напротив нужной буквы. Одновременно на приёмной станции против той же буквы устанавливалась указательная стрелка вместе с типовым колесом. Электромагниты срабатывали и прижимали к типовому колесу бумажную ленту, на которой отпечатывались нужные буквы одна за другой. Разработанный им в электромагнитном телеграфе принцип синхронно-синфазной связи, когда стрелки передающего и приёмного аппаратов совершают равномерно-прерывистое шаговое движение, перемещаясь с одинаковой скоростью (синхронно) и занимая одинаковое пространственное положение (синфазно), использовали другие изобретатели (Э. В. Сименс, Д. Юз и др.). Немецкая электротехническая фирма «Сименс и Гальске» сразу же организовала серийное производство с некоторыми изменениями его буквопечатающих телеграфных аппаратов и внедрила их в России, Америке и европейских странах. Этот принцип лежит в основе современных буквопечатающих приборов, техники дистанционной передачи и следящего электропривода. В 1854 г. учёный создал телеграфный аппарат для связи на больших переходах между каютой капитана и машинным отделением.

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗА

В то время отсутствовали данные по магнитным свойствам железа. Совместно с академиком Императорской Санкт-Петербургской академии наук Э. Х. Ленцем Якоби в 1838–1844 годах занимался исследованием намагничивания железа, притяжением электромагнитов и предложил методику их расчёта в электрических машинах (применялась до установления в 1871 г. русским физиком А. Г. Столетовым [19] свойств намагничивания мягкого железа). Ленцем и Якоби была установлена пропорциональность действия намагничивания железа силе электрического тока и числу витков (по современной терминологии числу ампер-витков). Они доказали, что магнитный поток, создаваемый в железном стержне электромагнита, не зависит от диаметра витков и диаметра сечения, и материала проволоки.

## ОБРАТНАЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ И МАГНИТОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Якоби открыл появление обратной электродвижущей силы в обмотке якоря двигателя при её вращении и опубликовал две статьи «О принципах электромагнитных машин» (1840 г.) и «О теории электромагнитных машин» (1850 г.), в которых содержался первый научный анализ работы электродвигателя постоянного тока. При теоретическом анализе работы электродвигателя он исходил из законов Ома, сохранения энергии, электромагнитной индукции и из установленных им совместно с Ленцем закономерностей для электромагнитов. Были изучены наиболее важные для характеристик электродвигателя параметры: скорость вращения вала; величина действующих электромагнитных сил; мощность; экономический эффект (по современной терминологии коэффициент полезного действия). В публикациях учёного в точной математической форме показано, что механическая мощность на валу двигателя может быть получена только путём затраты пропорционального количества электрической энергии, а также впервые была выведена формула для магнитодвижущей силы и получено соотношение токов в тормозном и рабочем режимах.

## ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Борис Якоби в 30-х годах XIX века (совместно с Ленцем) разработал баллистический метод электроизмерения магнитных величин, провёл сравнение показаний электромагнитных и электрохимических гальванометров. В 1839 г. им была проведена первая попытка градуировки гальванометра. В 40–50 годах XIX века он создал ртутный вольтаметр (прибор для измерения электрического сопротивления) и несколько конструкций гальванометров. Предложил измерять силу тока по количеству серебра, выделенного из раствора сернокислого серебра (в 1893 г. на Международном электротехническом конгрессе в Париже в основу принятия соответствующей единицы измерения был положен этот принцип), разработал для регулирования силы тока в электрической цепи первые конструкции проволочных и жидкостных реостатов, реохордов, магазинов сопротивлений и других подобных устройств. Созданный им в 1846 г. проволочный медный эталон сопротивления получил распространение в России и в разных странах Европы. В течение ряда лет этот эталон применялся в электротехнических лабораториях, что способствовало разработке мер для воспроизведения физической величины заданного размера.

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ

В 40-х годах XIX века Якоби для созданной учебной гальванической команды разработал программы и провёл первые курсы теоретических и практических занятий в ней по прикладной электротехнике. Учебная гальваническая команда под его руководством в течение 15 лет готовила кадры первых гальванеров в сапёрных частях русской армии и явилась основой, на которой впоследствии выросла русская высшая военная электротехническая школа.

## ЗАСЛУГИ И ДОСТИЖЕНИЯ

В 1847 г. он был избран ординарным (штатным) академиком Императорской Санкт-Петербургской академии наук, а в 1864 г. получил потомственное дворянство и участвовал в комиссии министерства финансов по разработке способов



определения крепости алкогольных напитков. Им был изобретён аппарат для отделения и измерения плотности жидкости различного удельного веса, который нашёл применение в качестве проверочного прибора на винокуренных заводах.

В 1867 г. на Всемирной выставке в Париже Борис Семёнович Якоби был награжден золотой медалью и премией. Он представлял Россию в международной комиссии для выработки общих единиц мер, весов и монет. В том же году его избрали иностранным членом Королевской Бельгийской АН, корреспондентом Общества наук в Роттердаме (Нидерланды), почётным членом Политехнического общества в Лейпциге (Германия), Королевской Туринской академии (Италия), Британского общества для поощрения полезных искусств. С 1865 г., после смерти Ленца, ему было поручено заведовать физическим кабинетом Санкт-Петербургской АН. В 1872 г. в Париже он снова участвовал в качестве русского делегата в работе Международной комиссии по выбору метрической системы единиц измерений, отстаивая её преимущества, что способствовало установлению однообразной системы мер и весов.

Борис Семёнович Якоби умер 11 марта (27 февраля по старому стилю) 1874 г. от сердечного приступа в возрасте 72 лет, похоронен в Санкт-Петербурге на Смоленском лютеранском кладбище на Васильевском острове.

Им были изобретены первый электродвигатель с непосредственным вращением вала, коллекторно-щёточное устройство электрических машин постоянного тока, гальванопластика, стрелочный и электромагнитный и буквопечатающий телеграфные аппараты. Он был членом многих научных учреждений и жюри конкурсов и выставок, проводил экспертизу изобретений, рецензировал статьи и участвовал в научно-общественной жизни своего времени.

В 1889 г. Русским техническим обществом было торжественно отмечено 50-летие со дня изобретения гальванопластики, приравненной по своему значению к открытию книгопечатания, с организацией Юбилейной выставки, на которой демонстрировались магнитоэлектрическая ма-

шина для взрыва мин, телеграфный аппарат, гальванопластические изделия, документы, рукописная автобиография и другие предметы, относящиеся к деятельности учёного.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Литвина О. С. Якоби Борис Семёнович // Новая Российская энциклопедия / Гл. ред. А. Д. Некипелов. — Т. XIX (1). — М.: Энциклопедия, 2017. — С. 401.
2. Цверева Г. К. Якоби Борис Семёнович // Большая Советская энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. — Т. 30. — М.: Советская энциклопедия, 1978. — С. 480.
3. Якоби Борис Семёнович // Большая Советская энциклопедия / Гл. ред. Б. А. Введенский. — Т. 49. — М.: Государственное научное издательство «Большая Советская энциклопедия», 1957. — С. 521—523.
4. Якоби Борис Семёнович (Мориц Герман) // Советский энциклопедический справочник / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1985. — С. 1567.
5. Белькинд А. Д., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А. История техники. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 496 с.
6. Истомин С. В. Самые знаменитые изобретатели России. — М.: Вече, 2000. — 469 с.
7. Шателен М. А. Русские электротехники второй половины XIX века. — М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1949. — 379 с.
8. Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. — 432 с.
9. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Очерки по истории электротехники. — М.: Издательство МЭИ, 1993. — 252 с.
10. Самин Д. К. 100 великих учёных. — М.: Вече, 2000. — 592 с.
11. Якоби Борис Семёнович // Железнодорожный транспорт. Энциклопедия / Гл. ред. Н. С. Канарев. — М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. — С. 557.
12. Doppelbauer M. The invention of the electric motor 1800—1854. A short history of electric motors. Part 1. [Электронный ресурс]: <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>. Доступ 22.05.2019.
13. Jacobi's Motor. The first real electric motor of 1834. [Электронный ресурс]: <https://www.eti.kit.edu/english/1382.php>. Доступ 22.05.2019.
14. Сенаторов В. А. Коллекторный тяговый электродвигатель // Железнодорожный транспорт. Энциклопедия / Гл. ред. Н. С. Канарев. — М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. — С. 187.
15. Григорьев Н. Д. Простота спасёт мир // Мир транспорта. — 2015. — № 1. — С. 244—253.
16. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 3. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. — М.: Энергия, 1968. — 224 с.
17. Электротехника и электроника / Под ред. В. В. Кононенко. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2004. — 752 с.
18. Григорьев Н. Д. Телеграф Шиллинга для железных дорог // Мир транспорта. — 2011. — № 2. — С. 184—190.
19. Григорьев Н. Д. Умножение движущих сил // Мир транспорта. — 2014. — № 3. — С. 238—245. ●





# Boris S. Jacobi



Nikolai D. GRIGORIEV

*Grigoriev, Nikolai D., Ph.D. (Eng.), Moscow, Russia\*.*

## ABSTRACT

185 years ago, in 1834 the first really working and sufficiently powerful electric motor was assembled by the young scientist, Moritz Herman von Jacobi in Königsberg (now Russian city of Kaliningrad).

The article is dedicated to the life and scientific achievements of the scientist who became known under the name of Boris Jacobi after he moved to Russia and took the Russian first name.

His merits, in particular, include development of a method of electroplating, that laid foundation for the entire field of applied electrochemistry. It's worth noting that the scientist revealed the results of the study in publicly available, or, in modern terms, open access publication.

Jacobi worked in different fields. He invented a series of devices to measure electric resistance, called by him

voltagometer (rheochord, or slide-wire). His research activities were also successful in the field of telegraphy, he invented synchronously acting telegraph device with direct (without further decoding) indication of the letters and numbers at the receiver and first ever letter-printing telegraph device, he administered the project of construction of first cable lines in St. Petersburg and between St. Petersburg and Tsarskoe selo (Emperors' residence). Jacobi developed galvanic batteries, anti-ship mines of new type, initiated creation of galvanic teams within pioneer units of the Russian army. Boris Jacobi initiated and managed unitage, establishment of metric system, and of weight and measure standards in Russia.

Thanks to numerous scientific achievements Jacobi received well-deserved recognition of his contemporaries.

**Keywords:** Jacobi, history of transport, electric motor, commutator, electromagnets, galvanic cell, electroplating, galvanoplasty, electrotyping, electrodeposition, mechanical generators, magnetolectric generator, Jacobi telegraph apparatus.

\*Information about the author:

**Grigoriev, Nikolai D.** – Ph.D. (Eng.), Moscow, Russia.

Article received 13.02.2019, accepted 22.05.2019.

**For the original text in Russian please see p. 284.**

The objective of the proposed essay is, using *historical-retrospective and scientific analysis*, to describe life and main research oeuvres of Boris (Moritz Hermann von) Jacobi, prominent scientist in the field of electrical engineering, inventor of the first really working electric motor.

### Early years

Future scientist in the field of electrical engineering, academician of the Imperial Saint Petersburg Academy of Sciences Moritz Herman von Jacobi (since 1837 his name changed for Boris Semyonovich Jacobi) was born on September 21, 1801 in Potsdam (Germany) in a wealthy family of the personal banker of the Kaiser (king) of Prussia Friedrich Wilhelm III [1–9]. He received primary education at home and in the gymnasium. Being 19 years old, the young man entered the University of Berlin, and a year later he moved to the Faculty of Physics and Technology of the University of Göttingen. From 1823, after completing the course and after obtaining a diploma in civil engineering, he worked in Prussia's building department, designing large buildings and supervising their construction in Potsdam. He developed projects for a large road bridge and a canal to regulate river waters near the city of Oranienburg. In 1829, after his admission to the «Union for Promotion of Industrial Activities in Prussia», he was given the title of the architect.

### Electric motors

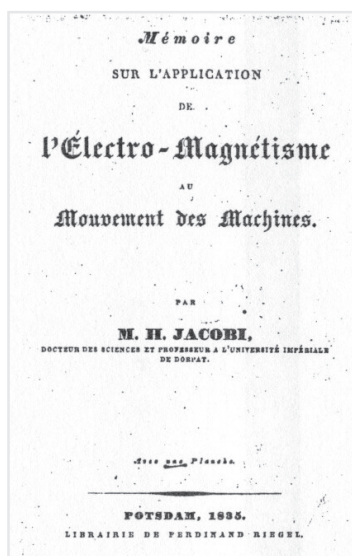
In 1833, Jacobi moved to Königsberg (now Kaliningrad) and became interested in the theory and practice of electromagnetism, then

quite a new branch of knowledge, that was developed thanks to the contribution of many famous and, regretfully, now less known scientists and inventors, comprising Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Gerolamo Umberto Volta, Dominique François Jean Arago, Michael Faraday, André-Marie Ampère, Hans Christian Oersted, Peter Barlow, William Sturgeon, Istvan (Ányos) Jedlik, Andreas von Baumgartner, Joseph Henry, Savatore dal Negro, Hippolyte Pixii, William Sturgeon, Heinrich Friedrich Emil Lenz, William Ritchie. It was just in 1833 that W. Ritchie in his article «Experimental Studies on Electromagnetism and Magnetoelectricity» described a device in which using a stationary horseshoe magnet he managed to obtain rotational movement around the vertical axis of the electromagnet (iron band wrapped in wire) during a pole shift. Jacobi expressed his opinion about one of similar devices, by saying that «such device will be only a toy for physics laboratories, it can't be used for wider range of purposes with whatever profitability».

In 1834 Jacobi assembled electric motor (magnetic apparatus) of the original design with continuous rotation of the shaft at a frequency of 80–120 revolutions per minute and power of 15 W. This was of fundamental importance, since a scheme of reciprocating piston motion or jiggling oscillations of a movable working part was customary for the design of steam and electrical installations common at that time. At that time, the inventors proposed using the engine to move oars or skulls, to replace rowers or create a moving mechanism that mimics movement of a horse's legs.

He first reported about his electric motor in 1834 in the works of Paris Academy of Sciences in «Note on a magnetic machine in which magnetism is used as a motor force», and a detailed description entitled «Memoirs on application of electromagnetic force to machine motion» was published in Potsdam and in the works of Russian Imperial Academy of Science.

His electric motor, based on the principle of gravitation and repulsion between sets of U-shaped electromagnets, worked from a battery of 69 galvanic cells invented by English scientist W. R. Grove and consisted of two groups of electromagnets with 8 rods of soft iron 7 inches (177,8 mm) long and 1 inch (25,4 mm) thick, wrapped with 320 feet (96 m) of copper wire with a diameter of one-

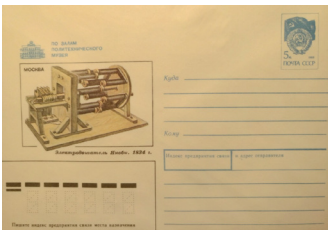


Lifetime edition of the work of B. Jacobi.

fourth line (3,17 mm) and located on two discs (one group was fixed on the frame, and the other rotated around axis). The groups were located at right angles and symmetrically one to the other in such a way that the poles opposed one another. The windings of stationary electromagnets were connected in series. The current in them had the same direction. For alternately changing polarity of the supplied current of moving electromagnets, Jacobi invented the commutator (circuit changer), the design principles of which are used up to now in the collector of traction electric motors for transport [10; 11, etc.].

The commutator consisted of four metal rings mounted on a shaft and isolated from it. Each ring with four cuts, one eighth of the circumference, filled with insulating inlays, was shifted by 45 degrees from the previous one. Along the smooth and polished circumference of the ring, a lever slid, which was a kind of brush, the second end of which was immersed in a vessel with mercury connected by conductors to a galvanic battery. Conductors, mounted on the motor shaft, departed from the rings to the windings of electromagnets of the rotating disk, connected in series. With the help of the commutator, during one revolution of the shaft, the direction of current and polarity changed eight times in mobile electromagnets, and they were alternately attracted and repelled by electromagnets of a fixed disk. This forced the rotating disk and the motor shaft connected to it to rotate. In his electric motor, the inventor for the first time applied three ideas: rotational movement of the shaft; commutator with rubbing contacts, without which it is impossible to ensure rotational movement of the moving winding; use of electromagnets, which, in comparison with permanent magnets, give a greater force of attraction and are not demagnetized in case of jolts and impacts. The acting model of his electric motor is currently located in Moscow Polytechnic Museum. On the recommendation of the Kaiser Friedrich Wilhelm III the University of Königsberg awarded him a Ph.D. for creation of an electric motor.

According to researchers, Jacobi is «undoubtedly the first to create a usable rotating electric motor» [12]. However, he expressly claimed in the memorandum of 1835 that «he was not the sole inventor of the electromagnetic motor itself», referring to the



**Post envelope with the image of Jacobi's motor from the collection of Moscow Polytechnic Museum.**

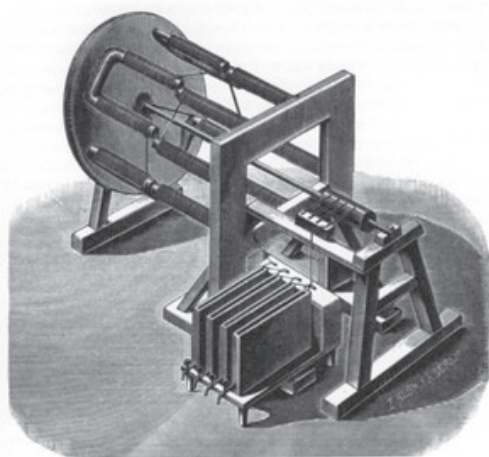
«priority of the inventions of Guiseppe Domenico Botto and of S. Dal Negro» [12]. «The first electric motor set a world record in performance that stood for four years and was improved in September 1838 only by Jacobi himself. It was not before 1839–1840 when other developers worldwide managed to build motors of similar and later also of higher performance» [13].

In 1835, Jacobi moved to Dorpat (now Tartu, Estonia) and started working as a professor of civil architecture at the university.

In 1837, for his electric motor, he improved a galvanic cell of the English inventor John Frederick Daniell, who in 1836 placed a copper electrode in a solution of blue vitriol (copper sulfate), which does not interact with copper. Jacobi proposed to use for zinc electrode not a solution of sulfuric acid as an electrolyte, but a solution of zinc sulphate, which does not interact with zinc. The wooden box of Daniell–Jacobi galvanic cells, gummed with asphalt cement, was divided into two equal parts by a porous partition of weakly burned clay. In one compartment of the vessel, the copper electrode was in a solution of copper sulphate, in the other, zinc electrode was in a solution of zinc sulphate. The current in the electrical circuit was flowing from the zinc electrode to the copper electrode. In this case, the galvanic element gave not decreasing, but a stable constant voltage of almost one volt and found wide application in practice.

In 1837, Jacobi was naturalized in Russian Empire, changed the name and patronymic for Boris Semyonovich, and moved to St. Petersburg to work in the «Commission for production of experiments on adaptation of electromagnetic force to movement of machines following the method of Professor Jacobi», created at the request of the Minister of Education and President of the Imperial Saint Petersburg Academy of Sciences Sergey Uvarov.





*First usable rotating electric motor of Jacob [12; <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>].*

### **New motor, electric boat, and future tram**

In 1838 a vessel with 14 passengers made a seven-hour voyage for a distance of 14 km against the current and strong wind along the Neva and on the canals of St. Petersburg. Its rowing wheels for the first time were driven by «magnetism» of the vessel's electric 0,75 hp (552 W) motor created by Jacob in St. Petersburg University. It was a combination of 40 small electric motors, structurally combined into one unit of 20 pieces on two shafts 1,2 m high, installed vertically in a wooden frame 0,9 m long and 0,77 m wide. The rotation of vertical axes with the help of bevel gears was transferred to the horizontal axis, to which the rowing wheels were attached. 320 galvanic cells were installed to power the windings of the electromagnets on a vessel called an «electric boat». Changing the direction of current in the windings of movable electromagnets was carried out by commutators, similar in design to those of his first electric motor [14].

Another embodiment of the electric motor could help to drive a person in a cart along the rails, that application of the electric motor after the works of the Russian inventor F. A. Pirotsky [15] appeared to be a prototype of the modern tram and electric train.

Experiments on the use of electromagnetism on a larger electrically driven vessel continued until 1840, until they led the scientist to conclude that the solution to the issue of widespread introduction of electric motors depends on creating a more capacious, reliable, economical and convenient current source than

galvanic batteries could be at that time. Subsequently, after creation of mechanical generators, direct current electric motors began to be used in a regulated electric drive, in crane and lifting installations, as starter motors for internal combustion engines and for traction (on railway and sea transport, in the subway, for trams, trolley buses, submarines and electric cars). They have a large overload capacity, can provide smooth and economical regulation of the shaft rotational speed from tens to several thousand revolutions per minute, have a high starting torque value with a relatively small starting current ratio [16; 17 and others].

### **Galvanoplasty\***

Jacobi studied and improved the galvanic cells used to power the electric motor. In 1836, while working with the cell, he paid attention to the fact that because of electrolysis, the laws of which were discovered in 1833–1834 by the English scientist Michael Faraday, a thin even layer of copper settles on the negative electrode, and that this layer could then be completely detached from the electrode. The shape of the surface of the copper leaf completely and exactly mirrored all the irregularities and surface features of the electrode. He applied an engraved plate, used to print his business card, as a negative electrode and saw that the leaf cut off from the electrode was a negative imprint of a plate with an inscription. Then, consciously and very successfully, he managed to make a copy of the metal coin, which he destroyed following the advice of his colleagues, so as not to be considered a counterfeiter. The researcher called this technique galvanoplasty and began to promote its dissemination and implementation.

In 1838, he presented to the Imperial St. Petersburg Academy of Sciences a memorandum on his discovery of galvanoplasty,

\* The use of different terms referring to the topic of this chapter can be subject to further discussion and research as galvanoplasty is currently often referred to as galvanoplastics, electroplating, and depending on the sources those terms (and their derivatives, e.g. electrotyping, electroforming, electrodeposition) are assumed to be synonymous or to have nuances regarding their use. As this issue is not considered in the article, we do prefer to use the term «galvanoplasty» in the article as in historical context it is closer to the original Russian term initially used in Jacob's works to describe the method to reproduce copies of engraved copper-plates by voltaic (galvanic) action (the term «galvanoplasty» or «galvanoplastics» in its Cyrillic form is used in Russian language till now), and the more modern term of electroplating. – *Ed. note.*



## ГАЛЬВАНОПЛАСТИКА

или

### СПОСОБЪ,

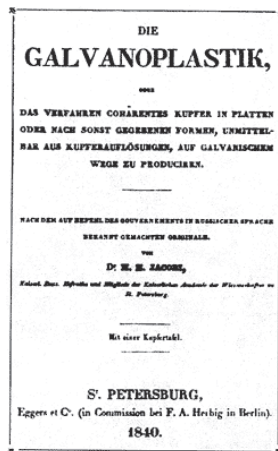
ПО ДАННЫМЪ ОБРАЗЦАМЪ ПРОИЗВО-  
ДИТЬ МѢДНЫЯ ИЗДѢЛІЯ ИЗЪ МѢДНЫХЪ  
РАСТВОРОВЪ, ПОМОЩІЮ ГАЛЬВАНИЗМА

**М. В. Якоби.**

*Доктора Философіи, Имперіалъ Сопольнаго и члена ИМ.  
ИМПЕРАТОРСКОЙ Академіи Наукъ.*

СЪ ОДНѢМЪ ЧЕРТЕЖЕМЪ.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГЪ,  
ВЪ ТИПОГРАФИИ Н. ГЛАДКОВА и К°. 1840.



Covers of scientific  
works of B. Jacobi.

which allows using galvanic effect (electrolysis of copper solutions) to obtain copper copies of the surface of objects. The Russian government bought from him the idea of galvanoplasty for 25,000 rubles in silver and offered to publish all the information received in the open accessed press so that it became accessible to everyone.

In 1840 his work «Galvanoplasty or the method of producing copper items using given samples from copper solutions using voltaic action» was published in the «Journal of Manufactures and Trade» (1840, No. 4), and then as a separate book.

It was a thorough practical guide, supplied with drawings and descriptions. Electrolytic deposition of metals immediately found practical application in printing, fabric printing, medal making, etc. It later became the basis for creating methods for coating the surface of metal, dielectric, gypsum, wax items with thin layer of reduced metal (copper, silver, gold, zinc, iron, nickel, chromium) in order to protect it from bad weather and other negative factors which further was called electrodeposition.

In the middle of the 19<sup>th</sup> century, large electroplating industrial enterprises arose in Russia and abroad, electroplating workshops were established at many factories, which marked the beginning of a new direction in applied electrochemistry. With the help of electroplating, Moscow and St. Petersburg's domes, statues and bas-reliefs of the Cathedral of Christ the Savior, St. Isaac's Cathedral, the Hermitage, the Winter Palace, the Peter and Paul Cathedral were later decorated with copper and gold. Copper copies were made from printing forms of state papers and

banknotes, geographical maps, postage stamps, artistic engravings, which could not be achieved by engraving cliché (stereotypes). Electroplating was gradually introduced into printing and coinage, as well as into publishing of artistic products in the printing industry (heliography, galvanography (electrotyping), and galvanocautery). In recognition of his invention of galvanoplasty Jacobi was approved as adjunct (assistant professor) of the Imperial St. Petersburg Academy of Science in 1839, he was awarded with the prestigious Demidov Prize of 25 000 rubles (he was only ninth person to be awarded that prize) in 1840, and then he was elected extraordinary (supernumerary) academician in 1842.

In 1859, he was invited to study the methods for processing platinum by the method of hydro electrometallurgy (electrodeposition) and the electrolytic method of producing seamless copper pipes.

### «Underwater experiments»

Jacobi from 1839 made part of the «Committee on Underwater Experiments» and developed anti-ship sea-mines of a new type for the Russian fleet and army (floating anchored mines with an air chamber in the hull, mines with self-igniting galvanized impactors and a fuse from an induction coil, which was the first high-voltage spark system). Being engaged in improvement of electric blasting of mines, he built in 1842 a magnetoelectric generator with a manual drive of rotation of a shaft of the armature coil by a tooth gear located in the field of permanent magnets, in which an electromotive force was induced. There was a switching device on the shaft in the form of two half-cylinders, representing the simplest two-





plate collector. It was the first magnetoelectric generator, adopted for the use of «galvanic teams» in the sapper battalions of the Russian army, which used it for remote ignition of minefields by electric current.

In 1847, underwater mines were tested in the area between Kronstadt and Oranienbaum (now the city of Lomonosov in Leningrad Region). With an open electric circuit connecting the galvanic battery with the mines, the friendly ships passed over the mines without danger. With a closed circuit, the ship, passing over a mine, touched it, a charge was ignited and an explosion occurred. During the Crimean (Eastern) War in 1853–1856, according to the proposed system, Kronstadt raid was mined, which did not allow British and French warships to approach the naval base and port, either St. Petersburg.

#### **Communication**

Jacobi after the death in 1837 of Pavel L. Schilling, the creator of the electromagnetic telegraph [18], in 1841–1843 was engaged in creation of underground and underwater communication cables, development of the technology of their production and selection of electrical insulating materials. Later they were used in organization of telegraph communications from Europe to America. He supervised the laying of the first telegraph cable lines between the Winter Palace in St. Petersburg and the palace in Tsarskoye Selo (now Pushkin, satellite city of St. Petersburg), he in collaboration with the General Staff and with

the General Directorate of Communications for the first time created a methodology for control and operational tests for maintaining telegraph lines in working condition.

Jacobi also invented «contrbattery»\*\* (as he called it) to smuggle telegraphs over poorly insulated wires and developed a portable switchgear telegraph for the army, which was brought into service. He designed about 10 types of telegraph devices, including the first one writing letters and not Morse code in 1839, the first device of synchronous action with direct (without decoding) indication in the receiver of transmitted letters and numbers in 1845, and the first direct-printing telegraph device in 1850.

Electromagnets and electromagnetic relays constituted core elements of his simplest electro-automatic and telemechanical devices, comprising an electromechanical recorder of pulses in writing telegraphs, synchronized rotation devices in the switch and direct-printing telegraphs, relay devices for automatic circuit closing in telegraph devices. The peculiarity of his writing telegraph device was that instead of a multiplier it used an electromagnet with a copper rod, which powered a pencil system using levers. The transmitter was designed as a key, closing and opening the electrical circuit. During attraction and release of the anchor, the rod with a pencil moved up and down, and the pencil traced a wavy line on the porcelain board, which moved in a horizontal direction perpendicular to the pencil along the carriage under the action of a clock mechanism. A broken line corresponded to a specific alphabet.

The transmitting and receiving stations of the direct-printing Jacobi telegraph devices had pointing arrows synchronously rotating under the action of moving electromagnets. At each moment they occupied the same position over the dials with letters. On one axis with an arrow, there was a typical wheel with letters rigidly connected with it. To transmit the desired letter, the telegraph operator used a pin to set the arrow opposite the desired letter. At the same time, at the receiving station, an index arrow

\*\* Polarized platinum battery, that is switched to the circuit in such a manner that after extinction of telegraph signal the battery sends the current into the line oppositely to incoming extra current, so that to neutralize the impact of the latter on the line electromagnet of the receiving station station. – *Ed. note.*

was installed against the same letter, along with a typical wheel. The electromagnets worked and they pressed paper tape to the standard wheel, on which the necessary letters were printed one by one. The principle of synchronous-phase communication developed by him in the electromagnetic telegraph, when the arrows of the transmitting and receiving devices perform uniformly intermittent step motion, moving at the same speed (synchronously) and occupying the same spatial position (in phase), was used by other inventors (Ernst Werner von Siemens, David Edward Hughes, etc.). The German electrical engineering firm «Siemens and Halske» immediately organized mass production with some changes to its direct-printing telegraph devices and introduced them in Russia, America and European countries. This principle is the basis of modern direct printing devices, remote transmission technology and tracking electric drive.

In 1854, the scientist created a telegraph apparatus for communication during long passages between the captain's cabin and the engine room.

#### **Magnetic properties of iron**

At that time, there were no data on magnetic properties of iron. In 1838–1844, together with Academician of the Imperial St. Petersburg Academy of Sciences E. K. Lenz, Jacobi studied iron magnetization, attraction of electromagnets, and proposed a method for calculating them in electrical machines (used until Russian physicist A. Stoletov found in 1871 [19] magnetization properties of soft iron). Jacobi and Lenz determined proportionality of magnetization of iron to the electric current and the number of turns (according to modern terminology, the number of ampere-turns). They proved that the magnetic flux generated in the iron rod of an electromagnet does not depend on the diameter of coils and the diameter, cross-section and material of the wire.

#### **Back electromotive force and magnetomotive force**

Jacobi discovered the appearance of a back electromotive force in the motor armature winding during its rotation and in 1840 and in 1850 published the articles «On the Principles of Electromagnetic Machines» and «On the Theory of Electromagnetic Machines», which contained the first scientific analysis of the operation of a DC motor. In the theoretical

analysis of operation of an electric motor, he proceeded from the laws of conservation of energy and of electromagnetic induction, of Ohm's law, and from the laws established by him and Lenz for electromagnets. He studied the parameters that determined the action of an electric motor and were most important for its characteristics: shaft rotation speed; the magnitude of the acting electromagnetic forces; power; economic effect (according to modern terminology – efficiency factor). He showed in the publications in exact mathematical form that the mechanical power on the motor shaft can only be obtained at the expense of a proportional amount of electrical energy. Also for the first time a formula for the magnetomotive force was derived and the ratio of currents in the braking and operating modes was obtained.

#### **Measurement of magnetic values**

Jacobi in the 30s of 19<sup>th</sup> century (together with Lenz) developed a ballistic method of electrical measurements of magnetic quantities, compared the readings of electromagnetic and electrochemical galvanometers. In 1839 he carried out the first attempt to calibrate a galvanometer. In the years 1840–1850, he created a mercury «voltagometer» (a device for measuring electrical resistance) and several designs of galvanometers. He proposed to measure the current strength according to the amount of silver extracted from silver sulphate solution (the measurement unit based on this approach was adopted in 1893 at the International Electrotechnical Congress in Paris), developed the first wire and liquid resistors, rheochords, resistance stores and other similar devices. The wire copper standard of resistance created by him in 1846 became widespread in Russia and in different countries of Europe. For several years, this standard had been used in electrical laboratories, contributing to develop measures to reproduce the physical quantity of a given size.

#### **Education and training programs**

In the 1840s, Jacobi developed programs for created «learning galvanic team» and conducted the first courses of theoretical and practical classes in applied electrical engineering. The «learning galvanic team» under his leadership for 15 years trained the staff of the first galvanizers in the sapper units of the Russian army and was the basis on which the Russian higher military electrical engineering school subsequently grew.





### Achievements and merits

In 1847, he was elected an ordinary (full-time) academician of the Imperial Saint Petersburg Academy of Science, and in 1864 he received hereditary nobility.

He participated in the commission of the Ministry of Finance to develop ways to determine the strength of alcoholic beverages. He invented an apparatus for separating and measuring the density of liquids of various specific gravities, which found use as a test instrument in distilleries.

In 1867, Jacobi was awarded the Grand Gold Medal and the prize at the World Fair in Paris, where he represented Russia in an international commission to work out common units of measures, weights and coins. The same year, he was elected a foreign member of the Royal Belgian Academy, a correspondent member to the Society of Sciences in Rotterdam (Netherlands), an honorary member of the Polytechnic Society in Leipzig (Germany), the Turin Royal Academy of Sciences (Italy), and the British Society for Promotion of Useful Arts. From 1865, after the death of Lenz, he was entrusted with management of the office of physics of the Imperial St. Petersburg Academy of Science. In 1872, he participated in Paris as a Russian delegate in the work of the International Commission on the choice of a metric system of units, defending its advantages, which contributed to establishment of a uniform system of weights and measures.

Boris Semyonovich Jacobi died on March 11 (on February 27, Julian date used in Russia at that time) 1874 from a heart attack at the age of 72, and was buried in St. Petersburg at the Smolensk Lutheran cemetery on Vasilyevsky Island.

He invented the first electric motor with direct rotation of the shaft, the collector-brush device of electric machines of direct current, galvanoplasty (electroplating), switch, electromagnetic and direct-printing telegraph devices. He was a member of many scientific institutions and of a jury of contests and exhibitions, conducted an examination of inventions, reviewed articles and participated in the scientific and public life of his time.

In 1889, the Russian Technical Society solemnly celebrated the 50<sup>th</sup> anniversary of the invention of galvanoplasty, «equated in its significance to the opening of printing», organized the Jubilee exhibition, where demonstrated a magnetoelectric mine explosion

machine, telegraph device, electroformed products, documents, handwritten autobiography and other exhibits referred to the activities of the scientist.

### REFERENCES

1. Litvina, O. S. Jacobi Boris Semyonovich. In: New Russian Encyclopedia. Ch. ed. Nekipelov, A. D., Vol. 19 (1). Moscow, Encyclopedia publ., 2017, p. 401.
2. Tserava, G. K. Jacobi Boris Semyonovich. In: Great Soviet Encyclopedia. Ch. ed. Prokhorov, A. M. Vol. 30. Moscow, Soviet Encyclopedia publ., 1978, p. 480.
3. Jacobi Boris Semyonovich. In: Big Soviet Encyclopedia. Ch. ed. Vvedensky, B. A. Vol. 49. Moscow, State Scientific Publishing House «Big Soviet Encyclopedia», 1957, pp. 521–523.
4. Jacobi Boris Semyonovich (Moritz Herman). In: Soviet Encyclopedic Reference. Ch. ed. Prokhorov, A. M. Moscow, Soviet Encyclopedia publ., 1985, p. 1567.
5. Belkind, A. D., Konfederatov, I. Ya., Shneiberg, Ya. A. History of Engineering [*Istoriya tekhniki*]. Moscow, Gosenergoizdat publ., 1956, 496 p.
6. Istomin, S. V. The most famous inventors of Russia [*Samie znamenitye izobretateli Rossii*]. Moscow, Vechepubl., 2000, 469 p.
7. Shatelen, M. A. Russian electrical engineers of the second half of 19<sup>th</sup> century [*Russkie elektrotekniki vtoroi poloviny XIX veka*]. Moscow–Leningrad, State Energy Publishing House, 1949, 379 p.
8. Shatelen, M. A. Russian electrical engineers 19<sup>th</sup> century [*Russkie elektrotekniki XIX veka*]. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat publ., 1955, 432 p.
9. Veselovsky, O. N., Shneiberg, Ya. A. Essays on the history of electrical engineering [*Ocherki po istorii elektrotekhniki*]. Moscow, Publishing house MEI, 1993, 252 p.
10. Samin, D. K. 100 great scientists [*100 velikikh uchenykh*]. Moscow, Vechepubl., 2000, 592 p.
11. Jacobi Boris Semyonovich. In: Railway transport. Encyclopedia. Ch. ed. Kanarev, N. S. Moscow, Scientific publishing house «Big Russian Encyclopedia», 1994, p. 557.
12. Doppelbauer, M. The invention of the electric motor 1800–1854. A short history of electric motors. Part 1. [Electronic resource]: <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>. Last accessed 22.05.2019.
13. Jacobi's Motor. The first real electric motor of 1834. [Electronic resource]: <https://www.eti.kit.edu/english/1382.php>. Last accessed 22.05.2019.
14. Senatorov, V. A. Collector traction motor [*Kollektorniy tyagoviy elektrodvigatel'*]. Railway Transport. Encyclopedia. Ch. ed. Kanarev, N. S. Moscow, Scientific publishing house «Big Russian Encyclopedia», 1994, p. 187.
15. Grigoriev, N. D. Simplicity will save the world. *World of Transport and Transportation*, Vol. 13, 2015, Iss. 1, pp. 244–253.
16. Petrov, G. N. Electric machines. Part 3. Collector machines of direct and alternating current [*Kollektornye mashiny postoyannogo i peremennogo toka*]. Moscow, Energia publ., 1968, 224 p.
17. Electrical Engineering and Electronics [*Elektrotekhnika i elektronika*]. Ed. by Kononenko, V. V. Rostov-on-Don, Phoenix publ., 2004, 752 p.
18. Grigoriev, N. D. The Schilling Telegraph for Railways. *World of Transport and Transportation*, Vol. 9, 2011, Iss. 2, pp. 184–190.
19. Grigoriev, N. D. Multiplication of driving forces. *World of Transport and Transportation*, Vol. 12, 2014, Iss. 3, pp. 238–245. ●





## УПРАВЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛОМ 110 ЛЕТ НАЗАД

**Кадровый вопрос на железных дорогах 110 лет назад: молодые специалисты, практика, взаимодействие дорог с вузами... Многие решения можно смело позаимствовать и сегодня, и этот материал мог бы быть помещён в раздел, посвящённый образованию и кадрам. Особенно это касается предложений, связанных с мотивацией сотрудников.**

**Что нужно для улучшения личного состава служащих на железных дорогах?** — Этот вопрос, составляющий предмет особой анкеты, предпринятой в последнее время на многих железных дорогах, побуждает меня высказать и свой взгляд по этому предмету.

Вопрос коснулся, главным образом, служащих по службе движения. Господствующее мнение склонно видеть причину неудовлетворительной службы этих агентов в отсутствии или недостатке образовательного ценза. В поднятии образовательного уровня видят панацею для искоренения болезни. Мне кажется, что корень зла нужно искать гораздо глубже, и что нужен целый ряд других мер как для улучшения подбора служащих, так и для пробуждения в них самостоятельности и сознательного отношения к делу.

Перехожу, в частности, к возникшему на некоторых дорогах предположению замещать должности начальников станций и их помощников только лицами, имеющими образовательный ценз не ниже курса средних учебных заведений и, сверх того, аттестованными учебными заведениями. Я сомневаюсь, во-первых, в том, чтобы на эти должности при существующих условиях службы и вознаграждения, явился достаточный контингент таких кандидатов; во-вторых, если имеется в виду привлечь на упомянутые ответственные должности молодых людей прямо со школьной скамьи, то вряд ли польза от изучения ими предметов программы уравнивает тот риск и вред для службы, которые, несомненно, будет представлять отсутствие у этих юношей не только служебного, но и просто житейского опыта, такта и уравновешенно-

сти для деловых сношений с публикой и для распорядительных действий, от которых нередко зависит безопасность движения поездов; в-третьих, если обширный контингент младших служащих-контормщиков, телеграфистов и прочих, независимо от их способностей и деловых качеств, лишит перспективы повышения по службе, дав дорогу учебным дипломам и аттестатам, то может получиться в результате, что способные, даровитые самородки, с царём в голове, но без аттестата в кармане, которые до сего времени на железнодорожной службе встречаются чаще, чем на всяком другом поприще, — все они будут уходить с железной дороги в другие области труда, где ценятся только деловые качества, вне зависимости от того, достигнуты ли они школьным путём или путём самообразования и саморазвития. На каждой железной дороге и в настоящее время в личном составе служащих есть достаточный запас людей с образовательным цензом, но если зачастую при передвижении по службе они остаются позади, то не следует ли в этом усмотреть только закон свободной конкуренции, естественно выдвигающий вперёд людей труда, инициативы и деловых способностей. Если ввести покровительство учебным аттестатам, то, конечно, роли переменятся, но вряд ли такое повышение образовательного ценза будет способствовать улучшению качественно-го уровня служащих.

Зло не только железных дорог, но и всех других предприятий и ведомств в нашем отечестве, заключается не столько в недостатке образовательного ценза, сколько в недостаточной высоте нравственного уровня служащих; не достаёт



не дипломов, но гораздо более важного: честности, трудолюбия и инициативы. И вряд ли Правления и Управления железных дорог могут позавидовать в этом отношении другим ведомствам, где процветает система дипломов. Достаточно указать на наши привилегированные морское или военное ведомства, на весь высший чиновный мир «двадцатого числа», — везде мы видим полное отсутствие самостоятельности, беспечность, фактическое невежество и хищническое отношение к интересам казны.

Итак, по моему мнению, введение обязательного общеобразовательного школьного ценза для служащих на дорогах вряд ли будет способствовать повышению качественного подбора служащих; гораздо важнее было бы для интересов службы учреждение особых экзаменационных комиссий при Управлениях дорог, для испытания путём собеседования, служебных, специальных и отчасти общих знаний лиц, представляемых к повышению по службе. Такие экзамены дали бы возможность Управлению дороги проверять аттестации ближайшего начальства и коллегиальным способом производить оценку не только деловых способностей служащего, но и общего его развития, для определения степени пригодности его для занятия высшей должности.

Затем было бы весьма полезно введение особых секретных ежегодных аттестаций ближайшего начальства: Начальников Отделения, Начальников станции — о каждом из подчинённых им служащих в отношении их нравственности, трудолюбия, самостоятельности и проч. Аттестации эти могли бы заключаться в ответах на вопросы, выработанные Управлением дороги, на бланках особых аттестационных листов и — для удобства сопоставлений и сравнений — могли бы быть выражены по цифровой балльной системе. Эти отметки, производимые периодически разными начальствующими лицами, в виду перехода служащего со станции на станцию или из одного отделения в другое (что следовало бы в интересах дела и правильной оценки служащего делать возможно чаще), и заносямые в послужные списки служа-

щих, — давали бы Управлению ясное представление о сравнительных качествах всех служащих и служили бы критерием для выбора кандидатов на повышение по службе, причём, конечно, должен был бы — наряду с другими факторами оценки — приниматься во внимание и образовательный ценз.

Весьма важен также сам способ оценки служащего в отношении его деловых качеств. Несправедливо и нецелесообразно, разумеется, составлять мнение о служащем по выгодному внешнему впечатлению и по бойкости ответов на поставленные вопросы при проезде начальства по линии; важно судить не по виду и словам, а по делам. Для оценки деятельности старших, ответственных агентов самым рациональным, по моему мнению, был бы способ статистический, в виде всесторонних записей о деятельности каждой станции, каждого отделения. Так, например: о простое вагонов и поездов, о количестве недостат и порчи грузов, о числе происшествий по вине служащих эксплуатации, о числе принесённых жалоб со стороны пассажиров и грузовладельцев, о количестве выправок контроля сборов, о числе замечаний, сделанных контролёрами всяких наименований (движения, станционного счетоводства) и прочего. Все эти записи, приведённые в цифровое соответствие с размерами технической и коммерческой работы станции или отделения и выраженные в определённом от сводки деятельности всех станций и всех отделений виде, — представляли бы наилучший показатель степени успешности работы данной учётной единицы (станции, отделения), а, следовательно, и служили бы беспристрастной характеристикой деятельности ответственных агентов, заведующих этими единицами.

Но кроме оценки деловых качеств служащих, такой способ мог бы послужить для введения разнообразных премировок, с соответствующими вычетами при уклонении от определённых норм. Правильно и рационально организованная статистика и учёт в обширных предприятиях заменяет хозяйский глаз, премировка же, являясь видом участия служащего в прибылях, зависящих от успешного и хозяйственного отношения к делу,

превращает работника в хозяина. Вот почему ни повышение окладов жалования, ни выдача наградных денег каждый раз по усмотрению и расположению начальства, часто зависящим от случайных причин, никогда не достигают того эффекта, который получается от правильно и целесообразно поставленной премировки, когда служащий в каждом лишнем часе простоя или непроизводительного пробега вагона, в каждом пропавшем пуде груза, в каждом повреждении подвижного состава или другого имущества дороги — с чисто хозяйской болью в сердце видит свой личный ущерб. Превращая служащего в хозяина, администрация избавляется от необходимости напоминаний, понуждений и угроз, требующих долгих, неприятных и, в большинстве случаев, недостигающих цели ежедневных переговоров со станциями по аппарату об ускорении погрузки, выгрузки и возврата вагонов, щитов и прочего. Личная материальная заинтересованность начальников станций в наиболее быстром обороте вагонов, грузов, щитов и проч. и неумолимый точный цифровой учёт этого оборота, несомненно, явятся значительно большей гарантией успеха дела, нежели унижающие достоинство старших агентов ежедневные напоминания им об обязанностях, в предположении — авось это подействует и заставит их сделать возможно большее.

Введение премий требует, однако же, большой обдуманности, строгой плановости и предварительного тщательного изучения всех особенностей каждой станции, способствующих или, наоборот, неблагоприятствующих нормальному ходу данного дела. Несоблюдение этих условий весьма часто приводит к неуспеху премировки, заставляющему администрацию разочаровываться в самом принципе премий, между тем как неуспех этот объясняется или несоответственным применением измерителя данной функции, или же назначением слишком высоких, или непомерно низких норм, не отвечающих условиям фактической средней работы, или, наконец, нецелесообразным распределением премий между участниками, по произволу и усмотрению начальства, вместо точного учёта инди-

видуальной работы, математически определяющего долю каждого участника.

Долголетняя служебная практика представляет, по моему мнению, одну из главнейших гарантий полезности служащего, его нравственной надёжности и привязанности к делу. Глубоко ошибочным представляется мне мнение многих, что служащий с течением времени службы обращается в выжатый лимон, который затем остаётся только выбросить. Если с годами энергия его, действительно, убывает, зато эта убыль с избытком компенсируется накоплением служебно-административного и житейского опыта и такта, которые помогают ему с наименьшей затратой энергии достигать наибольшей производительности и полезности своих действий, избегая тех ошибок и промахов, которые неизбежны у начинающего деятеля, полного энергии, направляемой зачастую на совершенно бесполезную и напрасную ломку, на излишние трения, обостряющие лишь отношения с представителями других служб и ведомств и отвлекающие его труд и внимание в сторону совершенно непроизводительной и даже вредной работы.

Вот почему я полагаю, что старослужащие являются весьма ценным элементом личного состава железнодорожной службы и что в интересах дороги следует всемерно поощрять наиболее продолжительную службу своих агентов, укрепляя не только личную, но и потомственную связь их с дорогой, для чего важно распространять заботы на их семейства, на воспитание их детей и на преимущественное предоставление последним службы на дороге. В этих видах весьма полезно было бы увеличить число железнодорожных средних и низших школ и расширить их программу, введя в таковую преподавание специальных предметов железнодорожного дела, с целью подготовки детей служащих, кроме технических должностей, на места телеграфистов, конторщиков, весовщиков и проч. Весьма полезно было бы также каждой дороге иметь несколько стипендий в высших технических учебных заведениях для детей служащих на дороге, с возложением на стипендиатов обязанности прослужить на дороге не менее определённого числа



лет (3–5), начиная с низших технических должностей — машиниста или дорожного мастера.

Поднятие самостоятельности служащих путём личной заинтересованности их в улучшении хозяйственной работы дороги; применение наилучших способов оценки их деятельности для достижения повышения по службе лишь действительно достойнейших агентов; укрепление привязанности служащих к дороге обеспечением и детям их службы на дороге после специальной школьной к тому подготовки; способствование повышению образовательного ценза служащих, без нарушения принципа свободной конкуренции школьных знаний с деловыми качествами и служебными заслугами.

Вот тот путь, который, по моему мнению, может привести к повышению качественного уровня личного состава служащих на железных дорогах как в образовательном, так и в нравственном, и деловом отношениях.

**Н. Мельникова**  
(Железнодорожное дело. — 1909. — № 33. — С. 184–186)

**Права по образованию на ж.д. службе.** — Министр путей сообщения С. В. Рухлов предложил начальнику Юго-Запад. ж.д. сделать распоряжение, чтобы на дорогах вёлся особый учёт лицам, окончившим высшие учебные заведения и поступившим в управление дорог на низшие должности. Лиц этих предписывается назначать на такие станции, где бы они под руководством старших агентов могли в укороченный срок ознакомиться с обязанностями низших служащих. Кроме того, необходимо предоставлять им движение по службе вне очереди и по истечении года со дня поступления зачислять на государственную службу, независимо от занимаемой должности («Киев. Мысль», № 138).

(Железнодорожное дело. — 1909. — № 33. — С. 188)

**Железнодорожные училища.** — Несколько лет тому назад начальником М.-Курской, Нижегородской и Муромской ж.д. инженером Добровольским приглашались служащие к активному участию в развитии школьного дела на

дорогах, путём отчисления для этой цели 1 % из их окладов содержания. Теперь выяснились интересные результаты.

С 1902 г. по 1907 сумма отчислений возросла с 3470 руб. до 18000 руб., а ассигнование казны на тот же предмет увеличилось с 22300 руб. до 76800 руб., что дало возможность обучать в железнодорожных школах 4430 детей обоего пола вместо 1560. Кроме того, усиление денежного фонда даёт возможность оказывать помощь тем служащим, для которых продолжение образования детей в училищах высшего типа ложится тяжёлым бременем на их скромном бюджете.

Каждый учащийся за всё время своего пребывания в училище не только освобождается от платы за обучение, но и пользуется безвозмездно всеми видами учебного инвентаря. Но «спрос на образование значительно опередил возможность его удовлетворения». Так, например, в 1907 г. при станциях Ковров, Нижний, Орёл, были выстроены вторые училищные здания с 10 классными комнатами каждое, и они уже переполнены. То же самое в Обираловке, Селиванове и Золотухине.

Г. Добровольский напоминает служащим, что «только при дружной солидарности отношения к такому важному вопросу, как обучение и воспитание детей, образовательные нужды на вверенных ему дорогах могут быть удовлетворены с большей полнотой, чем это наблюдается в настоящее время» («Раннее Утро», № 6, 9 янв. 1909 г.).

(Железнодорожное дело. — 1909. — № 14–15. — С. 88)

**Не желают.** — На запрос директора Петербургского технологического института проф. Воронова о предоставлении студентам летней практики на фабриках, заводах и железных дорогах, почти все частные предприятия ответили отказом. Только от некоторых ж.д. получен благоприятный ответ («Волга», № 60, 1909 г.).

(Железнодорожное дело. — 1909. — № 30. — С. 176)

**Редакция выражает благодарность персоналу библиотеки Российского университета транспорта за помощь в подготовке материала.** ●





# HUMAN RESOURCES MANAGEMENT: HOW IT WAS ORGANIZED 110 YEARS AGO

**Railway staffing 110 years ago: young professionals, internship, interaction with higher schools... Many solutions could be implemented now, and this compilation might be published within the chapter on education, training and staff.**

**What is needed to improve the staff of employees on the railways?** – This question, which is the subject of a special questionnaire, undertaken recently on many railways, prompts me to express my own view on this subject.

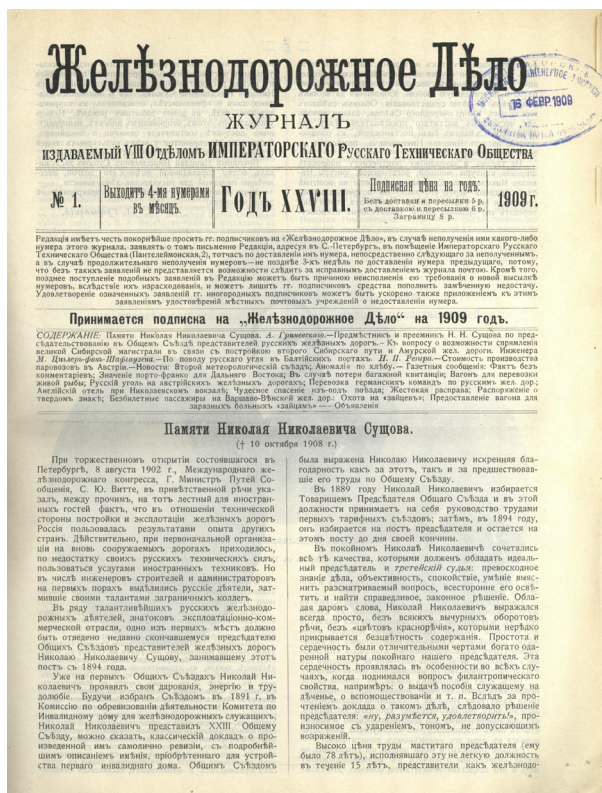
The question touched mainly on employees of traffic control service. The prevailing opinion tends to see the reason for unsatisfactory service of these agents in the absence or lack of educational qualifications. In raising the educational level, they see a panacea for eradicating the disease. It seems to me that the root of evil must be sought much deeper, and that a whole range of other measures are needed both to improve the selection of employees, and to awaken in them self-activity and a conscious attitude to work.

I turn, in particular, to the proposal that has been put forward on some roads to replace the positions of station chiefs and their assistants only with persons having an educational qualification not lower than the course of secondary schools and, moreover, certified by educational institutions; I doubt, firstly, that these positions, under the existing conditions of service and remuneration, should have a sufficient contingent of such candidates; secondly, if it is intended to attract young people directly from school to the above-mentioned responsible positions, it is unlikely that the benefits of studying the school disciplines of the program would balance that risk and harm to the service, which, undoubtedly, will be present due to the absence with young men's of simply everyday experience, tact and balance for business relations with the public and for managerial actions, on which safety of train traffic often depends; thirdly, if an extensive contingent of junior office clerks, telegraph operators and

others, regardless of their abilities and business skills, will be deprived of prospects for promotion, giving way to academic diplomas and certificates, it may result in the fact that talented individuals, having their heads screwed on the right way, but without a certificate, who until now in the railway service are more common than in any other field, will all leave the railway to other areas of work where only business skills are valued, regardless of whether they have been achieved at school or through self-education and self-development. On each railway and now in the staff of the employees there is an adequate supply of people with educational qualifications, but if they are often left behind when promoting in the service, would it not be necessary to perceive only the law of free competition, which naturally brings forward people of labor and business ability. If we introduce patronage of educational certificates, then, of course, the roles will change, but it is unlikely that such an increase in educational qualifications will help to improve the quality of employees.

The evil not only of railways, but of all other enterprises and departments in our fatherland, lies not so much in the lack of educational qualifications as in the insufficient height of the moral level of the employees; lacking not diplomas, but much more important: honesty, hard work and initiative. And it is unlikely that the Board and the Office of Railways may envy in this regard other departments where the system of diplomas flourishes. It is enough to point out our privileged naval or military departments, to the entire highest bureaucratic world, everywhere we see a complete lack of initiative, carelessness, actual ignorance and a predatory attitude toward the interests of the treasury.





So, in my opinion, introduction of compulsory general education for the employees on the railways is unlikely to contribute to an increase in the quality selection of employees; it would be much more important for the interests of the service to set up special examination commissions at the Road Administration, for testing by interviewing of official, special and partly the general knowledge of those who are being promoted. Such examinations would enable the Road Administration to check skills certification of the nearest authorities and in a collegial way to evaluate not only the business skills of the employee, but also his overall development, in order to determine his degree of suitability for the most senior positions.

Then it would be very useful to introduce special secret annual certifications by the nearest authorities: Heads of the Department, Heads of the station — of each of the employees subordinated to them with regard to their morality, diligence, amateur performance, and so on. These certifications could consist of answers to questions developed by the Road Administration, on special certification sheets and, for convenience of comparisons, could

be expressed using a digital point system. These observation records, made periodically by different executive persons, in view of the employee's transfer from station to station or from one department to another (which should have been done as often as possible in the interests of the business and correct assessment of the employee), and entered into the employee's service records — would provide a clear idea of the comparative qualities of all employees and would serve as a criterion for selecting candidates for promotion, and, of course, education qualification would have to be taken into account along with other assessment factors.

The method of assessing an employee in relation to his business qualities is also very important. It is unjust and inappropriate, of course, to form an opinion about the employee by a favorable external impression and by dullness of answers to questions posed when the authorities are passing through along the line; it is important to judge not by appearance and words, but by deeds. To assess the activities of senior, responsible agents, the most rational, in my opinion, would be a statistical method, in the form of comprehensive records of the activities of each

station, each department, for example: about idle time of cars and trains, about the number of shortages and damage to cargo, about the number of incidents caused by the operating employees, the number of complaints from passengers and cargo owners, the number of refutation control checks, the number of comments made by inspectors of all kinds (traffic, station accounting) and other. All these records, digitized in accordance with the size of the technical and commercial work of a station or branch and expressed independently of the record of activity from all stations and all branches, would represent the best indicator of the degree of success of a given accounting unit (station, branch), and therefore would serve as an impartial description of the activities of responsible agents in charge of these units.

But, in addition to assessing the business qualities of employees, this method could serve to introduce a variety of premiums, with appropriate deductions when evading certain norms. Properly and rationally organized statistics and accounting in large enterprises replaces the master's eye, premiums and bonuses, being the type of employee's participation in profits that depend on a successful and economic attitude to business, turns an employee into a master. That is why neither the increase in salaries, nor the issuance of award money each time at the discretion of the authorities, often dependent on random causes, will never achieve the effect that is obtained from correctly and expediently assigned premium, when an employee in every extra hour of idle time or unproductive mileage of a car, in every missing load of cargo, in every damage to rolling stock or other property of the road — will see his personal damage with a purely master's pain in his heart. By transforming an employee into a master, the administration eliminates the need for reminders, compulsions and threats that require long, unpleasant and, in most cases, unmet goals of daily remote negotiations with the stations to speed up the loading, unloading and return of cars, shields, and so on. Personal material interest of station chiefs in the fastest turnover of cars, cargo, shields, and so on and the inexorable exact digital accounting of this turnover will undoubtedly be a much greater guarantee of business success, rather than degrading daily reminders to senior agents of

their duties, assuming that it will act and force them to do as much as possible.

The introduction of premiums requires, however, great deliberation, strict planning and prior careful study of all features of each station, contributing to or, conversely, unfavorable to the normal course of the business. Failure to comply with these conditions very often leads to failure of the premiums, forcing the administration to be disappointed in the principle of premiums itself, while this failure is due either to the inappropriate use of the meter of this function, or to the appointment of too high or prohibitively low standards that do not meet the conditions of the actual average work, or finally to the inexpedient distribution of bonuses among the participants, at the discretion of the authorities, instead of accurate accounting of individual work, which mathematically determines each participant's share.

Long-term service practice is, in my opinion, one of the most important guarantees of the employee's usefulness, his moral reliability and attachment to work. I think that the opinion, shared by many people, is deeply erroneous that an employee turns into a squeezed lemon over time, which then can only be thrown away. If, over the years, his energy actually decreases, then this decrease is more than compensated for by accumulation of administrative and everyday experience and tact that help him with the least expenditure of energy to achieve the greatest productivity and usefulness of his actions, avoiding those mistakes and blunders that are inevitable for a beginner, full of energy, often directed to completely useless breaking, to excessive friction, aggravating only relations with representatives of other services and departments and distracting attention towards a completely unproductive and even harmful work.

That is why I believe that senior employees are a very valuable element of railway service personnel and that it is in the interests of the road that the longest service of their agents should be encouraged worldwide, strengthening not only their personal, but also their hereditary ties with the road, for which it is important to extend care to their families, to raising their children and to the preferential provision of service on the road to the latter. For those purposes it would be very useful to



increase the number of railway secondary and lower schools and expand their program by introducing into such teaching special subjects of the railway business, in order to train children of employees with skills allowing to occupy not only technical positions, but also positions of telegraph operators, clerks, weighers and so on. It would also be very useful for every road to have some scholarships in higher technical educational institutions, for children of employees of the road, with the obligation for scholars to serve no less than a certain number of years (3–5) on the road after graduation, starting from the lowest technical positions: train driver or road master.

Raising self-initiative of employees can pass through developing their personal interest in improving the economic work of the road; the use of the best ways to evaluate their activities in order to achieve promotion of only really worthy agents; strengthening attachment of employees to the road by providing them and their children with jobs on the road after special schooling for that; contributing to improvement of educational qualification of employees, without violating the principle of free competition of school knowledge with business skills and merit.

This is the path that, in my opinion, can lead to an increase in the quality of personnel serving on the railways, both educationally and from moral and business points of view.

**N. Melnikova**  
(*Zheleznodorozhnoe delo [Railway Business]*, 1909, No. 33, pp. 184–186).

**Education rights at railway service.** — Minister of Railways S. V. Rukhlov proposed to the head of South-West railway to issue an order that the roads make special consideration of persons who have graduated from higher educational institutions and have entered the administration of roads at lower positions. It is prescribed to appoint these persons to such stations, where, under the guidance of senior agents, they could, in a shorter period, become familiar with the duties of the lower employees. In addition, it is necessary to provide them with promotion in the service out of turn and after a year from the date of admission, to enroll them to the civil service, regardless of their position (*«Kiev. Mysl»*, No. 138).

(Zheleznodorozhnoe delo [Railway Business], 1909, No. 33, p. 188).

**Railway schools.** — Several years ago, the head of Moscow–Kursk, Nizhny Novgorod and Murom railways, engineer Dobrovolsky invited employees to actively participate in development of schooling on the railways, by deducting for this purpose 1 % of their salaries. Now, interesting results have become clear.

From 1902 to 1907 the amount of deductions increased from 3470 rubles to 18 000 rubles, and appropriation of the treasury for the same item increased from 22 300 rubles up to 7 600 rubles, which made it possible to train 4 430 children of both sexes instead of 1 560 in railway schools. In addition, strengthening the monetary fund makes it possible to assist those employees for whom education of children in higher education schools becomes a heavy burden on their modest budget.

Each student during his stay in school is not only exempt from tuition fees, but also uses all kinds of educational equipment free of charge. But «the demand for education is far ahead of the possibility of meeting it». So, for example, in 1907, at the stations Kovrov, Nizhny, Orel the second school buildings with 10 classrooms each were built, and they were already overcrowded. The same is in Obiralovka, Selivanov and Zolotukhin.

G. Dobrovolsky reminds employees that «only with friendly solidarity in relation to such an important issue as education and upbringing of children, the educational needs on the roads entrusted to him can be satisfied more fully than it is observed at present» (*«Rannee Utro»*, No. 6, January 9, 1909).

(Zheleznodorozhnoe delo [Railway Business], 1909, No. 14–15, p. 88).

**Do not wish.** — Almost all private enterprises refused the request of the director of Petersburg Technological Institute, professor Voronov on provision of summer practices (internship) to students at factories, plants and railways. Only some railways responded in a favourable manner (*«Volga»*, No. 60, 1909).

(Zheleznodorozhnoe delo [Railway Business], 1909, No. 30, p. 176).

**The editorial board expresses gratitude to the staff of the library of Russian University of Transport for assistance in preparing the material.** ●





## АВТОРЕФЕРАТЫ 310

- *Неисправности стрелок с электродвигателями переменного тока.*
- *Навигационные данные при посадке с использованием спутниковых радионавигационных систем.*
- *Автоматизированная диагностика скреплений бесстыкового пути.*
- *Модель надёжности двуканальных систем.*
- *Эффективность управления техническим состоянием магистральных локомотивов.*
- *Повышение ресурса стрелочных переводов.*

## НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ 314

*Научные издания российских и зарубежных издательств.*



### КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ • BIBLIO-DIRECTIONS



## SELECTED ABSTRACTS OF PH.D. THESIS 312

- *Malfunctions of switches with alternating current electric motor.*
- *Automated diagnostics of fastenings of a continuous welded rail track.*
- *Model for calculating reliability of dual-channel systems.*
- *Ways to increase the resource of turnout switches.*
- *Improving efficiency of managing the technical condition of mainline locomotives.*
- *Navigation data for landing using satellite radio navigation systems.*

## NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION 315

*Scientific editions of Russian and global publishing houses.*





## АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

*Selected abstracts of Ph.D. theses  
submitted at Russian transport universities  
and research institutions  
(англ. текст – English text – p. 312).*

<https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-310-313>

**Белоусов С. В. Методы и алгоритмы диагностики неисправностей стрелок с электродвигателями переменного тока / Автореф. дис... канд. техн. наук. — СПб.: ПГУПС, 2019. — 16 с.**

Определены критерии, позволяющие без потери признаков неисправностей сократить объём информации, необходимой для диагностики стрелок с электродвигателями переменного тока.

Разработаны методы диагностики неисправностей стрелок с электродвигателями переменного тока, основанные на применении теории нейронных сетей.

Предложен алгоритм расширения обучающей выборки, применение которого увеличивает скорость обучения нейронной сети.

Разработаны методы логического анализа функции мощности перевода стрелок.

Предложены методики выделения информативных зон работы стрелочного электропривода на графике функции мощности перевода стрелки.

Произведён синтез методов теории нейронных сетей и логического анализа в интегрированный метод диагностики стрелок с электродвигателями переменного тока по функции мощности перевода.

*Специальность 05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт). Работа выполнена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.*

**Завалишин О. И. Методы повышения целостности и непрерывности навигационных данных при точном заходе на посадку по приборам воздушных судов с использованием спутниковых радионавигационных систем / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: МГТУ ГА, 2019. — 22 с.**

Проведён количественный системный анализ факторов негативного воздействия на сигналы СРНС и способов повышения целостности и непрерывности навигационного обеспечения воздушных судов в районе аэродрома и при точном инструментальном (приборном) заходе на посадку методом дифференциального режима ГНСС в формате стандартов (SARPs) ИКАО, а также комплексирования радиотехнических и оптических средств (различной физической природы) с целью обеспечения требуемых ИКАО навигационных характеристик

в условиях радиопомех и СМУ (туман, облачность и др.).

Предложенные в работе способы обеспечения требований ИКАО к сигналу ГНСС легли в основу создания первого в мире и Российской Федерации программно-аппаратного комплекса спутниковой системы навигации и точного автоматического захода на посадку по двум спутниковым системам ГЛОНАСС/GPS на все типы аэродромов и вертодромов (полярные, горные, ледовые и др.), соответствующих стандартам ИКАО.

Вместе с классическими дифференциальными правками, определёнными как разности вычисленных и измеренных псевдодальностей, в работе предложен метод оценки ошибок формирования этих поправок по каждому спутнику и передача В-величин и других параметров, содержащих информацию о точности и целостности дифференциальных поправок, на борт ВС, что позволило обеспечить требования ИКАО по целостности сигнала ГНСС и реализовать в бортовой аппаратуре спутниковой посадки расчёт уровней защиты, позволяющий значительно повысить меру доверия и непрерывность определения координат ВС, особенно в условиях наличия шумовых помех и ионосферных штормов в районе аэродрома.

С целью повышения целостности сигналов ГНСС в пространстве в работе предложен метод оценки спутниковых данных (DQM) и качества сигналов (SQM), передаваемых со спутников, предшествующий этапу расчёта дифференциальных поправок к псевдодальностям. Данное решение позволило практически исключить возможность использования недостоверных бортовых спутниковых навигационных данных при определении координат в дифференциальном режиме.

Предложенный в работе новый метод оценки качества спутникового навигационного сигнала обеспечивает не только защиту от трёх моделей искажения ПСП (А, В, С), предлагаемых ИКАО, но также и защиту по измерительным данным от любых других форм искажения сигнала в реальном времени.

*Специальность 05.22.13 — Навигация и управление воздушным движением. Работа выполнена в Московском государственном техническом университете гражданской авиации.*

**Макаров А. В. Автоматизированная диагностика скреплений бесстыкового пути / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: АО «ВНИИЖТ», 2019. — 16 с.**

Определены функции изменения коэффициентов, характеризующих тип промежуточного рельсового скрепления, степень прижатия скреплением рельса к подрельсовому основанию и момент затяжки прикрепителя, позволяющие разработать метод автоматизированной диагностики состояния скреплений.

Установлена функциональная зависимость величины затяжки крепежителей промежуточных рельсовых скреплений от величины деформации элементов скреплений.

Определены коэффициенты изменения устойчивости бесстыкового пути при действии температурных сил, характеризующие влияние степени прижатия рельса к подрельсовому основанию в зависимости от величины деформации скреплений и момента затяжки крепежителей.

Определены изменения величин деформации различных промежуточных рельсовых скреплений в зависимости от приложенной вертикальной нагрузки.

*Специальность 05.22.06 — Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог. Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».*

**Проурзин О. В. Модель расчёта надёжности двухканальных систем с резервированием на основе альтернирующих процессов восстановления / Автореф. дис... канд. техн. наук. — СПб.: ПГУПС, 2019. — 16 с.**

Введены в рассмотрение для двухканальной системы с резервированием управляемые параметры гарантийных сроков работы её элементов. Решена задача оптимального выбора этих параметров с целью повышения показателей надёжности и эффективности системы. Обоснован и реализован оптимальный, с точки зрения экономии машинных ресурсов, алгоритм для построения линий уровня функций от двух аргументов, который применяется для графического анализа сложных функций.

Полученный научно-методический аппарат позволил вычислять и анализировать показатели надёжности двухканальной системы с резервированием, обладающей неэкспоненциальными распределениями времени ремонта и времени безотказной работы каждого канала.

*Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Работа выполнена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.*

**Супчинский О. П. Повышение эффективности управления техническим состоянием магистральных локомотивов / Автореф. дис... канд. техн. наук. — Омск: ОмГУПС, 2019. — 20 с.**

Разработана методика управления технологическими процессами ремонта локомотивов с использованием сетевого планирования для контроля и корректировки выполнения технологических операций.

Предложен алгоритм определения необходимого переходного оборудования, запасных частей и материалов для обеспечения качественного выполнения технологических процессов ремонта локомотивов новых серий и норм расхода мате-

риалов при неплановых ремонтах с учётом вероятности возникновения отказов в эксплуатации.

Разработана методика определения показателя энергоэффективности электровоза для контроля и управления качеством выполнения технологических процессов ремонта и оценки эффективности использования магистральных электровозов на основе прогнозирования дополнительных потерь мощности в узлах и агрегатах, лимитирующих их работоспособность, по результатам выполненного ремонта.

*Специальность 05.22.07 — Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация. Работа выполнена в Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС).*

**Шишкина И. В. Повышение ресурса стрелок стрелочных переводов за счёт усовершенствования крепления рельсовых элементов стрелки к основанию / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: РУТ, 2019. — 24 с.**

В ходе исследования впервые выполнены экспериментальные и теоретические разработки по исследованию влияния конструкции скреплений на стрелке стрелочного перевода на их ресурс.

Получены сравнительные результаты динамико-прочностных испытаний подкладок с подушкой различных конструкций для определения их напряжённо-деформированного состояния под воздействием поездов с учётом особенностей разных технологий изготовления.

Представлен анализ сроков службы элементов крепления остряков и рамных рельсов к основанию.

Построена вероятностная модель работы металлических подкладок с подушкой стрелок стрелочных переводов, хорошо согласующаяся с результатами опытной эксплуатации, которая позволяет рассчитывать распределение отказов подкладок с подушкой в зависимости от характеристик металла, из которого они изготовлены, начальной затяжки крепежителей и спектра напряжений, возникающих от поездной нагрузки.

Получены зависимости отказов подкладок с подушкой с помощью разработанной методики, которая даёт возможность планировать замену подкладок на стрелочных переводах при смене основных металлических частей.

При исследовании выявлены новые виды дефектов причин отказов подкладок с подушкой.

Для выявления причин излома подкладок с подушкой был произведён химический анализ и металлографические исследования подкладки с подушкой в сечениях изломов.

*Специальность 05.22.06 — Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог. Работа выполнена в Российском университете транспорта.*

**Подготовила Н. ОЛЕЙНИК ●**



## ABSTRACTS of Ph.D. THESES

**Selected abstracts of Ph.D. theses  
submitted at Russian transport universities  
and research institutions  
For the Russian text please see p. 310.**

<https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-310-313>

**Belousov, S. V. Methods and algorithms for troubleshooting switches with alternating current electric motors** [*Metody i algoritmy diagnostiki neispravnostei strelok s elektrodvigatelyami peremennogo toka*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. St. Petersburg, PSTU publ., 2019, 16 p.

Criteria have been determined that allow, without loss of signs of faults, to reduce the amount of information needed to test switches with AC motors.

Methods for troubleshooting switches with AC motors based on the theory of neural networks have been developed.

An algorithm for expanding the training sample is proposed, the use of which increases the speed of training of the neural network.

Methods for the logical analysis of the power function of the setting of switches have been developed.

The methods of selection of informative zones of operation of the switch actuator on the graph of the power function of the setting of the switch have been proposed.

The methods of the theory of neural networks and logical analysis have been synthesized into an integrated diagnostic method for switches with AC motors according to the power function of setting of switches.

*Specialty 05.13.06 – Automation and management of technological processes and production (transport). The work was performed at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.*

**Makarov, A. V. Automated diagnostics of fastenings of a continuous welded rail track** [*Avtomatizirovannaya diagnostika skreplenii besстыkovogo puti*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. Moscow, JSC VNIIZhT, 2019, 16 p.

The functions of changes of coefficients characterizing the type of intermediate rail fastening, the degree of pressing by rail fastening of a rail against the rail base and the fastener tightening torque, allowing to develop a method for automated diagnostics of the condition of fastenings, are determined.

The functional dependence of the value of tightening of the fasteners of intermediate rail fastenings on the magnitude of deformation of the fastening elements has been established.

The coefficients of change in stability of a continuous welded rail track under the action of temperature forces, which characterize the influence of the degree of rail pressure on the rail base, depending on the magnitude of deformation of fastenings and the torque of tightening, have been determined.

The changes in deformation values of different intermediate rail fastenings have been determined depending on the applied vertical load.

*Specialty 05.22.06 – Railway track, survey and design of railways. The work was performed at Joint Stock Company «Railway Research Institute».*

**Prouzrin, O. V. Model for calculating reliability of dual-channel systems with redundancy based on alternating restoration processes** [*Model rascheta nadezhnosti dvukhkanalnykh sistem s rezervirovaniem na osnove alterniruyushchikh protsessov vosstanovleniya*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. Moscow, PSTU publ., 2019, 16 p.

The controllable parameters of warranty periods for operation of its elements are introduced for a two-channel system with redundancy. The problem of optimal selection of these parameters in order to improve reliability and efficiency of the system is solved. The optimal algorithm from the point of view of machine resources saving, for constructing the lines of the level of functions from two arguments, which is used for graphical analysis of complex functions, has been substantiated and implemented.

The obtained scientific and methodological apparatus will allow one to calculate and analyze the reliability indices of a dual-channel system with redundancy, which has non-exponential distributions of repair time and uptime of each channel.

*Specialty 05.13.18 – Mathematical simulation, numerical methods and program complexes. The work was performed at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.*

**Shishkina, I.V. Increasing the resource of turnout switches by improving fastening of switch rail elements to the base** [*Povyshenie resursa strelok strelchnykh perevodov za schet usovershenstvovaniya prikrepleniya relsovykh elementov strelki k osnovaniyu*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. Moscow, RUT publ., 2019, 24 p.

In the course of the study, experimental and theoretical developments were carried out for the first time to study the influence of design of fastenings of the switch points on their resource.

Comparative results of dynamic strength tests of pads of various design to determine their stress-strain state under the influence of trains, taking into account the features of different manufacturing techniques, were obtained.



The analysis of the service life of the elements of fastening of stock rails and points to the base is presented.

A probabilistic model of operation of metal pads of turnout points was constructed, which complies with the results of test operation, which allows one to calculate distribution of failures of pads depending on characteristics of metal from which they are made, on the initial tightening of fastenings and the stress spectrum generated by train load.

The dependencies of the failures of pads were obtained using the developed technique, which makes it possible to plan replacement of pads on turnout switches when changing the main metal parts.

The study revealed new types of defects that cause failures of pads.

To identify the causes of breaks of pads chemical analysis and metallographic studies of pads in the fractured sections were carried out.

*Specialty 05.22.06 – Railway track, survey and design of railways. The work was performed at Russian University of Transport.*

**Supchinsky, O. P. Improving efficiency of managing the technical condition of mainline locomotives** [*Povyshenie effektivnosti upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem magistralnykh lokomotivov*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. Omsk, OSTU publ., 2019, 20 p.

A method has been developed for managing the repair process of locomotives using network planning to monitor and adjust implementation of technological operations.

An algorithm is proposed for determining the necessary transitional equipment, spare parts and materials to ensure high-quality implementation of technological processes for repairing locomotives of new series and consumption rates of materials for unplanned repairs, taking into account likelihood of operation failure.

A method has been developed for determining the energy efficiency index of an electric locomotive for monitoring and controlling of quality of technological repair processes and for assessment of efficiency of operation of main electric locomotives based on predicting additional power losses in nodes and assemblies that limit their performance as a result of the repair performed.

*Specialty 05.22.07 – Rolling stock of railways, train traction and electrification. The work was performed at Omsk State Transport University.*

**Zavalishin, O. I. Methods to improve integrity and continuity of navigation data during precision approach landing of aircrafts using satellite radio navigation systems** [*Metody povysheniya tselostnosti i nepreryvnosti navigatsionnykh dannyykh pri tochnom*

*zakhode na posadku po priboram vozduzhnykh sudov s ispolzovaniem sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. Moscow, MSTU CA, 2019, 22 p.

A quantitative systematic analysis of the negative impact factors on SRNS signals and ways to improve integrity and continuity of navigation support of aircraft in the airfield area and during an instrumental landing approach using the differential mode of GNSS in the ICAO standard format (SARPs), as well as integration of radio engineering and optics (of various physical nature) in order to provide the ICAO-required navigation characteristics in the presence of radio interference and SMU (fog, clouds and others), have been suggested.

The proposed methods for meeting the requirements of the ICAO GNSS signal formed the basis for creation of the world and national Russian ever first software and hardware satellite navigation system and for the automatic precision landing approach using two GLONASS/GPS satellite systems for all types of airfields and heliports (polar, mountain, ice and others) compliant with ICAO standards.

Together with the classical differential corrections, defined as the difference between the calculated and measured pseudoranges, the paper proposed a method for estimating the errors in formation of these corrections for each satellite and transmission of B-values and other parameters containing information on accuracy and integrity of the differential corrections to the aircraft, which allowed to satisfy ICAO requirements for integrity of the GNSS signal and to implement in the on-board satellite landing equipment a calculation of the levels of protection, allowing a significant increase in the measure of confidence and continuity of determination of coordinates of aircraft, especially in the presence of noise interference and ionospheric storms in the vicinity of the aerodrome.

In order to improve integrity of GNSS signals in space, the paper proposes a method for estimating satellite data (DQM) and quality of signals (SQM) transmitted from satellites, which precedes the stage of calculating the differential corrections to pseudorange. This solution allowed to virtually eliminate the possibility of using unreliable onboard satellite navigation data when determining the coordinates in the differential mode.

The proposed new method for assessing quality of the satellite navigation signal provides not only protection against three pseudo-random sequence distortion models (A, B, C) offered by ICAO, but also protection of measurement data from any other forms of signal distortion in real time.

*Specialty 05.22.13 – Navigation and air traffic control. The work was performed at Moscow State Technical University of Civil Aviation.*





## НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

*For the list of Russian editions in English as well as for publications originally published in English please see p. 315.*

*Издания на английском языке – с. 315*

<https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-314-316>

Авдеев А. В., Енин Д. В., Ионичевская Л. Г. и др. Доступная среда для инвалидов на транспорте: Учебник. – М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. – 229 с. – ISBN 978-5-907055-73-5.

Агешкина Н. А. Организация пассажирских перевозок и обслуживание пассажиров (железнодорожный транспорт): Учебник. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа: Профобразование, 2019. – 432 с. – ISBN 978-5-4497-0109-1.

Айзатуллова А. Ш., Алексеева М. Ю., Васильева Н. В. и др. История транспорта России: Учебник / Под общ. ред. Т. Л. Пашковой. – М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. – 378 с. – ISBN 978-5-907055-03-2.

Бочкарева Н. А. Перевозка грузов на особых условиях (железнодорожный транспорт): Учебник. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа: Профобразование, 2019. – 312 с. – ISBN 978-5-4497-0177-0.

Ведихина Л. И., Донченко В. В., Евстигнеева Н. А. и др. Экология транспорта и устойчивое развитие: техносферная безопасность и природообустройство, техносферная безопасность: Учебник / Под ред. И. В. Карапетянц, Е. И. Павловой. – М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. – 368 с. – ISBN 978-5-907055-72-8.

Землин А. И., Козлов В. В. Противодействие терроризму. Организационно-правовое обеспечение на транспорте: Учеб. пособие. – М.: Юрайт, 2019. – 181 с. – ISBN 978-5-534-10013-6.

Иванова Т. А. Международные автомобильные и морские перевозки грузов / Под ред. А. А. Ананьевой. – Саратов: Наука, 2019. – 133 с. – ISBN 978-5-9999-3121-4.

Леонтьев Р. Г. Небыль о «моделях конкуренции» российских морских портов: квазитория и псевдометодология: Монография. – Владивосток: ДВФУ, 2019. – 102 с. – ISBN 978-5-7444-4537-9.

Новиков А. Н., Трясцин А. П. Цифровые технологии на транспорте: Учеб. пособие. – Орёл: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2019. – 127 с. – ISBN 978-5-9929-0725-4.

Павловский В. А., Реуцкий А. С. Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа. – СПб.: Крыловский гос. научный центр, 2019. – 169 с. – ISBN 978-5-903002-91-7.

Плотникова Е. С. Управление инвестициями на внутреннем водном транспорте: Монография. – М.: ТрансЛит, 2019. – 175 с. – ISBN 978-5-94976-131-6.

Проектирование остановок и пересадочных узлов общественного транспорта. Standard zastávek PID: стандарт пересадочных узлов и остановок интегрированной системы общественного транспорта Праги и Среднечешского края // Ассоциация транспортных инженеров / Под ред. В. Валдина; пер. с чеш. П. Кузина, Д. Лютова. – СПб.: Коста, 2019. – 310 с. – ISBN 978-5-91258-424-4.

Рыбников А. М., Рыбникова И. А. Специализированные перегрузочные комплексы в морских портах: Учеб. пособие. – Новороссийск: ГМУ им. адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2019. – 148 с.

Сморodinцева Е. Е., Якушев Н. В. Взаимодействие видов транспорта 2-е изд. – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 246 с. – ISBN 978-5-94614-471-1.

Соколов Ю. И., Межох З. П., Лавров И. М. и др. Управление качеством продукции на железнодорожном транспорте: Учебное пособие / Под ред. Ю. И. Соколова. – М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. – 197 с. – ISBN 978-5-907055-18-6.

Терёшина Н. П., Подсорин В. А. Экономика инноваций на транспорте. – М.: РУТ (МИИТ), 2019. – 401 с. – ISBN 978-5-7876-0380-4.

Терёшина Н. П., Подсорин В. А., Соколов Ю. И. и др. Экономика железнодорожного транспорта: Учебник. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа, 2019. – 414 с. – ISBN 978-5-4497-0052-0.

Терёшина Н. П., Токарев В. А., Иноземцева С. М. Расходы инфраструктуры железнодорожного транспорта: техника и технологии строительства, экономика и управление: Учеб. пособие. – М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. – 262 с. – ISBN 978-5-907055-84-1.

Ходош М. С., Бачурин А. А., Спирин И. В., Савосина М. И. Организация сервисного обслуживания на автомобильном транспорте: Учебник / Под ред. М. С. Ходоша. – 3-е изд., испр. – М.: Академия, 2019. – 286 с. – ISBN 978-5-4468-8198-7.

Чуприкова З. В., Вахрамеева М. В., Медникова О. В. и др. Цифровые технологии экономических процессов на транспорте: Монография / Под ред. Л. А. Каргиной, А. В. Резера. – М.: ВИНТИ РАН, 2019. – 217 с. – ISBN 978-5-902928-83-6.

Шабуров С. С. Основы управления, планирования и организации строительства, ремонта, содержания автомобильных дорог: Учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во Иркутского нац. исслед. тех. ун-та, 2019. – 433 с. – ISBN 978-5-8038-1364-4.

Подготовила Н. ОЛЕЙНИК ●

## NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

For the original list of editions published in Russian please see p. 314

<https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-3-314-316>

Ageshkina, N. A. Organization of passenger transportation and passenger service (railway transport): Textbook [*Organizatsiya passazhirskikh perevozok i obsluzhivanie passazhirov (zheleznodorozhniy transport): Uchebnik*]. Saratov, IPR Media: Profobrazovanie, 2019, 432 p. ISBN 978-5-4497-0109-1.

Aizatullova, A. Sh., Alekseeva, M. Yu., Vasilieva, N. V. [et al] Transport history of Russia: Textbook [*Istoriya transporta Rossii: Uchebnik*]. Ed. by T. L. Pashkova. Moscow, TMC for education on railway transport, 2019, 378 p. ISBN 978-5-907055-03-2.

Avdeev, A. V., Enin, D. V., Ionichevskaya, L. G. [et al] Accessible transport environment for people with disabilities: Textbook [*Dostupnaya sreda dlya invalidov na transporte: Uchebnik*]. Moscow, TMC for education on railway transport, 2019, 229 p. ISBN 978-5-907055-73-5.

Bochkareva, N. A. Transportation of goods using special conditions (railway transport): Textbook [*Perevozka грузов na osobyykh usloviyakh (zheleznodorozhniy transport): Uchebnik*]. Saratov, IPR Media: Profobrazovanie, 2019, 312 p. ISBN 978-5-4497-0177-0.

Chuprikova, Z. V., Vakhrameeva, M. V., Mednikova, O. V. [et al] Digital technologies of transport economic processes: Monograph [*Tsifrovie tekhnologii ekonomicheskikh protsessov na transporte: Monografiya*]. Ed. by L. A. Kargina, A. V. Rezer. Moscow, VINITI RAS publ., 2019, 217 p. ISBN 978-5-902928-83-6.

Design of stops and interchange nodes of public transport [*Proektirovaniye ostanovok i peresadochnyykh uzlov obshchestvennogo transporta*]. Standard zastavok PID: standard for interchange nodes and stops of the integrated public transport system in Prague and Central Bohemia / Association of Transport Engineers]. Ed. by V. Valdin; translation from Czech by P. Kuzin, D. Lutov. St. Petersburg, Costa publ., 2019, 310 p. ISBN 978-5-91258-424-4.

Ivanova, T. A. International road and sea transportation of goods [*Mezhdunarodnie avtomobilnye i morskoe perevozki грузов*]. Ed. by A. A. Ananyeva. Saratov, Nauka publ., 2019, 133 p. ISBN 978-5-9999-3121-4.

Khodosh, M. S., Bachurin, A. A., Spirin, I. V., Savosina, M. I. Organization of after-sales service in road transportation: Textbook [*Organizatsiya servisnogo obsluzhivaniya na avtomobilnom transporte: Uchebnik*]. Ed. by M. S. Khodosh. 3<sup>rd</sup> ed., rev. Moscow, Academia publ., 2019, 286 p. ISBN 978-5-4468-8198-7.

Leontiev, R. G. Fable on «competition models» of Russian seaports: quasitheory and pseudo-methodology: Monograph [*Nebyl o «modelyakh konkurentsii» rossiiskikh morskikh portov: kvaziteoriya i psevdometodologiya: Monografiya*]. Vladivostok, FEPU Publishing House, 2019, 102 p. ISBN 978-5-7444-4537-9.

Novikov, A. N., Tryastin, A. P. Transport digital technologies: Study guide [*Tsifrovie tekhnologii na transporte: Ucheb. posobie*]. Oryol, OSU named after I.S. Turgenev, 2019, 127 p. ISBN 978-5-9929-0725-4.

Pavlovsky, V. A., Reutsky, A. S. Thermophysical fundamentals of sea transportation and bunkering of liquefied natural gas [*Teplotfizicheskie osnovy morskoi transportirovki i bunkerovki szhizhennogo prirodnogo gaza*]. St. Petersburg, Krylovsky state scientific center, 2019, 169 p. ISBN 978-5-903002-91-7.

Plotnikova, E. S. Investment management for inland water transport: Monograph [*Upravlenie investitsiyami na vnutrennem*

*vodnom transporte: Monografiya*]. Moscow, TransLit publ., 175 p. ISBN 978-5-94976-131-6.

Rybnikov, A. M., Rybnikova, I. A. Specialized transshipment complexes in seaports: Study guide [*Spetsializirovannye peregruzochnye komplekсы v morskikh portakh: Ucheb. posobie*]. Novorossiysk, SMU named after Admiral F.F. Ushakov, 2019, 148 p.

Shaburov, S. S. Fundamentals of management, planning and organization of construction, repair, maintenance of roads: Study guide [*Osnovy upravleniya, planirovaniya i organizatsii stroitelstva, remonta, soderzhaniya avtomobilykh dorog: Ucheb. posobie*]. Irkutsk, Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2019, 433 p. ISBN 978-5-8038-1364-4.

Smorodintseva, E. E., Yakushev, N. V. Interaction of modes of transport [*Vzaimodeistvie vidov transporta*]. 2<sup>nd</sup> ed. Yekaterinburg, UrGUPS, 2019, 246 p. ISBN 978-5-94614-471-1.

Sokolov, Yu. I., Mezkhokh, Z. P., Lavrov, I. M. [et al] Product quality management for railway transport: Study guide [*Upravlenie kachestvom produktii na zheleznodorozhnom transporte: Uchebnoe posobie*]. Ed. by Yu. I. Sokolov. Moscow, TMC for education on railway transport, 2019, 197 p. ISBN 978-5-907055-18-6.

Teryoshina, N. P., Podsorin, V. A. Economics of transport innovations [*Ekonomika innovatsii na transporte*]. Moscow, RUT (MIIT), 2019, 401 p. ISBN 978-5-7876-0380-4.

Teryoshina, N. P., Podsorin, V. A., Sokolov, Yu. I. [et al] Economics of railway transport: Textbook [*Ekonomika zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnik*]. Saratov, IPR Media publ., 2019, 414 p. ISBN 978-5-4497-0052-0.

Teryoshina, N. P., Tokarev, V. A., Inozemtseva, S. M. Expenses of railway transport infrastructure: construction equipment and technologies, economics and management: Study guide [*Raskhody infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta: tekhnika i tekhnologii stroitelstva, ekonomika upravleniya: Ucheb. posobie*]. Moscow, TMC for education on railway transport, 2019, 262 p. ISBN 978-5-907055-84-1.

Vedikhina, L. I., Donchenko, V. V., Evstigneeva, N. A. [et al] Transport ecology and sustainable development: technosphere safety and environmental management, technosphere safety: Textbook [*Ekologiya transporta i ustoychivoe razvitiye: tekhnosfernaya bezopasnost i prirodobustroystvo, tekhnosfernaya bezopasnost' Uchebnik*]. Ed. by I. V. Karapetyants, E. I. Pavlova. Moscow, TMC for education on railway transport, 2019, 368 p. ISBN 978-5-907055-72-8.

Zemlin, A. I., Kozlov, V. V. Counteraction to terrorism. Organizational and legal support for transport: Study guide [*Protivodeistvie terrorizmu. Organizatsionno-pravovoe obespechenie na transporte: Ucheb. posobie*]. Moscow, Yurait publ., 2019, 181 p. ISBN 978-5-534-10013-6.

Compiled by N. OLEYNIK ●

### Editions originally published in English

Abeyratne, R. Legal Priorities in Air Transport. Springer International Publishing, 2019, XII, 312 p., eBook ISBN 978-3-030-18391-2, DOI: 10.1007/978-3-030-18391-2, Hardcover ISBN 978-3-030-18390-5.

Burnete, N., Varga, B. O. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94409-8>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-319-94408-1. Online ISBN 978-3-319-94409-8. Series Print ISSN 2524-7778. Series Online ISSN 2524-7786

Cevallos-Torres, L., Botto-Tobar, M. Problem-Based Learning: A Didactic Strategy in the Teaching of System Simulation. Springer International Publishing, 2019, XVI, 132 p., eBook ISBN 978-3-030-13393-1, DOI: 10.1007/978-3-030-13393-1, Hardcover ISBN 978-3-030-13392-4, Series ISSN 1860-949X.

Clausen, U., Langkau, S., Kreuz, F. Advances in Production, Logistics and Traffic. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Interdisciplinary Conference on Production Logistics and Traffic 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13535-5>. Springer Nature





Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-030-13534-8. Online ISBN 978-3-030-13535-5. Series Print ISSN 2194-8917. Series Online ISSN 2194-8925.

Covic, F. Container Handling in Automated Yard Blocks. An Integrative Approach Based on Time Information. Springer International Publishing, 2019, XX, 313 p., eBook ISBN 978-3-030-05291-1, DOI: 10.1007/978-3-030-05291-1, Hardcover ISBN 978-3-030-05290-4, Series ISSN 1431-1941.

Gelnar, D., Zegzulka, J. Discrete Element Method in the Design of Transport Systems. Verification and Validation of 3D Models. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05713-8>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-030-05712-1. Online ISBN 978-3-030-05713-8.

Graham, A., Dobruszkes, F. Air Transport – A Tourism Perspective. Elsevier, 18.02.2019, 274 p. ISBN 9780128128572, eBook ISBN 9780128128589.

Kabashkin, I., Yatskiv (Jackiva), I., Prentkovskis, O. Reliability and Statistics in Transportation and Communication. Selected Papers from the 18<sup>th</sup> International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'18, 17–20 October 2018, Riga, Latvia. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12450-2>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-030-12449-6. Online ISBN 978-3-030-12450-2. Series Print ISSN 2367-3370. Series Online ISSN 2367-3389.

Kalita, J., Balas, V. E., Borah, S., Pradhan, R. Recent Developments in Machine Learning and Data Analytics. IC3 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1280-9>. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019, eBook Packages Intelligent Technologies and Robotics. Print ISBN 978-981-13-1279-3. Online ISBN 978-981-13-1280-9. Series Print ISSN 2194-5357. Series Online ISSN 2194-5365.

Kerner, B. S. Complex Dynamics of Traffic Management. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8763-4>. Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2019, eBook Packages Physics and Astronomy. Print ISBN 978-1-4939-8762-7. Online ISBN 978-1-4939-8763-4.

Kono T., Joshi, K. K. Traffic Congestion and Land Use Regulations. Elsevier, 16 August 2019, 268 p. Paperback ISBN: 9780128170205, eBook ISBN: 9780128170212.

Korn, M., Reißmann W., Röhl T., Sittler D. Infrastructuring Publics. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2019, VI, 288 p., eBook ISBN 978-3-658-20725-0, DOI: 10.1007/978-3-658-20725-0, Softcover 978-3-658-20724-3, Series ISSN 2520-8349.

Lowe, D., Pidgeon, C. Lowe's Transport Manager's and Operator's Handbook 2019. KoganPage, The Chartered Institute of Logistics and Transport, 49 en ed., 2019, 800 p. EAN 9780749484200.

Macioszek, E., Akçelik, R., Sierpiński, G. Roundabouts as Safe and Modern Solutions in Transport Networks and Systems. 15<sup>th</sup> Scientific and Technical Conference «Transport Systems. Theory and Practice 2018», Katowice, Poland, September 17–19, 2018, Selected Papers. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98618-0>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Intelligent Technologies and Robotics. Print ISBN 978-3-319-98617-3. Online ISBN 978-3-319-98618-0. Series Print ISSN 2367-3370. Series Online ISSN 2367-3389.

Meissner, D., Gokhberg, L., Saritas, O. Emerging Technologies for Economic Development. Springer International Publishing, 2019, XII, 332 p., eBook ISBN 978-3-030-04370-4, DOI: 10.1007/978-3-030-04370-4, Hardcover ISBN 978-3-030-04368-1, Series ISSN 2570-1509.

Milosavljevic, N., Simicevic, J. Sustainable Parking Management. Practices, Policies, and Metrics. Elsevier, 2019, 314 p. ISBN 9780128158005, eBook ISBN 9780128162613.

Mine, T., Fukuda, A., Ishida, Sh. Intelligent Transport Systems for Everyone's Mobility. Springer Singapore, 2019, IX, 471 p., eBook ISBN 978-981-13-7434-0, DOI: 10.1007/978-981-13-7434-0, Hardcover ISBN 978-981-13-7433-3.

Morgan, S. Global Contract Logistics. Best Practice Toolkit for Planning, Negotiating and Managing a Contract. Kogan Page, 2019, 224 p. EAN 9780749475932.

Müller, B., Meyer, G. Towards User-Centric Transport in Europe Challenges, Solutions and Collaborations. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99756-8>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-319-99755-1. Online ISBN 978-3-319-99756-8. Series Print ISSN 2196-5544. Series Online ISSN 2196-5552.

Owens, V. Aqueducts and Viaducts of Britain. Amberley Publishing, 2019, 96 p. ISBN 9781445683805.

Papanikolaou, A. A Holistic Approach to Ship Design. Volume 1: Optimisation of Ship Design and Operation for Life Cycle. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02810-7>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-030-02809-1. Online ISBN 978-3-030-02810-7.

Pucci, P., Vecchio, G. Enabling Mobilities. Planning Tools for People and Their Mobilities. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-19581-6>. The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-030-19580-9. Online ISBN 978-3-030-19581-6. Series Print ISSN 2191-530X. Series Online ISSN 2191-5318.

Satapathy, S. Ch., Joshi, A. Information and Communication Technology for Intelligent Systems. Proceedings of ICTIS 2018, Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1747-7>. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019, eBook Packages Intelligent Technologies and Robotics. Print ISBN 978-981-13-1746-0. Online ISBN 978-981-13-1747-7. Series Print ISSN 2190-3018. Series Online ISSN 2190-3026.

Sethi, R., Di Molfetta, A. Groundwater Engineering. A Technical Approach to Hydrogeology, Contaminant Transport and Groundwater Remediation. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20516-4>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-030-20514-0. Online ISBN 978-3-030-20516-4. Series Print ISSN 2366-259X. Series Online ISSN 2366-2603.

Sharma, V. R., Chandrakanta. Making Cities Resilient. Springer International Publishing, 2019, XXIII, 345 p., eBook ISBN 978-3-319-94932-1, DOI: 10.1007/978-3-319-94932-1, Hardcover ISBN 978-3-319-94931-4.

Sierpiński, G. Integration as Solution for Advanced Smart Urban Transport Systems. 15<sup>th</sup> Scientific and Technical Conference «Transport Systems. Theory & Practice 2018», Selected Papers. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99477-2>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Intelligent Technologies and Robotics. Print ISBN 978-3-319-99476-5. Online ISBN 978-3-319-99477-2. Series Print ISSN 2194-5357. Series Online ISSN 2194-5365.

Weenk, Ed. Mastering the Supply Chain. Principles, Practice and Real-Life Applications. Kogan Page, 3<sup>rd</sup> March 2019, 296 p. EAN 9780749484484.

Wijaya, S. E., Imran, M. Moving the Masses: Bus-Rapid Transit (BRT) Policies in Low Income Asian Cities. Case Studies from Indonesia. Springer Singapore, 2019, XXV, 200 p., eBook ISBN 978-981-13-2938-8, DOI: 10.1007/978-981-13-2938-8.

Yahya, A. Steganography Techniques for Digital Images. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78597-4>. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-319-78535-6. Online ISBN 978-3-319-78597-4.

Zhang, B., Ceccarelli, M. Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms. Proceedings of the 2018 HMM IFToMM Symposium on History of Machines and Mechanisms. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03538-9>. Springer Nature Switzerland AG 2019, eBook Packages Engineering. Print ISBN 978-3-030-03537-2. Online ISBN 978-3-030-03538-9. Series Print ISSN 1875-3442. Series Online ISSN 1875-3426.

Zhang, X., Roe, M. Maritime Container Port Security. USA and European Perspectives. Palgrave Macmillan, 2019, XIX, 282 p., eBook ISBN 978-3-030-03825-0, DOI: 10.1007/978-981-10-5610-9, Hardcover ISBN 978-3-030-03824-3, Series ISSN 2363-5010.