

Т

ISSN 1992-3252

ТРАНСПОРТА

**WORLD OF TRANSPORT
AND TRANSPORTATION**

3 2020
Том / Vol. 18



Стр./pp. 28, 120

ОТКРЫТ ПАМЯТНИК «ПОГИБШИМ ПРИ ЗАЩИТЕ ОТЕЧЕСТВА»



27 июня 2020 года на 561-м километре скоростной автодороги М-11 «Нева» Москва—Санкт-Петербург открыт памятник «Погибшим при защите Отечества». В церемонии открытия приняли участие помощник Президента России Игорь Левитин, специальный представитель Президента России по вопросам природоохранной деятельности, экологии и транспорта Сергей Иванов, министр транспорта Евгений Дитрих, заместитель министра транспорта России Андрей Костюк, губернатор Новгородской области Андрей Никитин, вице-губернатор Санкт-Петербурга Максим Соколов и председатель правления ГК «Автотор» Вячеслав Петушенко.

Бронзовый монумент высотой более 3 метров является основой мемориала. Он расположен на трассе М-11 по ходу движения из Санкт-

Петербурга в Москву. Мемориал находится в знаковом месте. Мясной Бор — название деревни в Новгородской области — стало символом одной из самых драматичных страниц в истории Великой Отечественной войны. В 1942 году здесь в страшных кровопролитных боях погибли многие части Волховского фронта, в том числе Вторая ударная армия. На сравнительно небольшом участке в новгородских болотах, названном «Долиной смерти», навсегда остались десятки тысяч солдат. Погибло свыше 50 000 красноармейцев, около 30 000 человек попали в плен, 13 000—15 000 сумели вырваться.

На основе информации пресс-службы
Министерства транспорта России

<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9602> ●

A MONUMENT TO «FOR THOSE WHO HAVE FALLEN DEFENDING THE MOTHERLAND» HAS BEEN UNVEILED

On June 27, 2020, in Novgorod region, at the 561st kilometer of the M-11 «Neva» Moscow—St. Petersburg highway, the monument to «For those who have fallen defending the Motherland» was unveiled. The ceremony was attended by Igor Levitin, the aide to the President of the Russian Federation, Sergey Ivanov, the President's special representative for environmental protection, ecology and transport, Evgeny Dietrich, Minister of transport, Andrei Kostyuk, deputy Minister of transport, Andrey Nikitin, Novgorod region Governor, Maxim Sokolov, St. Petersburg Deputy Governor, and Vyacheslav Petushenko, Chairman of the Board of Avtodor company.

The bronze monument, more than 3 meters high, is the main part of the memorial. It is located on the M-11 highway on the way from St. Petersburg to Moscow.

The memorial is in an iconic location. Myasnoy Bor, the name of the village in the Novgorod region, became a symbol of one of the most dramatic pages in the history of the Great Patriotic war. In 1942, many regiments of the Volkhov Front, including the 2nd Shock Strike Army, were killed here in terrible bloody battles. Tens of thousands of soldiers remained for ever in a relatively small area in the Novgorod marshes, called the «Valley of Death». More than 50,000 Red Army soldiers were killed, about 30,000 people were captured, 13,000 to 15,000 managed to escape.

Based on the information of the press service of
the Ministry of transport of the Russian Federation:
<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9602> ●

ТРАНСПОРТ МИР

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

3²⁰²⁰
(88)

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

Борис ЛЁВИН, Виктор ЦВЕТКОВ, Андрей ОХОТНИКОВ

Применение моделей вероятностных ситуаций на железной дороге . . . 6

Иосиф СПИРИН

Определение затрат времени пассажиров на поездки в городах 28

Владимир ТРЕГУБОВ

Перспективные направления современных научных исследований в сфере умной мобильности 44

НАУКА И ТЕХНИКА

Владимир БЕЛЬКОВ, Георгий ГОГРИЧАНИ

Физические механизмы подъёма балластных гранул при прохождении высокоскоростных поездов 54

Анатолий ВОЛКОВ, Максим МОРОЗОВ, Василий КУЗЮКОВ

Повышение частотной эффективности сигналов с абсолютной фазовой манипуляцией на 180° 72

Олег ТАРОВИК, Александр РЕУЦКИЙ, Александр ТОПАЖ

Оценка потерь бункерного СПГ от испарения 84

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Иван КОЗЕЛЬСКИЙ

Ключевые ошибки при разработке документов транспортного планирования 108

Михаил НЕМЧИНОВ, Александр ХОЛИН

Тенденции развития комплексных транспортных схем городов 120

Реваз ДУНДУА

Развитие системы корпоративного управления в железнодорожных компаниях 134

Алексей ПОПОВ, Ольга СУСЛОВА, Елена ВОРОНКОВА

Оптимизация процесса выгрузки железорудного сырья на примере металлургического комбината 148

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», 2020

БЕЗОПАСНОСТЬ

Константин БОЧКОВ, Дмитрий КОМНАТНЫЙ

Метод для расчётных оценок характеристик
безопасности железнодорожной автоматики 164

Светлана ШВЕЦОВА, Алексей ШВЕЦОВ

Обеспечение безопасности при эксплуатации
беспилотных летательных аппаратов
на объектах транспортной инфраструктуры 174

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Дмитрий ЛЕВИН

Строительство Великого Сибирского пути. 190

Николай ГРИГОРЬЕВ

Евгений Оскарович Патон (к 150-летию со дня рождения). 214

Пресс-архив. О путях развития железных дорог (1910). 225

Этот год в истории транспорта: 1910.

Первый взлёт самолёта с воды. 242

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Алла ШЕЛИХОВА

Весь Маглев по алфавиту. 244

Авторефераты диссертаций 248

Новые книги о транспорте 255

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

Первый смарт-контракт ОАО «РЖД»
на сопровождение грузовой перевозки 27

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 в полиграфическом центре ФГУП
Издательство «Известия», 127254, Москва, ул. Добролюбова, д. 6,
тел.: (495) 650-38-80, izv-udprf.ru.

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

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

World of Transport and Transportation

•THEORY
•HISTORY
•ENGINEERING
OF THE FUTURE

Vol. 18²⁰²⁰
Iss. 3

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. Kuanyshev,
D.Sc. (Eng), professor of Kazakh
Academy of Transport and
Communications

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

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

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

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

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

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

Tran 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

*Boris A. LYOVIN, Victor Ya. TSVETKOV,
Andrey L. OKHOTNIKOV*

Application of Models of Probabilistic Situations regarding Railway ... 17
Isif V. SPIRIN

Estimation of Travel Time Spending by Urban Transport Passengers ... 36
Vladimir N. TREGUBOV

Promising Modern Research Areas in Smart Mobility. 49

SCIENCE AND ENGINEERING

Vladimir M. BELKOV, *Georgy V. GOGRICHIANI*

Physical Mechanisms of Ballast Granules Flying
during Passage of High-Speed Trains 63

*Anatoly A. VOLKOV, Maksim S. MOROZOV,
Vasily A. KUZUYUKOV*

Improving Frequency Efficiency of Signals with Absolute
Phase Shift Keying by 180° 78

*Oleg V. TAROVIK, Alexander S. REUTSKY,
Alexander G. TOPAZH*

Estimation of Evaporation Losses of Bunker LNG 96

ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL

Ivan Yu. KOZELSKY

Key Mistakes in Development of Transport Planning Documents ... 114
Mikhail V. NEMCHINOV, Alexander S. KHOLIN

Trends in Development of Integrated Transport Schemes for Cities ... 127
Revaz D. DUNDUA

Corporate Governance Development in Railway Companies 141
*Alexey T. POPOV, Olga A. SUSLOVA,
Elena A. VORONKOVA*

Optimization of the Process of Unloading of Iron
Ore Raw Materials: The Case of a Steel Plant 156

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. PUDOVIKOV,
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. OLEYNIK,
editorial secretary
Maria V. MASLOVA,
translator

© Mir Transporta
© World of Transport
and Transportation
© English translation
© 2020. All rights reserved.

SAFETY AND SECURITY

- Konstantin A. BOCHKOV, Dmitry V. KOMNATNIY*
Method for Calculating Safety Features
of Railway Automation Devices 169
Svetlana V. SHVETSOVA, Alexey V. SHVETSOV
Enhanced Security of Unmanned Aerial Vehicles Operations
at Transport Infrastructure Facilities 182

HISTORY WHEEL

- Dmitry Yu. LEVIN*
Construction of the Great Siberian Route 202
Nikolay D. GRIGORIEV
Evgeny O. Paton (to the 150th anniversary of the birth) 220
News from the Archives. On the Ways of Development
of Railway Business (1910) 234
The year in the history of transport: 1910. The First Plane
to Take-off from Water. 242

BIBLIO-DIRECTIONS

- Alla K. SHELIKHOVA*
All Maglev alphabetically... 246
Abstracts of Ph.D. theses 252
New Books on Transport and Transportation 256

EXPRESS INFORMATION

- Russian Railways Implements First
Smart Freight Transport Contract. 27

Published quarterly since 2003. Bimonthly since 2013.
88 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 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 indexed in Russian scientific citation index system, Russian
state library, Socionet, Ulrichsweb, Library of Congress, WorldCat.org.

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.



ВЕРОЯТНОСТНАЯ СИТУАЦИЯ И ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА 6

Теория, которая может послужить, в том числе, и безопасному беспилотному движению.



ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТ 28

Оценка составляющих затраченного на поездку времени поможет пассажирам и организации городского общественного транспорта.

ВЕКТОР НАУКИ 44

Насколько быстро растёт вклад исследовательского сообщества в создание «умной» мобильности? Библиометрический анализ.

PROBABILITY SITUATION AND THE RAILWAY 17

The theory that can facilitate safe driverless driving.

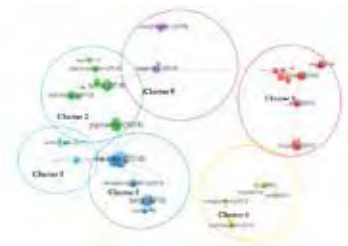
URBAN TRANSPORT 36

Estimates of the elements of the travel time spent will help passengers and will positively affect urban public transport.



SCIENCE VECTOR 49

How fast does contribution of research community to new smart mobility grow? Bibliometric analysis.





Применение моделей вероятностных ситуаций на железной дороге



Борис ЛЕВИН



Виктор ЦВЕТКОВ



Андрей ОХОТНИКОВ

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.

Охотников Андрей Леонидович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия.*

Статья описывает применение моделей информационных вероятностных ситуаций для решения задач управления движением на железной дороге. Раскрывается содержание ситуационного управления. Показано различие между визуальной и «слепой» ситуаций при движении транспорта.

Информационная ситуация вокруг подвижного объекта может быть детерминированной и стохастической. Вводится понятие «стохастическая управленческая информационная ситуация». Выбор альтернатив в стохастических управленческих ситуациях характеризуется организационной, технологической и информационной неопределённостью. Это мотивирует разработку методов и алгоритмов управления, учитывающих неопределённость и многокритериальность при управлении подвижными объектами в таких ситуациях. Ситуационное управление может быть использовано в автоматизированном, кибер-физическом и интеллектуальном управлении.

Статья предлагает модель управления подвижными объектами, основанную на вероятностном подходе в стохастической ситуации и учёте ряда стохастических факторов. Модель основана

на расчёте вероятности существования препятствия на пути движения транспортного объекта. Такая модель может применяться в условиях плохой видимости и возможности получения ошибочной информации от датчиков. Статья даёт систематику вероятностных характеристик стохастической информационной ситуации, сопровождающей подвижный объект. Обосновано применение дихотомического и оппозиционного анализа при изучении препятствий на трассе движения. Модель обнаружения постороннего объекта на трассе движения строится на предположении наличия достоверной и ошибочной информации. В качестве основы анализа используется теория Демпстера–Шафера. Модель стохастической информационной ситуации использует вероятностные характеристики наличия препятствия на трассе. Вероятность существования объекта оценивается с помощью теоремы Байеса. Предлагаемая модель учитывает три фактора стохастической ситуации: информационную неопределённость в сигнале, ложные сигналы, погрешность измерений датчиков. Область применения данной ситуационной модели: цифровая железная дорога, интеллектуальные транспортные системы, транспортные кибер-физические системы.

Ключевые слова: транспорт, обнаружение объектов, стохастическая информационная ситуация, вероятность событий, ситуационный анализ, теория Демпстера–Шафера.

*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.

Охотников Андрей Леонидович – 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, a.ohotnikov@vniias.ru.

Статья поступила в редакцию 01.02.2020, принята к публикации 19.06.2020.

For the English text of the article please see p. 17.

ВВЕДЕНИЕ

Ситуационное управление в области искусственного интеллекта основано на применении семиотических моделей. Ситуационное управление и ситуационный анализ в области информационного управления и технологий практического управления транспортом основаны на применении моделей информационных ситуаций [1; 2]. Информационная ситуация в сфере транспорта описывает факторы, влияющие на характер движения, включая появление других объектов. Информационная ситуация вокруг подвижного объекта может быть детерминированной и стохастической. Соответственно, модели информационной ситуации могут быть детерминированными и стохастическими. Управление транспортом может быть аналитическим и стереотипным. Аналитическое управление основано на анализе параметров состояния объекта и параметров ситуации. На основе анализа всех параметров вырабатывается решение. Стереотипное управление связано с анализом известных стереотипных ситуаций, для которых известно управляющее решение как возможная альтернатива.

Детерминированная ситуация характеризуется наличием причинно-следственных связей. Стохастическая ситуация характеризуется наличием неопределённости. Выбор альтернатив в стохастических ситуациях характеризуется организационной, технологической и информационной неопределённостями. Это обуславливает разработку методов и алгоритмов управления, учитывающих неопределённость и многокритериальность при принятии решений.

При организационном и автоматизированном управлении уместно говорить о методах управления. При транспортном кибер-физическом управлении [3] целесообразно говорить, в первую очередь, об алгоритмах и, во вторую, о методах управления. При интеллектуальном управлении [4] необходимо говорить о правилах, алгоритмах и методах управления. Информационная ситуация [5; 6] — это модель, объединяющая субъект управления (решатель), объект управления (транспортное средство) и окружение объекта управления, влияющее на его состояние.

Ситуационное управление является звеном, соединяющим автоматизирован-

ное, кибер-физическое и интеллектуальное управление. В данной статье представлены алгоритмы расчёта вероятности существования (определения) препятствия (объекта), которые применяются при организации управления транспортным средством (ТС) без человека с использованием «технического зрения». Представлен алгоритм расчёта вероятности существования на уровне датчиков. Показан механизм слияния вероятностей существования от нескольких датчиков. На прикладном уровне вероятность существования может использоваться в алгоритмах интерпретации [7] ситуации для выполнения различных функций для поддержки принятия решений, например, для помощи машинисту или при управлении ТС без машиниста. В данной работе показан комплексный подход к учёту разных факторов для моделирования дискретных задач управления транспортом.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

При беспилотном управлении транспортными средствами (ТС) обязательно используется в явной или в неявной форме модель информационной ситуации. При этом применяют разные по масштабу информационные ситуации. Локальная информационная ситуация — это модель, связанная с состоянием и ближайшим окружением транспортного средства. Визуальная информационная ситуация определяется зоной видимости из транспортного средства. «Слепая» информационная ситуация определяется зоной, которая простирается за зону прямой видимости и может оказывать влияние на ТС, и вероятность визуального обнаружения объекта в этой зоне близка к нулю. Кроме того, возникает ещё одна информационная ситуация, называемая стохастической.

Для измерения параметров «слепой» информационной ситуации применяют специальные измерительные средства, которые позволяют отслеживать препятствия на пути движения: радары, лазерные сканеры, фотокамеры, инфракрасные камеры, ультразвуковые сенсоры, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и другие. Все эти средства позволяют построить комплексную систему технического мони-





торинга ситуации и выявления препятствий на пути ТС.

Одна из главных задач управления скоростным и высокоскоростным железнодорожным транспортом состоит в распознавании объектов, препятствующих движению. Поскольку объекты-препятствия не запланированы и возникают случайным образом, то это приводит к возникновению стохастической информационной ситуации. Стохастическая информационная ситуация характеризуется вероятностными и технологическими факторами. Вероятностные факторы следующие:

- вероятностные характеристики наличия препятствия на трассе;
- вероятностные характеристики отсутствия препятствия на трассе;
- вероятность обнаружения препятствия на трассе;
- вероятность необнаружения препятствия на трассе;
- вероятность систематики движения;
- вероятность нарушения систематики движения.

Обращает на себя дихотомия и оппозиционность пар вероятностных оценок. Это даёт основание применять оппозиционный и дихотомический анализ для пространственного анализа. Технологические характеристики стохастической информационной ситуации обусловлены ошибками и сбоями средств наблюдения. В реальных условиях данные от датчиков систем теленаблюдения содержат неопределённость. Возможны ложные сигналы от датчиков типа «эхо». Разумеется, дополнительно надо учитывать погрешность измерений. Все эти три фактора также характеризуют информационную стохастическую ситуацию.

Ложные срабатывания зависят от природных условий. Ложным измерением называют измерение, которое интерпретируется датчиками или алгоритмами обработки информации как измерение реального объекта препятствия, в то время как на самом деле этого объекта нет. Ложные измерения происходят тем чаще, чем больше ситуация, то есть, чем больше зона наблюдений. В локальной ситуации их мало. В видимой информационной ситуации их мало. В слепой информационной ситуации их больше.

Измерение реального объекта называют истинным измерением. В реальной практике сенсоры и датчики генерируют множество истинных и ложных срабатываний. Ложные срабатывания также имеют место от побочных объектов, которые расположены не на трассе движения, а рядом и помехами движению не являются.

При управлении ТС без машиниста необходимо фильтровать побочные объекты, которые присутствуют рядом с путём движения ТС — столбы, светофоры, ограждения. Это важно при управлении высокоскоростным транспортом, при его интегральном управлении [8].

Стохастическая информационная ситуация включает вероятности существования объекта и вероятности ложных срабатываний датчика. Стохастическая информационная ситуация задаёт условия для вероятностного анализа. В частности, для анализа, является ли сигнал об объекте реальным или ложным. Другими словами, стохастическая информационная ситуация допускает наличие неопределённости и требует её раскрытия.

Наличие вероятностных характеристик и характеристик неопределённости ситуации даёт основание говорить о вероятностном ситуационном управлении. Такое управление описывается в рамках теории Демпстера—Шафера (ТДШ) [9].

Вероятностное ситуационное управление использует вероятностный показатель для каждого сигнала обнаруженного объекта. Используя эмпирическую вероятность случайного обнаружения побочных объектов, их можно отфильтровать с помощью установки порога (разделяющей плоскости) в пространстве параметров.

Следует отметить ещё одну особенность стохастической информационной ситуации — визуальная ситуация и слепая информационная ситуация работают с параметрами реального пространства, а также с вероятностными параметрами. Если использовать множественную оценку распознавания объекта в реальном времени, то это повышает качество обнаружения объекта [10–12]. Причина этого в эргодичности процесса пространственных измерений. Использование стохастической информационной ситуации требует использования апробированных статистических

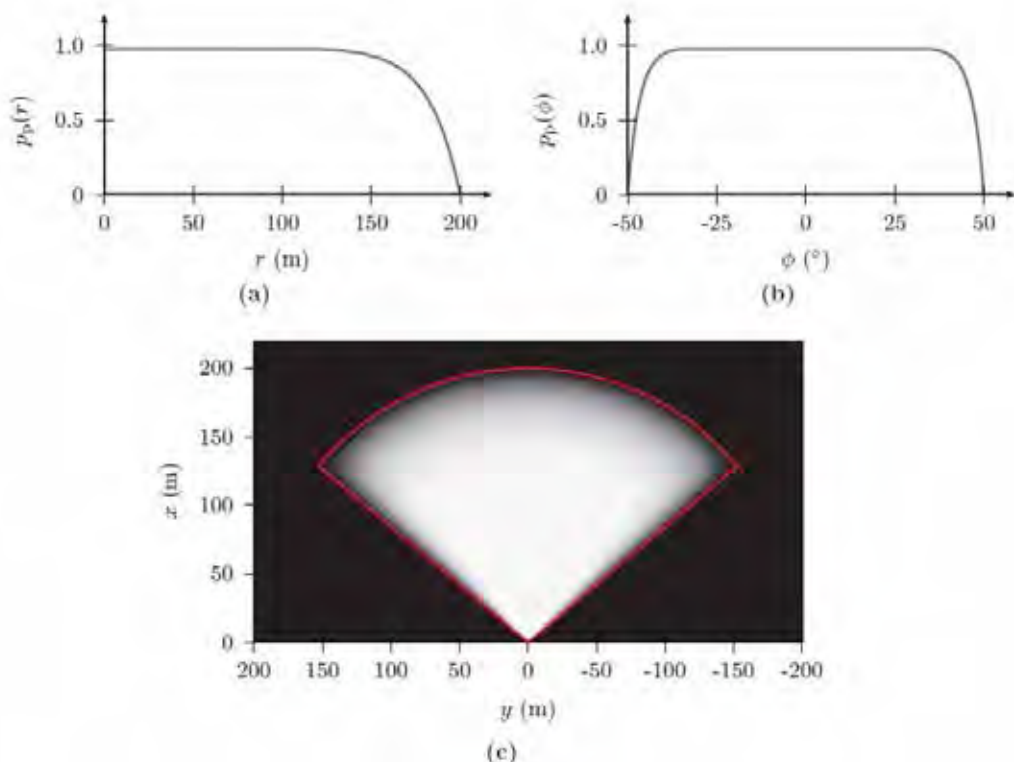


Рис. 1. Моделирование вероятности устойчивости обнаружения в полярных координатах датчика. Модель получена авторами на основе экспериментальных работ.

методов, которые имеют множество реализаций в программном обеспечении. Таким образом, эргодичность и статистические методы являются опорой при анализе стохастической информационной ситуации.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ОБЪЕКТА

Для определения вероятности многих случайных и динамических процессов применяют подход Байеса. С позиций логики это обусловлено тем, что основной силлогизм *modus ponens* является прототипом теоремы Байеса. Теорема Байеса в интерпретации математической логики представляет собой элементарный вывод, который называют *modus ponens* [13]. Теорема Байеса имеет вид:

$$p(x|z) = \frac{p(z|x)p(x)}{p(z)}. \quad (1)$$

В выражении (1) x — величина, подлежащая оценке, $p(x)$ — предварительная вероятность величины, $p(x|z)$ — следующая величина, подлежащая оценке после наблюдения за измерением, $p(z|x)$ — измерение,

произведённое из оцениваемого значения, и $p(z)$ — нормализующий фактор. Для упрощения выражения $p(z)$ его часто заменяют нормализующим фактором η таким, что: $p(x|z) = \eta p(z|x)p(x)$. (2)

В выражении (2) величина η гарантирует, что результат оценки правил Байеса среди значения x и его дополнения составляет 1.

Для вероятности существования объекта истинное значение есть x , а его дополнение $\bar{x}$ является вероятностью несуществования объекта. Фактическое измерение или фактофиксирующая модель есть z . Из (2) получаем:

$$p(x|z) = \eta p(z|x)p(x) = p(\exists x_k | Z^k), \quad (3)$$

$$p(\bar{x} | z) = \eta p(z|\bar{x})p(\bar{x}) = p(\nexists x_k | Z^k). \quad (4)$$

Методика обнаружения объектов на пути движения в стохастических ситуациях основана на анализе вероятностных параметров ситуации. Эти параметры следующие: вероятность появления, вероятность появления объекта приближено к другому, вероятность детектирования, вероятность обнаружения, вероятность беспорядка (шума или помех).

Вероятность (устойчивости) обнаружения, p_p (p -persistence) есть оценка вероятности существования объекта. Она применялась в аэрокосмической радиолокации, когда были введены IPDA и JIPDA [14; 15]. Она интерпретировалась как вероятность устойчивости обнаружения объекта с полем зрений 360° в Марковском процессе. В условиях применения датчиков для автомобилей поле зрения одиночного датчика более ограничено. В условиях применения датчиков для локомотива поле зрения ещё более ограничено, и поэтому вероятность устойчивости обнаружения в этом случае выше. Идея использования угла зрения датчика для моделирования вероятности устойчивости обнаружения была введена вначале для автомобильных ТС и затем для железнодорожных ТС. Эту вероятность иногда называют вероятностью выживания. Общая вероятность устойчивости состоит из комбинации вероятности устойчивости в полярных координатах:

$$p_d^{mod}(r, \phi) = p_r \bullet (r) \bullet p_p(\phi). \quad (5)$$

На рис. 1 показан пример моделирования вероятности устойчивости обнаружения для датчика, обращённого вперёд.

Практические данные такие: максимальное расстояние до объекта $r = 200$ м и максимальный угол $\phi = \pm 50^\circ$. Диапазон и угол отсечки выбирались как $m_r = 0,4$ и $m_\phi = 0,3$, соответственно, а α — как 0,01, где (а) показано моделирование по расстоянию r , (б) показано моделирование по углу ϕ , и (в) визуализируется комбинированная вероятность устойчивости в декартовой системе координат.

Вероятность появления (рождения), $p_b(x_{k|k-1})$ (b -birth) введена для прогнозирования существования. Эта вероятность используется для инициализации вероятности существования вновь обнаруженного объекта. Самый простой способ моделирования вероятности появления объекта — принять разумное постоянное значение, например, $p_b(x_{k|k-1}) = 0,1$. Такая константа должна быть выше порога. Выбор постоянной вероятности появления также является наиболее типичным подходом, используемым на практике в сочетании с IPDA и общими вероятностями взаимосвязанных данных — JPDA [14; 15].

В [11] знание о поле зрения датчика и других обнаруженных объектах используется для определения более точной вероятности появления. Вероятность появления моделируется на основе градиента таким образом, что вероятность устойчивости изменяется пропорционально более высокой вероятности появления. Это приводит к тому, что высокая вероятность появления выбирается по краям угла зрения датчика и по видимости объекта.

Вероятность появления объекта приближено к другому в [12] оценивается в предположении, что новые объекты не могут быть созданы в непосредственной близости от уже обнаруженных объектов с высокой вероятностью существования. Функция плотности гипотезы вероятности (PHD — Probability Hypothesis Density) [16] используется для получения вероятности существования объекта в определённой области. Дополнение этой вероятности ко всем объектам в окружающей среде приводит к пространственной вероятности появления любой новой гипотезы появления объекта. Существует множество вариантов моделирования вероятности появления. При выборе модели вероятности появления следует учитывать их простоту или сложность. Тип используемого датчика также влияет на выбор. Например, модель с функцией PHD, представленная в [12], хорошо работает для датчиков, которые могут определять размеры объекта. Другие датчики, такие, как камера, могут больше полагаться на полярную модель вероятности появления, аналогичную модели, представленной в [11].

Вероятность детектирования, $p_d(k)$, (d -detection) представляет собой вероятность обнаружения действительного измерения объекта. Вероятность детектирования влияет на вероятность существования. Существует множество способов моделирования этой вероятности, и они варьируются в зависимости от чувствительности датчика.

В [12] вероятность детектирования лазерного сканера моделируется тангажом ТС и координатой z определяемого объекта, что уменьшает вероятность определения, когда измерительные лучи лазерного сканера находятся выше или ниже определяемого объекта.

Вероятность определения оптическим датчиком камеры также моделируется в [12] с использованием угла зрения камеры, положения определяемого объекта, длины, ширины и ориентации объекта.

Вероятность определения также может быть получена непосредственно из классификатора, например, алгоритмов машинного обучения Adaptive Boosting для камеры [11]. Простейшим решением для моделирования вероятности детектирования является выбор соответствующей константы.

Существует общий подход, в котором вероятность детектирования представляет собой комбинацию трёх значений: смоделированная вероятность детектирования $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$, вероятность измерения $p_d^{meas}(z_k)$ и вероятность отражения сигнала от объекта $p_d^{track}(x_{k|k})$:

$$p_d(k) = p_d^{mod}(x_{k|k-1}) p_d^{meas}(z_k p_d^{track}(x_{k|k})). \quad (6)$$

Если измерение не было связано с объектом, то $p_d^{meas}(z_k)$ и $p_d^{track}(x_{k|k})$ просто игнорируются. Смоделированная вероятность определения $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$ зависит от прогнозируемого состояния измерений, а информация о самих измерениях не учитывается. Идея состоит в том, чтобы смоделировать факт того, что любое местоположение в поле зрения датчика зависит от вероятности того, что датчик сможет произвести действительное измерение в этом месте, где объект должен быть. Самый простой метод основан на предположении того, что датчик может обнаружить объект везде, где он существует. Это приводит к постоянному значению для $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$. Такого предположения может быть достаточно во многих случаях. Модель, которая учитывает чувствительность по углу зрения датчика, улучшает данную модель. Другие свойства датчика, такие как априорное пространственное соотношение сигнал/шум, можно также учесть, особенно для радиолокационных датчиков. Комбинация — моделирование, измерение и вероятность определения объекта — повышают вероятность правильной оценки.

Вероятность беспорядка (шум) часто моделируется как пространственный процесс на основе распределения Пуассона для

обнаружения [11]. Это вероятность того, что ложное измерение происходит в данной области или в течение заданного периода времени. Распределение Пуассона служит для оценки вероятности того, что m измерений являются ложными измерениями в момент времени k , обозначаемый как множество ложных измерений Z_k^F , и является выражением:

$$p_c(|Z_k^F| = m; \lambda) = \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m!}, \quad (7)$$

где λ — параметр уровня пуассоновского процесса.

Параметр уровня, в зависимости от применения процесса Пуассона, может быть определён как единичное возникновение события в случае ложного измерения. Вероятность событий того, что m ложных измерений произошло, задаётся суммой:

$$p_c(|Z_k^F| \leq m; \lambda) = \sum_i^{|Z_k^F|} \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m_i!}. \quad (8)$$

Для применения выражения (8) необходимо оценить количество потенциальных ложных измерений $|Z_k^F|$ и параметр уровня интенсивности λ . Все рассмотренные параметры в совокупности определяют вероятностную информационную ситуацию, которая характеризуется выражением (8).

При обнаружении препятствий один из вариантов анализа объектов, которые определяются датчиками, достигается путём дискретного перебора вероятностей существования объекта. Можно ввести три пороговых уровня для характеристики объекта: порог подтверждения объекта (τ_c), порог неподтверждения объекта (τ_{uc}) и порог удаления объекта (τ_d).

Если вероятность существования объекта достигает порога подтверждения τ_c , он причисляется к подтверждённым и включается в список объектов, которые датчик точно определяет и обнаруживает. Если вероятность существования объекта падает ниже порога неподтверждения τ_{uc} , объект не считается достоверным объектом, но по-прежнему хранится во внутреннем списке объектов датчика.

Для практических целей порог неподтверждения должен быть выбран таким, что $\tau_{uc} < \tau_c$, то есть имеет место эффект обнаружения объектов, проверенных в течение



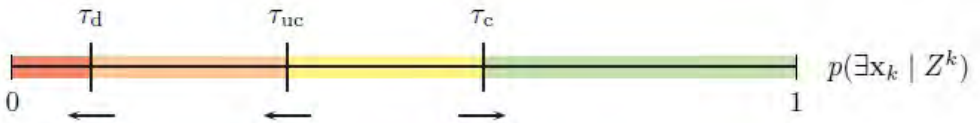


Рис. 2. Пороги существования для подтверждения и удаления объектов. Модель получена авторами на основе теоретических исследований и выдвижения гипотезы о таком соотношении порогов.

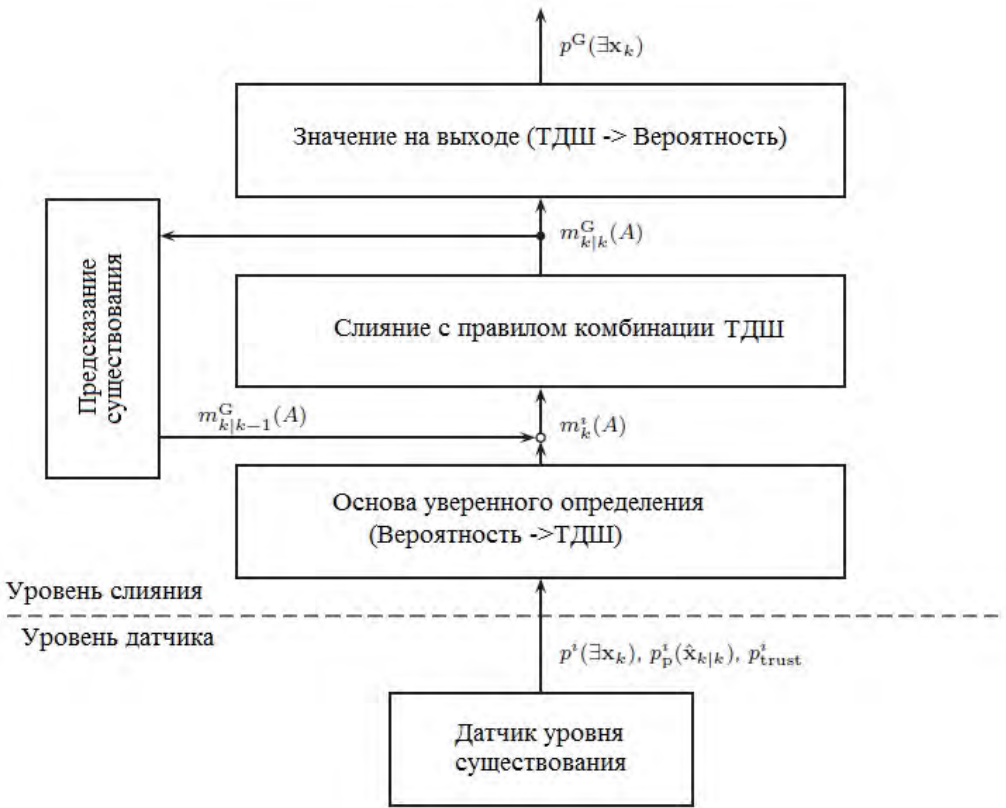


Рис. 3. Оценка вероятности существования от нескольких датчиков с использованием теории доказательств Демпстера–Шафера. Схема составлена авторами на основе обобщения выше рассмотренных алгоритмов.

длительного периода времени, если они уже достигли τ_c когда-то в своей истории. Это фактор эргодичности.

Если вероятность существования объекта падает ниже, он достигает порога удаления τ_d и полностью удаляется из списка объектов, обнаруживаемых датчиком. Рис. 2 показывает отношения между различными порогами существования. Пороговые значения следует выбирать таким образом, чтобы частота обнаружения (истинные положительные и ложные положительные значения) на пороговых значениях гарантировала определённый

желаемый уровень в ситуации движения для данного ТС.

В силу этого возможно определение нескольких порогов подтверждения, особенно для ТС разных скоростных режимов. Каждый порог соответствует разной интенсивности обнаружения. В итоге вероятность существования задаёт параметр «логической надёжности» обнаружения объекта. Такая логическая надёжность может использоваться как фактор помощи машинисту. Например, в интеллектуальной системе безопасности при экстренном торможении с задержкой. Это случай ре-

акции только на объекты, которые соответствует самым высоким значениям порога. Для сравнения «мягкие» системы торможения [17], такие, как адаптивный круиз-контроль, будут реагировать раньше, при определении объектов, которые отвечают нижнему порогу подтверждения.

При комплексном анализе слияния ситуаций необходимо объединить вероятность существования объекта от нескольких датчиков в общий список объектов, используя стратегию интеграции измерений датчиков с общим списком.

Интерфейс объектной модели рассматривает вероятность существования как единственную вероятность, обычно полученную из байесовского алгоритма оценки или из алгоритма IPDA/JIPDA [14; 15]. Однако для того, чтобы воспользоваться преимуществами работы различных датчиков и справиться со сложными ситуациями, такими, как непрозрачность (окклюзии), одного значения для моделирования вероятности существования на уровне слияния недостаточно. Поэтому вероятность существования моделируется с помощью ТДШ в модуле слияния, как будет описано далее, а затем преобразуется обратно в единственное значение вероятности существования на выходе модуля слияния. Поток обработки для слияния вероятностей существования показан на рис. 3.

СИТУАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ДЕМПСТЕРА–ШАФЕРА

Моделирование и интеграция с теорией ТДШ описано в [18] для трансформации измерений от датчика к датчику. В этом случае используется тот же метод анализа вероятностей. Подробный обзор теории доказательств Демпстера–Шафера (ДШ) и её многочисленных приложений приведен в [9].

Теория ДШ определяет систему распознавания объектов, состоящую из взаимоисключающих гипотез или состояний системы. Для моделирования существования наиболее простым набором взаимоисключающих гипотез является то, что объект существует, $\exists$, или не существует, $\nexists$, такой, что:

$$\Theta = \{\exists, \nexists\}. \quad (9)$$

Затем ТДШ определяет множество значений 2^Θ , которое является набором всех подмножеств Θ , включая пустое множество $\emptyset$. Для моделирования существования, как определено в (9), это приводит к выражению (10):

$$2^\Theta = \{\emptyset, \{\exists\}, \{\nexists\}, \{\exists, \nexists\}\}. \quad (10)$$

Множество значений содержит все комбинации, которые позволяют присваивать значения доверия не только для взаимоисключающих гипотез, но и для их комбинаций. Это может быть использовано для моделирования незнания или неопределённости в измерениях от нескольких датчиков, которые могут иметь различные характеристики точности (оптические камеры, радары, лидары). Моделирование неопределённости допустимо в выводах для традиционных байесовских методов. Множество значений для существования объекта включает подмножество $\{\exists, \nexists\}$, которое включает значения доверия с информацией о существовании объекта, которая неоднозначна. Для каждого множества значений определяют базовое значение доверия (BBA-Basic Belief Assignment), часто называемое также массовой функцией, где: $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$.

Базовое значение доверия BBA, или массовая функция, представляет собой количество измерений таких, что каждый элемент из 2 верных будет считаться правдоподобным. Если BBA используется только для взаимоисключающих гипотез, то ТДШ эквивалентна традиционным байесовским методам. Назначение BBA для множества значений должна быть отрегулирована таким образом, чтобы:

$$\sum_{A: A \in \Theta} m(A) = 1. \quad (12)$$

Кроме того, ТДШ определяет функцию веры (доверия):

$$Bel(A) = \sum_{B: B \subseteq A} m(B), \quad (13)$$

которая содержит базовое значение доверия (BBA) для всех подмножеств A , которое может быть интерпретировано как нижняя граница вероятности показаний для A . Вероятность верхней границы для показаний во множестве значений A определяется как правдоподобие:

$$Pl(A) = \sum_{B: B \cap A \neq \emptyset} m(B), \quad (14)$$

где $Pl(A)$ содержит все множества в (2), которые поддерживают меру доверия в A .





Рис. 4. Информационная ситуация плохой видимости, требующая вероятностной оценки.
[Электронный ресурс]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

Эта разница между доверием и правдоподобием представляет собой сумму неопределённости в показаниях для *A*.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Для обнаружения препятствий на практике обязательным стало применение «технического» или «машинного зрения» для помощи машинисту, особенно в условиях плохой видимости. Глаз человека не способен определить некоторые объекты, когда видимость недостаточно хорошая. Так зимой, когда снег заметает рельсовые пути и скрывает препятствия, важно точно определять, как же вести поезд. На помощь приходят различные алгоритмы и математические модели для комплексирования данных, которые приходят от датчиков. Данные приходится фильтровать по зоне интереса относительно рельсовой колеи, проводить ассоциацию объектов, инициализацию новых объектов, обновляя состояние существующих объектов, и при помощи моделирования с применением ТДШ управлять стохастическими объектами, т.е. подтверждать или удалять из базы знаний. На рис. 4. приведена информационная ситуация плохой видимости, которая находится между «видимой» и «слепой».

По зарубежным данным, вероятностная система обнаружения препятствий при движении поезда по железнодорожной магистрали может работать на дистанциях

до 2000 м при скоростях до 200 км/ч, например, система RODS — Rail Obstacle Detection System¹. Данная система обнаружения препятствий на железнодорожном пути выявляет препятствие и передаёт машинисту поезда сигналы тревоги в реальном времени.

Это автономная система (рис. 5) направлена на решение более 80 % связанных с погодными условиями трудностей обнаружения препятствий путём расширения диапазона визуализации для машиниста более чем в четыре раза, тем самым она предотвращает дорогостоящие и опасные события, не допуская аварийные ситуации и обеспечивая безопасность движения.

Решение RODS предлагает в помощь машинисту или оператору (в случае дистанционного управления) полный визуальный контроль с применением отдельно стоящего, установленного на крыше комплекта оборудования для визуализации. Для этого применяются современные электрооптические датчики (в видимом и тепловом диапазоне) (рис. 6), с возможностями слияния данных. На рис. 6 показано распознавание объекта, основанное на вероятностных моделях. Такое распознавание не под силу человеку. Распознавание основано на вероят-

¹ [Электронный ресурс]: <https://www.railvision.io/the-platform/main-line-vision/>. Доступ 12.01.2020.

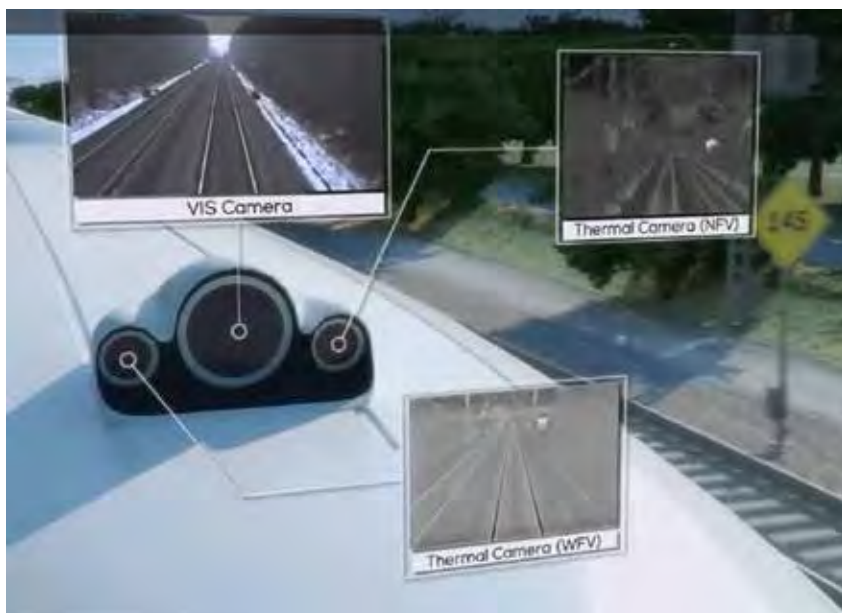


Рис. 5. Система поддержки вождения, направленная на обнаружение препятствий.
[Электронный ресурс]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

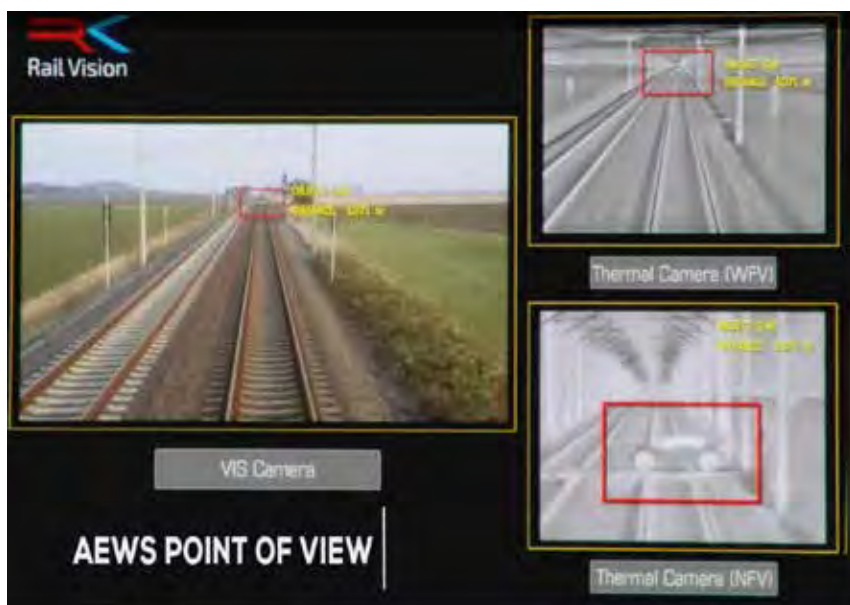


Рис. 6. Система обнаружения препятствий, основанная на ситуационном вероятностном анализе.
[Электронный ресурс]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

ностном анализе и использовании библиотеки образов.

Такая технология позволяет оператору и машинисту получать аварийные оповещения в режиме реального времени для принятия решения при движении, снижая расходы, связанные с возможным ущербом или гибелью людей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель информационной вероятностной ситуации и анализа на её основе может быть использована для управления в автоматизированных и в транспортных кибер-физических системах. По существу, данный подход является применением поэлементного (операционного) системного

анализа применительно к области вероятностной логики [19]. Особенностью подхода в данной работе является замена понятия «альтернатива» понятием «альтернативные информационные ситуации», которое затем трансформируется в «вероятностные информационные ситуации». Альтернативная информационная ситуация является более структурированной моделью с рядом ограничений, которые привязывают её к транспортной сфере. Информационная транспортная ситуация имеет тринитарную сущность: побочные объекты, объект управления и семантическое окружение объекта управления. Семантическое окружение пространственного объекта и его образа является качественным отличием данного метода. Оно означает использование пространства параметров из библиотеки образов для сопоставления с пространственными образами, зафиксированными с помощью датчиков. Введение вероятностных параметров в параметры информационной ситуации даёт возможность применять теорию Демпстера–Шафера и автоматически становится советующим экспертным методом, применимым в транспортных кибер-физических системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Объектные и ситуационные модели при управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. — 2017. — № 2 (2). — С. 2–10. [Электронный ресурс]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/02_2017/06_2017.pdf. Доступ 11.05.2020.
2. Титов Е. К. Информационное ситуационное управление // Государственный советник. — 2019. — № 1 (25). — С. 51–56. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-situatsionnoe-upravlenie/pdf>. Доступ 11.05.2020.
3. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Кибер-физические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. — 2018. — № 2 (75). — С. 138–145. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/viewFile/1441/1717>. Доступ 11.05.2020.
4. Коваленко Н. И. Извлечение знаний для интеллектуальных транспортных систем // Перспективы науки и образования. — 2014. — № 5. — С. 45–52. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/izvlechenie-znaniy-dlya-intellektualnyh-transportnyh-sistem/pdf>. Доступ 11.05.2020.
5. Tsvetkov, V. Ya. Information Situation and Information Position as a Management Tool. European researcher. Series A. 2012, Vol. 36, Iss. 12 (1), pp. 2166–2170. [Электронный ресурс]: <http://docplayer.ru/25906936-Information-situation-and-information-position-as-a-management-tool-viktor-ya-tsvetkov.html>. Доступ 11.05.2020.
6. Павловский А. А., Охотников А. Л. Информационная транспортная ситуация // Наука и технологии железных дорог. — 2018. — № 2 (6). — С. 16–24. [Электронный ресурс]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/02_2018/2_2018.pdf. Доступ 11.05.2020.
7. Павловский А. А. Формальная интерпретация // Перспективы науки и образования. — 2017. — № 4 (28). — С. 18–22. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary_29904637_56184823.pdf. Доступ 11.05.2020.
8. Цветков В. Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. — 2013. — № 5 (49). — С. 6–9. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/441>. Доступ 11.05.2020.
9. Охотников А. Л. Применение теории Демпстера–Шафера для оптимизации перевозок // Наука и технологии железных дорог. — 2018. — № 4 (8). — С. 61–74. [Электронный ресурс]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/01_2019/01_2019.pdf. Доступ 11.05.2020.
10. Musicki, D., Evans, R. Joint Integrated Probabilistic Data Association: JIPDA. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 3, pp. 1094–1099, July 2004. DOI: 10.1109/TAES.2004.133748.
11. Mahlisch, M., Ritter, W., Dietmayer, K. De-cluttering with Integrated Probabilistic Data Association for Multisensor Multitarget ACC Vehicle Tracking. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey, June 2007, pp. 178–183. DOI: 10.1109/IVS.2007.4290111.
12. Munz, M., Maehlich, M., Dickmann, J., Dietmayer, K. Probabilistic Modeling of Sensor Properties in Generic Fusion Systems for Modern Driver Assistance Systems. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego (CA), USA, June 2010, pp. 760–765. DOI: 10.1109/IVS.2010.554804.
13. Кудж С. А., Цветков В. Я. Логика и алгоритмы: Монография. — М.: МАКС Пресс, 2019. — 112 с.
14. Wenbo, He; Hoang, Nguyen; Xue, Liu; Nahrstedt, K.; Abdelzaher, T. iPDA: An integrity-protecting private data aggregation scheme for wireless sensor networks. MILCOM 2008–2008 IEEE Military Communications Conference. IEEE, 2008. pp. 1–7. [Электронный ресурс]: <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/11413/iPDA%20An%20Integrity-Protecting%20Private%20Data%20Aggregation%20Scheme%20for%20Wireless%20Sensor%20Networks.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Доступ 11.05.2020.
15. Musicki, D., Evans, R. Joint integrated probabilistic data association: JIPDA. IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2004. Vol. 40, Iss. 3, pp. 1093–1099. DOI: 10.1109/TAES.2004.133748.
16. Ba-Ngu, Vo; Wing-Kin, Ma. The Gaussian mixture probability hypothesis density filter. IEEE Transactions on signal processing, 2006. Vol. 54, Iss. 11, pp. 4091–4104. DOI: 10.1109/TSP.2006.881190.
17. Охотников А. Л., Дзюба Ю. В. Мягкое ситуационное управление // Сб. Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018). Труды седьмой научно-техн. конференции. — 2018. — С. 62–64. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary_36916645_17254769.pdf. Доступ 11.05.2020.
18. Aeberhard, M., Paul, S., Kaempchen, N., Bertram, T. Object Existence Probability Fusion using Dempster–Shafer Theory in a High-Level Sensor Data Fusion Architecture. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Baden-Baden, Germany, June 2011, pp. 770–775. DOI: 10.1109/IVS.2011.594043.
19. Господинов С. Г. Вероятностно логический анализ // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2019. — № 1. — С. 3–8. [Электронный ресурс]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/03_2019/03_2019.pdf. Доступ 11.05.2020.



Application of Models of Probabilistic Situations regarding Railways

**Boris A. LYOVIN****Victor Ya. TSVETKOV****Andrey L. OKHOTNIKOV**

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

Tsvetkov, Victor Ya., Research and Design Institute for Informatization, Automation and Communication in Railway Transport, Moscow, Russia.

Okhotnikov, Andrey L., Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport, Moscow, Russia.*

ABSTRACT

The article describes application of models of information probabilistic situations for solving problems of traffic control on the railway. The content of situational control is revealed. The difference between a visual and a «blind» situation during vehicle's movement is shown.

The information situation around a moving object can be deterministic and stochastic. The concept of a stochastic information control situation is introduced. The choice of alternatives in stochastic control situations is characterized by organizational, technological, and informational uncertainties. This motivates development of control methods and algorithms that consider uncertainty and multicriteria in control of moving objects in such situations. Situational control can be used in automated, cyber-physical and intelligent control.

The article proposes a model for controlling mobile objects based on a probabilistic approach in a stochastic situation and on the consideration of a number of stochastic factors. The model is

based on calculating the probability of existence of an obstacle in the path of a vehicle. Such a model can be used under the conditions of poor visibility and a probability of receiving erroneous information from sensors. The article gives a systematics of the probabilistic characteristics of a stochastic information situation accompanying a moving object. The application of dichotomous and oppositional analysis in studying obstacles on the route has been substantiated. The model for detecting a foreign object on a traffic route is based on the assumption of the presence of reliable and erroneous information. The analysis is based on Dempster–Schafer theory. The stochastic information situation model uses the probabilistic characteristics of the presence of an obstacle on the track. The probability of an object's existence is estimated using Bayes' theorem. The proposed model considers three factors of the stochastic situation: informational uncertainty in the signal; false signals, sensor measurement error. The field of application of this situational model comprises digital railway, intelligent transport systems, transport cyber-physical systems.

Keywords: transport, detection of objects, stochastic information situation, probability of events, situation analysis, Dempster–Schafer theory.

*Information about the authors:

Lyovin, Boris A. – D.Sc. (Eng), Professor, President of Russian University of Transport, Moscow, Russia, tu@miit.ru.

Tsvetkov, Victor Ya. – D.Sc. (Eng), Professor, Deputy Head of the Centre for Strategic Analysis and Development of JSC Research and Design Institute for Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (JSC NIIAS), Moscow, Russia, cvj2@mail.ru.

Okhotnikov, Andrey L. – Deputy Head of the Centre for Strategic Analysis and Development of JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (JSC NIIAS), Moscow, Russia, a.ohotnikov@vniias.ru.

Article received 01.02.2020, accepted 19.06.2020.

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

Background.

Situational management in the field of artificial intelligence is based on the use of semiotic models. Situational management and situation analysis in the field of information management and practical transport management technologies are based on the use of models of information situations [1; 2]. The information situation in the field of transport describes the factors that influence the nature of movement, including the appearance of other objects. The information situation around a moving object can be deterministic and stochastic. Accordingly, the models of the information situation can be deterministic and stochastic. Transport management can be analytical and stereotyped. Analytical control is based on the analysis of parameters of the state of an object and of parameters of the situation. Based on the analysis of all parameters, a solution is developed. Stereotypical control is associated with the analysis of known stereotypical situations for which the control decision is known as a possible alternative.

The deterministic situation is characterized by the presence of cause-and-effect relationships. The stochastic situation is characterized by the presence of uncertainty. The choice of alternatives in stochastic situations is characterized by organizational, technological, and informational uncertainties. This leads to development of methods and control algorithms that consider uncertainty and multi-criteria in decision-making.

Regarding organizational management and automated control, it is appropriate to talk about management methods. Regarding transport cyber-physical control [3], it is appropriate to speak, first, about algorithms and, secondly, about control methods. Regarding intelligent control [4], it is necessary to talk about rules, algorithms, and control methods. Information situation [5; 6] is a model that combines the agent of control (solver), the controlled object (vehicle) and the environment of the controlled object that affects its state.

Situational control is a link connecting automated, cyber-physical and intelligent control. This article presents algorithms for calculating the probability of existence (identification) of an obstacle (object), which are used in organizing control of a vehicle without a person but using «technical vision».

An algorithm for calculating the probability of existence at the level of sensors is presented. The mechanism of merging the probabilities of existence from several sensors is shown. At the applied level, the probability of existence can be used in interpretation algorithms [7] of a situation to perform various functions to support decision-making, for example, to help a driver or when driving a driverless vehicle. This paper shows an integrated approach to considering various factors for modelling discrete transport control problems.

Information stochastic situation

A model of the information situation is necessarily used in an explicit or implicit form for unmanned vehicle control (TS). In this case, information situations of different scale are used. Local information situation is a model associated with the state and immediate environment of a vehicle. Visual information situation is determined by the visibility area out of the vehicle. A «blind» information situation is determined by an area that extends beyond the line of sight and can affect the vehicle, and the probability of visual detection of an object in this area is close to zero. Besides, another information situation arises, called stochastic.

To measure the parameters of a «blind» information situation, special measuring instruments are used that allow tracking obstacles in the path of movement: radars, laser scanners, cameras, infrared cameras, ultrasonic sensors, unmanned aerial vehicles (UAV), and others. All these tools allow building a comprehensive system for technical monitoring of the situation and identification of obstacles in the vehicle's path.

One of the main tasks of controlling speed and high-speed railway transport is to recognize objects that impede movement. Since obstacle objects are not planned and arise randomly, this leads to emergence of a stochastic information situation. Stochastic information situation is characterized by probabilistic and technological factors. The probabilistic factors are as follows:

- probabilistic characteristics of the presence of an obstacle on the track;
- probabilistic characteristics of the absence of obstacles on the track;
- probability of detecting obstacles on the track;
- probability of not detecting obstacles on the track;

- probability of systematics of movement;
- probability of violation of systematics of movement.

The dichotomy and oppositionality of pairs of probabilistic assessments draws attention to themselves. This gives rise to application of oppositional and dichotomous analysis for spatial analysis. The technological characteristics of the stochastic information situation are due to errors and failures of monitoring means. In real conditions, data from sensors of TV monitoring systems contain uncertainty. False «echo» signals from sensors are possible. Of course, the measurement error must additionally be considered. All these three factors also characterize the information stochastic situation.

False positives are subject to environmental conditions. A false measurement is a measurement that is interpreted by sensors or information processing algorithms as a measurement of a real object of an obstacle, while in fact this object does not exist. The more often false measurements occur, the larger is the situation, that is, the larger is the observation area. In a local situation, there are few of them. There are few of them in the visible information situation. There are more of them in a blind informational situation.

The measurement of a real object is called true measurement. In real practice, sensors and gauges generate a lot of true and false alarms. False positives also occur from side objects that are not located on the traffic route, but nearby and do not interfere with movement.

When driving a driverless vehicle, it is necessary to filter the side objects that are present near the vehicle's path: pillars, posts, traffic lights, fences. This is important while controlling high-speed transport, during its integral controlling [8].

The stochastic information situation includes the probabilities of existence of the object and the probabilities of false alarms of the sensor. The stochastic information situation sets the conditions for probabilistic analysis. In particular, it analyzes whether the signal about an object is real or false. In other words, a stochastic information situation allows for the presence of uncertainty and requires its disclosure.

The presence of probabilistic characteristics and characteristics of uncertainty of the situation gives ground to speak of probabilistic

situational control. Such control is described within the framework of Dempster–Schafer theory (DST) [9].

Probabilistic situational control uses a probabilistic metric for each signal of a detected object. Using empirical probability of accidentally detecting side objects, they can be filtered by setting a threshold (dividing plane) in the parameter space.

One more feature of the stochastic information situation should be noted: visual situation and blind information situation work with parameters of the real space, as well as with probabilistic parameters. If we use multiple assessment of object recognition in real time, then this improves quality of object detection [10–12]. The reason for this is ergodicity of the spatial measurement process. The use of a stochastic information situation requires the use of proven statistical methods that have many implementations in software. Thus, ergodicity and statistical methods are pillars in the analysis of the stochastic information situation.

Estimating the probability of detecting a real object

The Bayesian approach is used to determine the probability of many random and dynamic processes. From the standpoint of logic, this is due to the fact that the basis of the syllogism *modus ponens* is the prototype of Bayes' theorem. Bayes' theorem in interpretation of mathematical logic is an elementary conclusion, which is called *modus ponens* [13]. Bayes' theorem is:

$$p(x|z) = \frac{p(z|x)p(x)}{p(z)}. \quad (1)$$

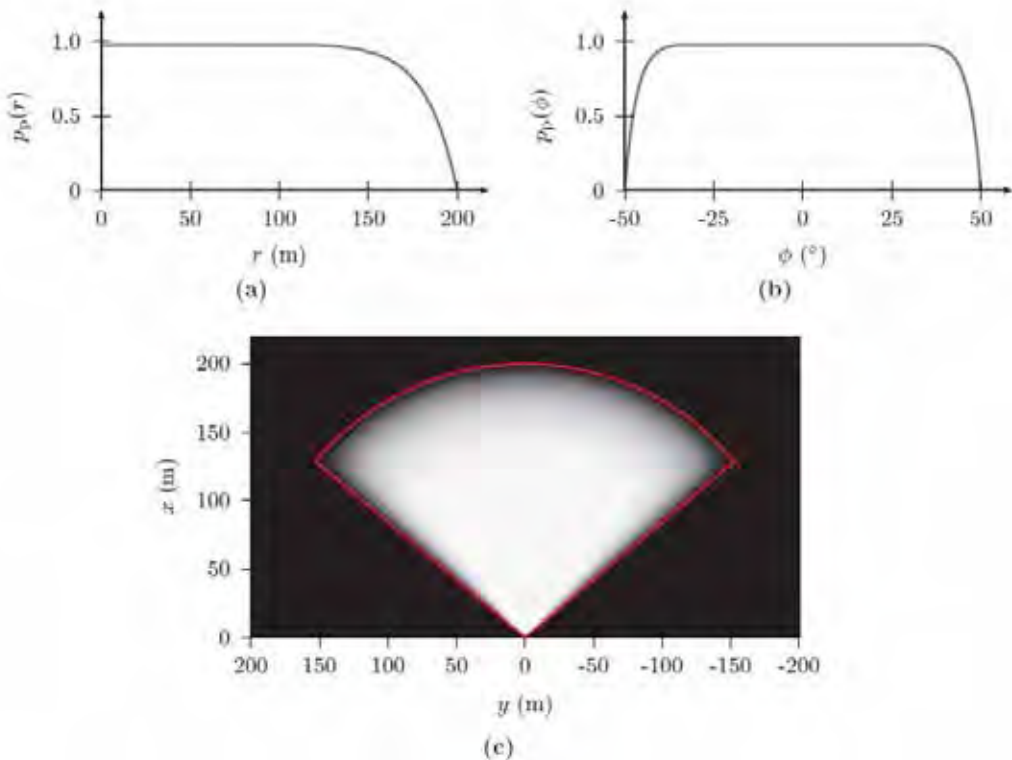
In expression (1), the x -quantity is the quantity to be estimated, $p(x)$ – preliminary probability of the quantity, $p(x|z)$ – next quantity to be estimated after observing the measurement, $p(z|x)$ – measurement made from the estimated values, and $p(z)$ – normalizing factor. To simplify the expression $p(z)$, it is often replaced by a normalizing factor η such that:

$$p(x|z) = \eta p(z|x)p(x). \quad (2)$$

In expression (2), the value of η guarantees that the result of evaluating the Bayes rules among the value of x and its complement is 1.

For the probability of the existence of an object, the true value is x , and its complement





Pic. 1. Modelling the probability of stability of detection in polar coordinates of the sensor. The model was obtained by the authors on the basis of experimental work.

$\bar{x}$ is the probability of the non-existence of the object. The actual measurement or fact fixing model is z . From (2) we get:

$$p(x|z) = \eta p(z|x)p(x) = p(\exists x_k | Z^k), \quad (3)$$

$$p(\bar{x} | z) = \eta p(z | \bar{x}) p(\bar{x}) = p(\nexists x_k | Z^k). \quad (4)$$

The method of detecting objects on the path of movement in stochastic situations is based on the analysis of probabilistic parameters of the situation. These parameters are as follows: probability of occurrence, probability of an object being close to another, probability of detection, probability of detection, probability of disorder (noise or interference).

The probability (persistence) of detection, p_p (p -persistence) is an estimate of the probability of existence of an object. It was used in aerospace radar when IPDA and JIPDA were introduced [14; 15]. It was interpreted as the probability of stability of detecting an object with a field of view of 360° in the Markov process. With automotive sensors, the field of view of a single sensor is more limited. In the conditions of using sensors for a locomotive, the field of view is even more limited and therefore the probability of detection stability

in this case is higher. The idea of using the sensor's angle of view to simulate the probability of detection stability was first introduced for road vehicles and then for railway vehicles. This probability is sometimes called the probability of survival. The overall stability probability consists of a combination of the stability probability in polar coordinates:

$$p_d^{mod}(r, \phi) = p_p(r) \cdot p_p(\phi). \quad (5)$$

Pic. 1 shows an example of modelling the probability of detection stability for a sensor facing forward.

Practical data are as follows: the maximum distance to the object $r = 200$ m, and the maximum angle $\phi = \pm 50^\circ$. The range and cutoff angle were chosen as $m_r = 0,4$ and $m_\phi = 0,3$, respectively, and α as $0,01$, where (a) modelling by distance r is shown, (b) modelling by angle ϕ is shown, and (c) the combined probability of stability in the Cartesian coordinate system is visualized.

The probability of occurrence (birth) $p_b(x_{k|k-1})$, (b -birth) is introduced to predict existence. This probability is used to initialize the probability of existence of a newly discovered

object. The easiest way to model the likelihood of an object emergence is to take a reasonable constant value, for example, $p_b(x_{k|k-1}) = 0,1$. This constant must be above the threshold. The choice of a constant probability of occurrence is also the most typical approach used in practice in combination with IPDA and general probabilities of related data, JPDA [14; 15].

In [11], the knowledge about the sensor's field of view and other detected objects is used to determine a more accurate probability of occurrence. The probability of occurrence is modelled based on the gradient such that the probability of stability changes in proportion to the higher probability of occurrence. This leads to the fact that high probability of occurrence is selected at the edges of the angle of view of the sensor and visibility of the object.

The probability of appearance of an object that is close to another in [12] is estimated on the assumption that new objects cannot be created in the immediate vicinity of already discovered objects with a high probability of existence. The density function of the hypothesis of probability (PHD – Probability Hypothesis Density) [16] is used to obtain the probability of existence of an object in a certain area. The addition of this probability to all objects in the environment results in the spatial probability of any new hypothesis for appearance of an object. There are many options for modelling the probability of occurrence. When choosing a probability model, one should consider their simplicity or complexity. The type of sensor used also influences the selection. For example, the PHD model presented in [12] works well for sensors that can determine the size of an object. Other sensors, such as the camera, may rely more on a polar probability of occurrence model similar to the model presented in [11].

Detection probability. The probability of detection, $p_d(k)$, (d -detection) is the probability of detecting a valid dimension of the object. The probability of detection affects the probability of existence. There are many ways to simulate this probability, and they vary depending on sensitivity of the sensor.

In [12], the probability of detecting with a laser scanner is modelled by the pitch of the vehicle and the z coordinate of the object being detected, which reduces the probability of detection when the measuring beams of the

laser scanner are above or below the object being detected.

The probability of detecting with a camera by the optical sensor is also modelled in [12] using the camera's angle of view, the position of the detected object, length, width, and orientation of the object.

The probability of detection can also be obtained directly from the classifier, for example, using the Adaptive Boosting machine learning algorithms for the camera [11]. The simplest solution for modelling the probability of detection is to choose an appropriate constant.

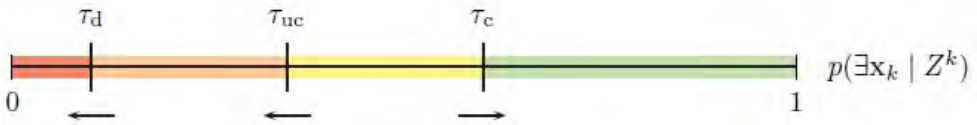
There is a general approach where the probability of detection is regarded as combination of three values: the simulated probability of detection $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$, the probability of measurement $p_d^{meas}(z_k)$ and the probability of signal reflection from the object $p_d^{track}(x_{k|k})$:

$$p_d(k) = p_d^{mod}(x_{k|k-1}) p_d^{meas}(z_k) p_d^{track}(x_{k|k}). \quad (6)$$

If the measurement was not associated with an object, then $p_d^{meas}(z_k)$ and $p_d^{track}(x_{k|k})$ are simply ignored. The simulated detection probability $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$ depends on the predicted state of measurements, and information about the measurements themselves is not considered. The idea is to simulate the fact that any location within the sensor's field of view depends on the likelihood that the sensor can actually make a measurement at that location where the object should be. The simplest method is based on the assumption that the sensor can detect an object wherever it exists. This results in a constant value for $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$. This assumption may be sufficient in many cases. A model, that considers the sensor's viewing angle sensitivity, improves this model. Other properties of the sensor, such as the prior spatial signal-to-noise ratio, can also be considered, especially for radar sensors. The combination of modelling, measuring, and identifying an object increases the likelihood of correct assessment.

The probability of disorder. The probability of disorder (noise) is often modelled as a spatial process based on the Poisson distribution for detection [11]. This is the probability that a false measurement occurs in a given area or within a given period of time. The Poisson distribution is used to estimate the probability





Pic. 2. Thresholds of existence for confirmation and deletion of objects. The model was obtained by the authors based on theoretical research and the hypothesis of such a threshold ratio.

that m measurements are false measurements at time k , denoted as the set of false measurements Z_k^F , and is the expression:

$$p_c(|Z_k^F| = m; \tilde{e}) = \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m!}, \quad (7)$$

where λ is rate parameter of the Poisson process.

The rate parameter, depending on application of the Poisson process, can be defined as a single occurrence of an event in case of a false measurement. The probability of events that m false measurements have occurred is given by the sum:

$$p_c(|Z_k^F| \leq m; \tilde{e}) = \sum_i P \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m_i!}. \quad (8)$$

To apply expression (8), it is necessary to estimate the number of potential false measurements $|Z_k^F|$ and the level of intensity of λ . All the considered parameters together determine the probabilistic information situation, which is characterized by expression (8).

When obstacles are detected, one of the options for analyzing objects, which are identified by sensors, is executed by discrete enumeration of the probabilities of the existence of an object. Three threshold levels can be introduced to characterize an object: the object confirmation threshold (τ_c), the object non-confirmation threshold (τ_{uc}), and the object deletion threshold (τ_d).

If the probability of the existence of an object reaches the confirmation threshold τ_c , it is counted among the confirmed ones and is included in the list of objects that the sensor accurately identifies and detects. If the probability of existence of an object falls below the non-confirmation threshold τ_{uc} , the object is not considered a valid object, but is still stored in the sensor's internal objects' list.

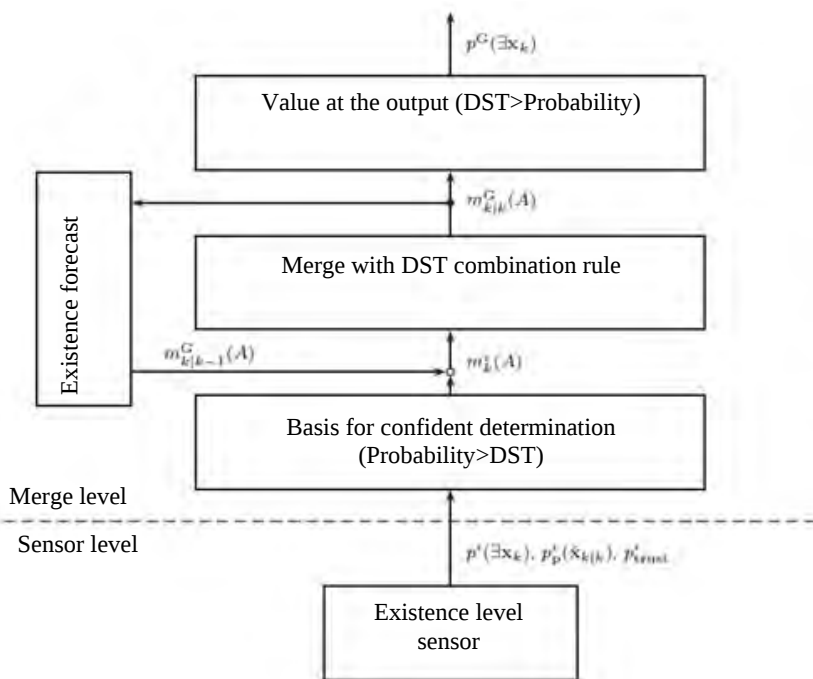
For practical purposes, the non-confirmation threshold should be chosen such that $\tau_{uc} < \tau_c$, that is, there is an effect of detecting objects ever checked over a long period of time if they have already reached τ_c sometime in their history. This is the ergodic factor.

If the probability of existence of an object drops even below, it reaches the deletion threshold τ_d , and will be completely deleted from the list of objects detected by the sensor. Pic. 2 shows the relationship between the various thresholds of existence. Threshold values should be selected in such a way that the detection rate (true positive and false positive values) at the threshold values guarantees a certain desired level in a driving situation for a given vehicle.

Due to this, it is possible to define several confirmation thresholds, especially for vehicles of different speed modes. Each threshold corresponds to a different detection rate. As a result, the probability of existence sets the parameter of «logical reliability» of object detection. This logical reliability can be used as a driver assistance factor, for example, in an intelligent safety system during emergency braking with a delay. This is a case of reacting only to objects that meet the highest threshold values. In comparison, «soft» braking systems [17] such as adaptive cruise control will react earlier when detecting objects that meet the lower confirmation threshold.

In a complex analysis of confluence (merging) of situations, it is necessary to combine the probability of the existence of an object from several sensors into a common list of objects using the strategy of integration of sensors' measurements with the general list.

The object model interface views the probability of existence as a single probability, usually derived from a Bayesian estimation algorithm or from IPDA/JIPDA algorithm [14; 15]. However, to take advantage of the different sensors and handle complex situations such as opacity (occlusion), a single value alone is not enough to model the probability of existence at the merge level. Therefore, the probability of existence is modelled using DST in the merge module, as described below, and then converted back to a single value of the probability of existence at the output of the merge module.



Pic. 3. Estimation of the probability of existence from multiple sensors using Dempster–Schafer theory of proof. The scheme was compiled by the authors based on generalization of the above algorithm.

The processing flow for merging the probabilities of existence is shown in Pic. 3.

Situational modelling using the Dempster–Schafer theory

Simulation and integration with DST theory is described in [18] for transforming measurements from sensor to sensor. In this case, the same probability analysis method is used. A detailed survey of Dempster–Schafer theory of proof (DS) and its many applications is given in [9].

The DS theory defines an object recognition system consisting of mutually exclusive hypotheses or states of the system. To model existence, the simplest set of mutually exclusive hypotheses is that an object exists, $\exists$, or does not exist, $\nexists$, such that:

$$\Theta = \{\exists, \nexists\}. \quad (9)$$

Then DST defines a set of values 2^Θ , which is the set of all subsets of Θ , including the empty set $\emptyset$. To simulate existence, as defined in (9), this leads to expression (10):

$$2^\Theta = \{\emptyset, \{\exists\}, \{\nexists\}, \{\exists, \nexists\}\}. \quad (10)$$

The set of values contains all combinations that allow assigning confidence values not only for mutually exclusive hypotheses, but also for their combinations. This can be used to

simulate ignorance or uncertainty in measurements from multiple sensors that can have different accuracy characteristics (optical cameras, radars, lidars). Uncertainty modelling is acceptable for inference for traditional Bayesian methods. The set of values for the existence of an object includes the subset $\{\exists, \nexists\}$, which includes confidence values with information about the existence of an object that is ambiguous. For each set of values, a BBA–Basic Belief Assignment is determined, often also called a mass function, where:

$$m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]. \quad (11)$$

The baseline value of BBA, or mass function, is the number of dimensions, such that each element of the 2 correct ones is considered believable. If BBA is used only for mutually exclusive hypotheses, then DST is equivalent to traditional Bayesian methods. The BBA assignment for a set of values should be adjusted so that:

$$\sum_{A: A \in \emptyset} m(A) = 1. \quad (12)$$

In addition, DST defines the function of belief (confidence):

$$Bel(A) = \sum_{B: B \in A} m(B), \quad (13)$$

which contains the baseline belief value (BBA) for all subsets of A , and that value can be



Pic. 4. Information situation of poor visibility requiring a probabilistic assessment.
[Electronic resource]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

interpreted as *the lower* bound for the probability of indications for A . The probability of *the upper* bound for indications within the set of values of A is defined as the likelihood:

$$Pl(A) = \sum_{B: B \cap A \neq \emptyset} m(B), \quad (14)$$

where $Pl(A)$ contains all the sets in (2) that support the measure of confidence in A . This difference between confidence and likelihood is the sum of uncertainty in the readings for A .

Practical usage

To detect obstacles in practice, it has become mandatory to use «technical» or «machine vision» to help the driver, especially in poor visibility conditions. The human eye is unable to detect certain objects when visibility is not good enough. So, in winter, when snow covers tracks and hides obstacles, it is important to determine exactly how to drive the train. Various algorithms and mathematical models come to the rescue to integrate the data that comes from the sensors. The data has to be filtered by the area of interest relative to the rail track, objects are associated, new objects are initialized, the state of existing objects is updated, and stochastic objects are controlled by modelling using DST, i.e. confirmed or removed from the knowledge base. Pic. 4 shows

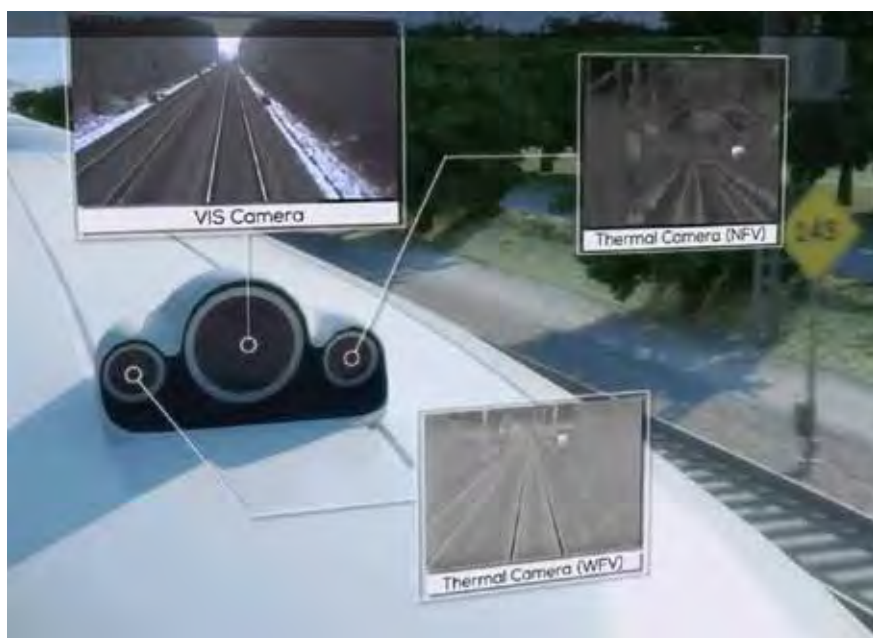
the information situation of poor visibility, which is between visible and «blind».

According to foreign data, the probabilistic obstacle detection system when a train moves on a railway line can operate at distances up to 2000 m at speeds up to 200 km/h, for example, RODS – Rail Obstacle Detection System¹. This obstacle detection system on the railway track detects the obstacle and transmits alarms to the train driver in real time.

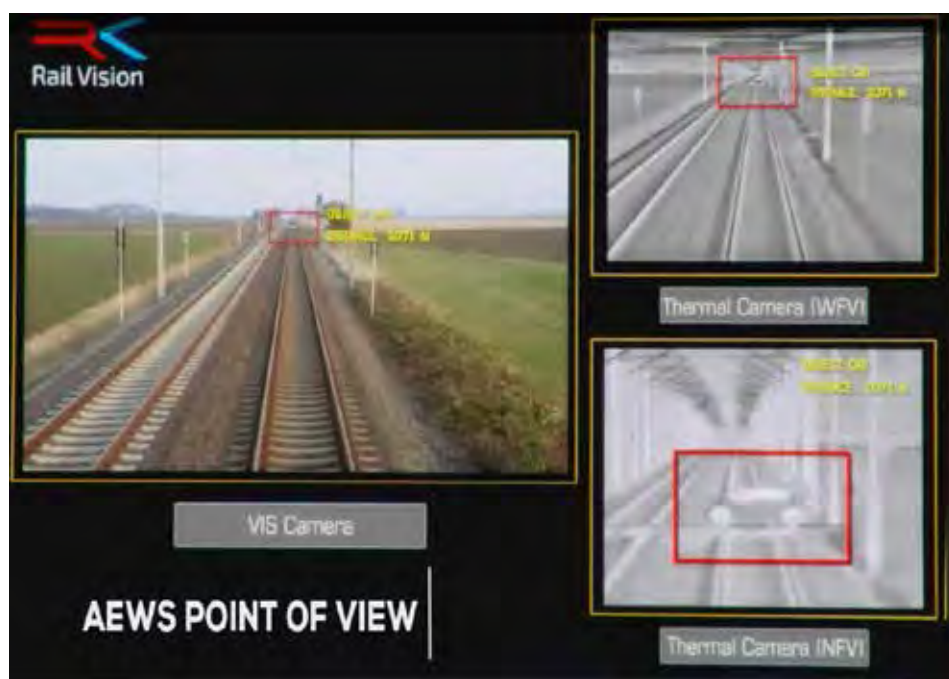
This autonomous system (Pic. 5) addresses more than 80 % of weather-related obstacle detection challenges by quadrupling the operator's visual range, thereby preventing costly and hazardous events, avoiding accidents and ensuring traffic safety.

RODS solution offers assistance to the driver or operator (in case of remote control) with full visual control using a freestanding roof-mounted visualization kit. For this, modern electro-optical sensors (in the visible and thermal ranges) are used (Pic. 6), with the possibility of merging these data. Pic. 6 shows object recognition based on probabilistic models. Such recognition is beyond the power of man. Recognition is based on probabilistic analysis and the use of a library of images.

¹ [Electronic resource]: <https://www.railvision.io/the-platform/main-line-vision/>. Last accessed 12.01.2020.



Pic. 5. Obstacle sensing driving support system. [Electronic resource]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.



Pic. 6. Obstacle detection system based on situational probabilistic analysis.
[Electronic resource]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

This technology allows the operator and driver to receive real-time emergency alerts for decision making while driving, reducing costs associated with possible injury or loss of life.

Conclusion. The proposed model of an information probabilistic situation and analysis

based on it can be used for control in automated and transport cyber-physical systems. In essence, this approach is application of element-by-element (operational) system analysis as applied to the field of probabilistic logic [19]. A feature of the approach described



in this work is replacement of the concept of «alternative» by the concept of «alternative information situations», which are then transformed into probabilistic information situations. An alternative information situation is a more structured model with a number of constraints that tie it to the transportation sector. An information transportation situation has a trinitarian essence: side objects, a controlled object, and a semantic environment of a controlled object. The semantic environment of a spatial object and its image is a qualitative feature of this method. It means using the parameter space from the image library to compare with spatial images captured by sensors. The introduction of probabilistic parameters into information situation parameters makes it possible to apply Dempster–Shafer theory and automatically becomes an advisory expert method applicable in transport cyber-physical systems.

REFERENCES

- Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Object and situational models in transport management [*Ob'ektnie i situatsionnye modeli pri upravlenii transportom*]. Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog, 2017, Iss. 2 (2), pp. 2–10. [Electronic resource]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/02_2017/06_2017.pdf. Last accessed 11.05.2020.
- Titov, E. K. Information situational management [*Informatsionnoe situatsionnoe upravlenie*]. Gosudarstvennyi sovetnik, 2019, Iss. 1 (25), pp. 51–56. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-situatsionnoe-upravlenie/pdf>. Last accessed 11.05.2020.
- Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Cybernetics and Physical Systems for Transport Management. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 2 (75), pp. 138–145. [Electronic resource]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/viewFile/1441/1717>. Last accessed 11.05.2020.
- Kovalenko, N. I. Knowledge extraction for intelligent transport systems [*Izвлечение znaniy dlya intellektualnykh transportnykh sistem*]. Perspektivy nauki i obrazovaniya, 2014, Iss. 5, pp. 45–52. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/izвлечение-znaniy-dlya-intellektualnykh-transportnykh-sistem/pdf>. Last accessed 11.05.2020.
- Tsvetkov, V. Ya. Information Situation and Information Position as a Management Tool. European researcher. Series A, 2012, Vol. 36, Iss. 12–1, pp. 2166–2170. [Electronic resource]: <http://docplayer.ru/25906936-Information-situation-and-information-position-as-a-management-tool-viktor-ya-tsvetkov.html>. Last accessed 11.05.2020.
- Pavlovsky, A. A., Okhotnikov, A. L. Information transport situation [*Informatsionnaya transportnaya situatsiya*]. Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog, 2018, Iss. 2 (6), pp. 16–24. [Electronic resource]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/02_2018/2_2018.pdf. Last accessed 11.05.2020.
- Pavlovsky, A. A. Formal interpretation [*Formalnaya interpretatsiya*]. Perspektivy nauki i obrazovaniya, 2017, Iss. 4 (28), pp. 18–22. [Electronic resource]: https://www.elibrary_29904637_56184823.pdf. Last accessed 11.05.2020.
- Tsvetkov, V. Ya. Integrated Control of High Speed Railway. *World of Transport and Transportation*, 2013, Vol. 11, Iss. 5 (49), pp. 6–9. [Electronic resource]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/441>. Last accessed 11.05.2020.
- Okhotnikov, A. L. Application of Dempster–Shafer theory for optimization of transportation [*Primenenie teorii Dempstera–Shafera dlya optimizatsii perevozok*]. Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog, 2018, Iss. 4 (8), pp. 61–74. [Electronic resource]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/01_2019/01_2019.pdf. Last accessed 11.05.2020.
- Musicki, D., Evans, R. Joint Integrated Probabilistic Data Association: JIPDA. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 3, pp. 1094–1099, July 2004. DOI: 10.1109/TAES.2004.133748.
- Mahlisch, M., Ritter, W., Dietmayer, K. De-cluttering with Integrated Probabilistic Data Association for Multisensor Multitarget ACC Vehicle Tracking. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey, June 2007, pp. 178–183. DOI: 10.1109/IVS.2007.4290111.
- Munz, M., Maehlisch, M., Dickmann, J., Dietmayer, K. Probabilistic Modeling of Sensor Properties in Generic Fusion Systems for Modern Driver Assistance Systems. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego (CA), USA, June 2010, pp. 760–765. DOI: 10.1109/IVS.2010.554804.
- Kudzh, S. A., Tsvetkov, V. Ya. Logic and algorithms: Monograph [*Logika i algoritmy: Monografiya*]. Moscow, MAKSPress, 2019, 112 p.
- Wenbo, He; Hoang, Nguyen; Xue, Liu; Nahrstedt, K.; Abdelzaher, T. iPDA: An integrity-protecting private data aggregation scheme for wireless sensor networks. MILCOM 2008–2008 IEEE Military Communications Conference. IEEE, 2008, pp. 1–7. [Electronic resource]: <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/11413/iPDA%20An%20Integrity-Protecting%20Private%20Data%20Aggregation%20Scheme%20for%20Wireless%20Sensor%20Networks.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Last accessed 11.05.2020.
- Musicki, D., Evans, R. Joint integrated probabilistic data association: JIPDA. IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, Vol. 40, Iss. 3, pp. 1093–1099. DOI: 10.1109/TAES.2004.133748.
- Ba-Ngu, Vo; Wing-Kin, Ma. The Gaussian mixture probability hypothesis density filter. IEEE Transactions on signal processing, 2006. Vol. 54, Iss. 11, pp. 4091–4104. DOI: 10.1109/TSP.2006.881190/
- Okhotnikov, A. L., Dzyuba, Yu. V. Soft situational control [*Myagkoe situatsionnoe upravlenie*]. In: Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZHT-2018). *Proceedings of the seventh scientific and technical conference*, 2018, pp. 62–64. [Electronic resource]: https://www.elibrary_36916645_17254769.pdf. Last accessed 11.05.2020.
- Aeberhard, M., Paul, S., Kaempchen, N., Bertram, T. Object Existence Probability Fusion using Dempster–Shafer Theory in a High-Level Sensor Data Fusion Architecture. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Baden-Baden, Germany, June 2011, pp. 770–775. DOI: 10.1109/IVS.2011.594043.
- Gospodinov, S. G. Probabilistic logical analysis [*Veroyatnostno logicheskiy analiz*]. ITNOU: Information technologies in science, education and management, 2019, Iss. 1, pp. 3–8. [Electronic resource]: http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/03_2019/03_2019.pdf. Last accessed 11.05.2020.



ПЕРВЫЙ СМАРТ-КОНТРАКТ ОАО «РЖД» НА СОПРОВОЖДЕНИЕ ГРУЗОВОЙ ПЕРЕВОЗКИ

ОАО «РЖД» реализует на Октябрьской железной дороге пилотный проект по внедрению смарт-контракта, который обеспечивает договорное сопровождение транспортно-логистической деятельности в рамках норм цифрового права. Такой контракт считается автоматически исполненным, когда выполнены все его условия: груз перевезён, деньги перечислены, а участники не имеют друг к другу претензий.

До конца 2020 года компания планирует осуществить первую грузовую перевозку с полноценным применением этой технологии.

С начала эксперимента была проведена большая работа по исследованию операционного функционала смарт-контракта, результаты которой позволят в этом году не только использовать его операции при сопровождении грузов, но и заключить первый договор перевозки, факт исполнения обязательств по которому определяется с помощью алгоритма «смарт-контракт» на базе технологии «блокчейн».

На первом этапе проекта, который начался в 2018 году, для составления схемы действий и получения первичных данных проведена интеграция с корпоративными автоматизированными системами ОАО «РЖД».

В рамках эксперимента по внедрению технологии в 2019 году было освоено более 40 технологических операций, совершаемых в ходе перевозки, в том числе

реализовано одинаковое отображение информации о процессе доставки у всех участников смарт-контракта.

11 июля 2019 года была осуществлена тестовая перевозка с использованием освоенных операций смарт-контракта между станциями Предпортовая и Новый Порт. Кроме того, в прошлом году таким образом было организовано сопровождение контейнерных поездов по направлениям Предпортовая—Автovo, Нигозерo—Новый Порт, Нигозерo—Автovo и Питкяранта—Новый Порт.

В этом году технология смарт-контракта расширит свой функционал, а количество терминалов, принимающих участие в проекте, увеличится. Будет доступна возможность договорного сопровождения перевозки, до 63 вырастет число технологических операций, которые могут отображаться по ходу перевозки на платформе распределённого реестра данных (блокчейн). Среди них те, которые предполагают возникновение финансовой ответственности между сторонами либо определяют объём обязательств. Это позволит при использовании технологии смарт-контракта осуществлять взаиморасчёты.

По сообщению пресс-центра ОАО «РЖД»:
<https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=251785> ●

RUSSIAN RAILWAYS IMPLEMENTS FIRST SMART FREIGHT TRANSPORT CONTRACT

JSC Russian Railways is implementing a pilot project at Oktyabrskaya Railway to introduce smart contracts which will provide contractual support for transportation and logistics activities within the framework of digital law. Such contracts are to be automatically executed after all their conditions are fulfilled, that is when the cargo has been shipped, the money transferred, and the participants have no claims against each other.

The Company plans to carry out the first cargo shipment with the full application of this technology by the end of 2020.

Since the beginning of the pilot project, a lot of work has been done to assess and improve the operational functionality of smart contracts. The results mean that this year will not only see smart contract operations when supporting cargo shipments, but also the first transportation contract will be executed, the performance of obligations under which is stipulated by a «smart contract» algorithm based on blockchain technology.

In the first phase of the project, which began in 2018, the smart contract technology was integrated into the automated corporate systems to form a scheme of actions and obtain primary data.

In 2019, as part of the project to introduce smart contracts, more than 40 technological operations carried

out during transportation were mastered, including the identical display of information about the delivery process which was made available to all of the participants involved in each smart contract.

On 11 July 2019, a test shipment between Predportovaya and Novyi Port stations was carried out using the operations mastered as part of the smart contract. In addition, accompanying container trains were organized in this way last year on the routes between Predportovaya—Avtovo, Nigozero—Novyi Port, Nigozero—Avtovo and Pitkyaranta—Novyi Port.

This year, smart contract technology will get enhanced functionality and an increase in the number of terminals involved in the project. It will be possible to arrange contractual support for shipments and the number of technological transactions that can be displayed during transportation on the platform of the distributed data registry via blockchain will increase to 63. Among these technological transactions are those that suggest distribution financial responsibility between the parties or that determine the scope of obligations. This will allow settlements using smart contract technology.

Compiled based on the news of RZD press centre:
<https://eng.rzd.ru/en/9517/page/104070?id=4232>. ●



Определение затрат времени пассажиров на поездки в городах



Спирин Иосиф Васильевич – ОАО «НИИАТ», Москва, Россия.*

Иосиф СПИРИН

Цель статьи – получение зависимостей, связывающих затраты времени пассажиров на поездки транспортом общего пользования с основными факторами, формирующими элементы этих затрат. При написании статьи использованы методы аналитического моделирования, математической и транспортной статистики, обзорно-аналитического и логического анализа, методологии транспортных исследований.

Рассмотрены математические модели определения затрат времени пассажиров на совершение поездок в городах с использованием транспорта общего пользования. Обращено внимание на формирование каждого из элементов затрат времени на поездку и взаимосвязи этих элементов друг с другом.

Таковыми элементами являются: время пешего подхода к остановочному пункту отправления и пешего отхода от остановочного пункта прибытия до цели поездки; время ожидания посадки в транспортное средство; время следования в транспортном средстве по маршруту. Установлены зависимости указанных элементов от факторов, формирующих затраты времени. Исследовано увеличение затрат времени на ожидание посадки в транспортное средство в зависимости от сокращения планового числа транспортных средств на маршруте из-за сходов с линии. Приведённые модели могут использоваться при транспортном планировании и оценке качества перевозок городским транспортом по показателю затрат времени пассажирами на поездки.

Ключевые слова: городской пассажирский транспорт, поездка пассажира, время пешеходных передвижений, время ожидания, время следования по маршруту, качество перевозок.

*Информация об авторе:

Спирин Иосиф Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ОАО «НИИАТ», Москва, Россия, ivspirin@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 15.04.2020, принята к публикации 26.06.2020.

For the English text of the article please see p. 36.

ВВЕДЕНИЕ

Городской пассажирский транспорт (ГПТ) общего пользования выполняет основную часть перевозок пассажиров в населённых пунктах городского типа. Доля городского населения в России достигла 74 % от общего числа граждан страны. В городах производится наибольшая часть ВВП. Автомобилизация населения не может обеспечить подвижность основной части городского населения по экономическим, экологическим, градостроительным ограничениям. Поэтому перевозки пассажиров ГПТ в настоящее время и на обозримую перспективу сохраняют свою ведущую роль в обеспечении «местной» подвижности населения городов. Транспорт общего пользования должен предоставлять пассажирам такое качество обслуживания, которое будет стимулировать граждан к использованию взамен автомобилей альтернативного способа передвижения на транспортных средствах ГПТ. Это будет способствовать смягчению ряда экономических, градостроительных и экологических проблем.

Затраты времени пассажиров на поездки относятся к наиболее значимым результатам деятельности транспорта общего пользования. Поэтому *целью* настоящей статьи является установление количественной взаимосвязи затрат времени пассажирами на поездки и отдельных элементов этих затрат с основными факторами, формирующими продолжительность поездки.

Материалы статьи подготовлены с использованием обзорно-аналитического (публикации отечественных и зарубежных учёных) и логического анализа, методов аналитического моделирования, математической и транспортной статистики, методологии транспортных исследований.

Выполненные в различное время исследования показывают, что наиболее значимым показателем качества транспортного обслуживания в городах для пассажиров является время, затрачиваемое на ежедневные поездки [1–4]. Только для инвалидов и пенсионеров (их около 20 % пассажиров) более значимым является возможность занять место для проезда сидя. Но и эти граждане считают, что затраты времени на поездки относятся к основным показателям качества перевозок [5, с. 156].

По результатам исследований зарубежных учёных затраты времени на поездку в город-

ском транспорте общего пользования также являются ведущим показателем качества транспортного обслуживания [6–8].

Таким образом, совершенствование методологии определения затрат времени пассажирами на поездки является актуальной задачей прикладной транспортной науки и практики. Достоверные оценки затрат времени на поездки служат основой для обоснования планов развития ГПТ и определения приоритетных направлений финансирования соответствующих технологических решений при организации перевозок пассажиров в городах и совершенствования транспортной инфраструктуры.

Для пассажира первостепенный интерес представляет возможность за наименее возможное время выполнить сетевую поездку¹, то есть, поездку от места его нахождения до цели поездки. Сетевая поездка может в простейшем случае сводиться к поездке по одному маршруту. С ростом города увеличивается его площадь и число транспортных микрорайонов на этой площади, что приводит к ускоренному увеличению транспортных связей этих микрорайонов. Обеспечить все эти связи беспересадочным сообщением физически становится невозможным. Поэтому, во многих случаях, сетевая поездка выполняется с пересадками — пассажир последовательно пользуется несколькими маршрутами, выполняя на каждом из них маршрутную поездку.

ОБЩИЕ ЗАТРАТЫ ВРЕМЕНИ НА ПОЕЗДКУ

Элементами общих затрат времени на поездки являются:

- время, затрачиваемое на пешеходные передвижения к остановочному пункту посадки пассажира $T_{\text{пх1}}$ и от остановочного пункта прибытия до цели поездки $T_{\text{пх2}}$. В среднем $T_{\text{пх1}} = T_{\text{пх2}}$, поскольку число поездок «туда» и «обратно» в целом за день практически равно друг другу. Поэтому можно полагать, что сумма затрат времени на пешеходные передвижения равна $2 \cdot T_{\text{пх}}$. При необходимости время на пешеходные передвижения перед посадкой и после высадки всегда возможно учитывать в расчётах отдельно;
- время, затрачиваемое на ожидание посадки в транспортное средство $T_{\text{ож}}$, мин;

¹ Понятие «сетевая поездка» подчёркивает, что передвижение осуществляется по транспортной сети.





Рис. 1. Взаимосвязи элементов затрат времени на поездку и показателей качества транспортного обслуживания.

• время, затрачиваемое на следование в транспортном средстве по маршруту между остановочными пунктами посадки и высадки $T_{сл}$, мин.

Общие затраты времени пассажира на маршрутную поездку [1; 4]:

$$T_{марш} = 2 \cdot T_{пх} + T_{ож} + T_{сл} \quad (1)$$

Общие затраты времени пассажира на сетевую поездку [1; 4]:

$$T_{сет} = 2 \cdot T_{пх} + (T_{ож} + T_{сл}) \cdot K_{п}, \quad (2)$$

где $K_{п}$ – коэффициент пересадочности (среднее число посадок пассажира в транспортные средства различных маршрутов при сетевой поездке).

При пересадках в пути следования также имеются затраты времени на совершение пересадок между маршрутами $T_{пер}$. В большинстве случаев пересадка на транспортное средство другого маршрута производится на том же остановочном пункте, до которого пассажир следовал при предшествовавшей маршрутной поездке. В противном случае следует учесть $T_{пер}$, которое можно установить по масштабному плану соответствующей городской территории с учётом средней скорости пешего хождения 4 км/ч. В связи с ограниченным объёмом статьи мы остановимся на рассмотрении только пересадок, осуществляемых на одном остановочном пункте.

При различных вариантах организации движения транспорта общего пользования в городе следует учитывать, что на формирование элементов затрат времени на поездки оказывают влияние наполняемость салонов транспортных средств пассажирами (при переполнении салонов увеличивается $T_{ож}$ и $T_{сл}$), беспересадочность сообщений (влияет на $K_{п}$), регулярность движения на маршрутах (при внеплановом увеличении интервалов движения транспортных средств увеличивается $T_{сл}$ и $T_{ож}$). Информированность пассажиров о транспортной сети и расписаниях движения влияет на $K_{п}$. При сопоставлении

вариантов организации движения следует учитывать взаимное влияние друг на друга различных элементов затрат времени (рис. 1). Эти взаимосвязи детализированы в последующих зависимостях. При транспортном планировании учёт указанных связей сможет быть обеспечен итеративным процессом, реализуемым на компьютерной модели.

Пассажиры психологически по-разному оценивают затраты времени на отдельные элементы поездки в соответствии с их полезностью. Восприятие пассажирами затрат своего времени не всегда совпадает с его физическим течением. По данным американских учёных, 30-минутное передвижение сидящими в автобусе пассажирами было воспринято эквивалентным 18 минутам. Пассажиры, проезжавшие стоя, оценили длительность 30-минутной поездки в 53 минуты. При этом эксперименте пассажиры не пользовались часами, давали оценки времени «на глазок» [9].

Проведённые автором исследования на репрезентативной выборке пассажиров позволили сделать вывод о том, что относительная (психологическая) оценка пассажирами затрат времени на поездку дифференцируется по её элементам и может быть представлена коэффициентом полезности – отношением кажущейся продолжительности элемента поездки к реальной его продолжительности. Течение времени при следовании в автобусе воспринимается респондентами практически равным «физическому» времени, поэтому коэффициент полезности для элемента $T_{сл}$ был принят за базу для сравнения (равным единице). Статистическая обработка результатов эксперимента показала, что усреднённое значение коэффициента полезности для элемента $T_{пх}$ равно 1,21, а для $T_{ож}$ – 1,82. Психологические оценки пассажирами затрат времени на поездки формируются под воздействием того, что в своём сознании пассажир отводит определённое время имен-

но для поездки, что органически связано с ощущением перемещения в пространстве. При ожидании посадки перемещение не осуществляется. Поэтому биологические часы пассажира спешат вследствие рассогласования целевого и фактического состояния происходящего процесса. При пешеходном перемещении такое рассогласование ощущается в меньшей степени, поскольку перемещение в пространстве осуществляется, но с гораздо меньшей скоростью, чем при выполнении собственно поездки.

Психологическая оценка затрат времени пассажирами на поездку в целом формирует их транспортную усталость. Отсюда следует, что оценке влияния затрат времени на поездки на качество транспортного обслуживания и транспортное планирование необходимо принимать во внимание не астрономически определённые затраты времени, а их психологическое восприятие пассажирами (кажущиеся им затраты времени $T_{\text{каж}}$) с учётом поправки на коэффициенты полезности соответствующих элементов:

$$T_{\text{каж}} = 2(1,21 \cdot T_{\text{пх}}) + 1,82 \cdot T_{\text{ож}} + T_{\text{сл}}. \quad (3)$$

Согласно результатам наших исследований, транспортная усталость пассажиров пропорциональна кажущимся затратам времени на поездку.

Рассмотрим далее модели формирования затрат времени для различных элементов поездки пассажира.

ВРЕМЯ НА ПЕШЕХОДНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ Пассажира

Средняя скорость пешеходного перемещения в городах $V_{\text{пеш}} = 4$ км/ч (для городов населённостью 1 млн жителей и более — $V_{\text{пеш}} = 5$ км/ч) [10]. Поэтому затраты времени $T_{\text{пх}}$ определяются удалённостью мест начала и окончания пешеходных передвижений пассажира от соответствующих остановочных пунктов. С учётом планировки улиц и внутриквартальных проходов путь пассажира будет отклоняться от прямой линии, однако независимо от реальной конфигурации трассы пешеходного подхода расстояние, преодолеваемое пассажиром пешком, геометрически можно разложить на две составляющие:

- перемещение из глубины квартала к улице, по которой проходит маршрут (l_x);
- перемещение вдоль улицы к ближайшему остановочному пункту маршрута (l_y).

В среднем $l_x = 1/(3\delta)$, где δ — плотность транспортной сети, км^{-1} . После выхода на транспортную магистраль пассажир следует к ближайшему остановочному пункту. Среднее перемещение вдоль улицы $l_y = l_{\text{п}}/4$, где $l_{\text{п}}$ — средняя длина перегона маршрута, км. Отсюда затраты времени на пешеходное передвижение $T_{\text{пх}}$ (в один конец) составляют (60 — коэффициент для перевода часов в минуты):

$$T_{\text{пх}} = \frac{60}{V_{\text{пеш}}} \left(\frac{1}{3\delta} + \frac{l_{\text{п}}}{4} \right) \approx 15 \left(\frac{1}{3\delta} + \frac{l_{\text{п}}}{4} \right) \text{ мин.} \quad (4)$$

Частота расположения остановочных пунктов относится к числу показателей, требующих рационализации. При высокой частоте расположения остановочных пунктов сокращаются затраты времени на пешеходные передвижения вдоль маршрута. Но при этом уменьшается скорость сообщения, что требует увеличения числа транспортных средств или пропорционального повышения их пассажироместимости для обеспечения расчётной провозной способности маршрута. Во внутригородском сообщении до 60 % расхода энергии на тягу связано с разгонами и торможениями подвижного состава, обусловленными частыми остановочными пунктами [11].

С увеличением средней длины перегона при прочих равных условиях сокращаются затраты времени на ожидание посадки. Это происходит вследствие уменьшения времени оборотного рейса на маршруте. При нерегулярном движении транспортных средств за время больших интервалов между соседними выходами на остановочных пунктах накапливается число пассажиров, превышающее расчётную величину. В результате увеличивается время на совершение пассажирообмена, что приводит к снижению скорости сообщения и увеличению затрат времени пассажира на следование по маршруту.

Исходя «из баланса интересов», рациональная длина перегона в среднем должна быть примерно 500 м.

В настоящее время средняя длина перегона меньше этого значения. Поэтому актуальна нормализация средней длины перегона — доведение этого показателя до норматива. Чтобы не ухудшить качество обслуживания пассажиров, следует определить, как изменится расстояние пешеходного передвижения пассажира при нормализации длины



перегона. Так, если средняя длина перегона равна 330 м, пассажир в среднем проходит вдоль трассы маршрута $330 \text{ м} / 4 = 83 \text{ м}$. Деление на 4 обусловлено тем, что пассажир, вышедший из глубины квартала к улице, по которой проходит маршрут ГПТ, в среднем попадает либо в правую, либо в левую половину соответствующего перегона. Далее пассажир пойдёт в сторону ближайшего к нему остановочного пункта. Протяжённость пути такого перемещения в среднем составит половину от половины длины перегона, т.е. одну четвёртую часть длины перегона

При увеличении средней длины перегона до нормативного значения пассажир станет проходить $500 \text{ м} / 4 = 125 \text{ м}$. Увеличение среднего расстояния пешеходного передвижения составит 42 м, что повысит затраты времени пассажира дополнительно на $42 \text{ м} \cdot 60 / 4000 \text{ м} = 0,63 \text{ мин} \approx 36 \text{ с}$! Поэтому нормализация длины перегонов практически не повлияет на уровень качества обслуживания пассажиров.

Вместе с тем, общее число остановочных пунктов на маршруте уменьшится примерно на $[100 - (330 \text{ м} \cdot 100 / 500 \text{ м})] = 34 \%$. Задержки на остановочных пунктах в структуре времени рейса около 40...60 %. Отсюда общая продолжительность нахождения автобуса в рейсе (без учёта стоянок на конечных пунктах маршрута) в связи с нормализацией (уменьшением) числа остановочных пунктов сократится примерно на $[(0,4...0,6) \cdot 0,34 \cdot 100] = 13,6...20,5 \%$. Соответственно, повысится скорость сообщения, что обеспечит пропорциональное уменьшение времени $T_{\text{сл}}$. Снижение затрат времени на следование по маршруту намного перекроет увеличение затрат времени на пешеходные передвижения, что в итоге повысит качество транспортного обслуживания пассажиров.

Сократить затраты времени пассажиров на пешеходные перемещения возможно также за счёт повышения плотности транспортной сети, что ограничено плотностью дорожной сети в населённых пунктах и наличием в старой части городской застройки улиц с достаточной шириной проезжей части.

ВРЕМЯ НА ОЖИДАНИЕ ПОСАДКИ В ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО

Затраты времени на ожидание посадки $T_{\text{ож}}$ являются наиболее значимым резервом со-

кращения общих затрат времени на поездки и определяются тремя факторами:

- интервалом движения транспортных средств на маршруте;
- точностью соблюдения расписания движения;
- пассажировместимостью используемых транспортных средств.

Влияние первых двух факторов на $T_{\text{ож}}$ показывает формула [1; 4; 11; 12, с. 286]:

$$T_{\text{ож}} = \frac{I}{2} + \frac{\sigma_I^2}{2I} = 0,5 \left(I + \frac{\sigma_I^2}{I} \right) = 0,5 I_{\text{эф}}, \quad (5)$$

где I — плановый интервал движения транспортных средств на маршруте, мин;

σ_I — среднеквадратичное отклонение от планового интервала движения (характеризует нерегулярность движения), мин;

$I_{\text{эф}}$ — эффективный (кажущийся) интервал движения на маршруте [4; 11], мин.

С учётом возможных отказов в посадке из-за отсутствия свободных мест формула приобретает вид:

$$T_{\text{ож}} = \frac{I}{2} + \frac{\sigma_I^2}{2I} + P_{\text{отк}} \cdot I_{\text{эф}} = 0,5 I_{\text{эф}} + P_{\text{отк}} \cdot I_{\text{эф}} = (0,5 + P_{\text{отк}}) \cdot I_{\text{эф}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{отк}}$ — вероятность отказа пассажиру в посадке из-за ограниченной пассажировместимости транспортного средства [11].

Эффективный интервал движения $I_{\text{эф}} = I + \sigma_I^2 / I$ учитывает увеличение планового интервала с точки зрения находящегося на остановочном пункте пассажира с учётом неравномерности движения транспортных средств.

Среднеквадратичное отклонение от планового интервала движения:

$$\sigma_I = + \sqrt{\sum_{i=1}^n (I - I_{\text{факт}i})^2 / n}, \quad (7)$$

где n — общее число наблюдений за интервалом движения в рассматриваемом месте маршрута;

$I_{\text{факт}i}$ — фактический интервал движения в i -м наблюдении, мин.

При эксплуатации автоматизированных систем управления движением и систем спутниковой навигации статистика по регулярности движения накапливается автоматически, и могут использоваться результаты мониторинга.

В большинстве исследований распределение отклонений фактического момента прибытия транспортного средства на остановочный пункт маршрута от планового момен-

та по расписанию движения полагается подчинённым нормальному закону вероятностей. Но очевидно, что прибытия на остановочный пункт со значительными опережениями расписания движения менее вероятны, чем опоздания на такое же время. В связи с этим применение симметричного статистического распределения для характеристики нерегулярности движения представляется не вполне корректным во всех случаях. Выполненные нами исследования позволили установить, что более точные результаты обеспечивает функция Грамма–Шарлье [13]:

$$P(\tau) = f(\tau) - \frac{r_3}{6} f^{(3)}(\tau) + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(4)}(\tau), \quad (8)$$

где $P(\tau)$ – вероятность появления отклонения τ ;

$f(\tau)$ – функция нормального распределения вероятностей τ ;

r_3 и r_4 – третий и четвёртый основные моменты совокупности статистических данных об отклонениях;

$f^{(3)}(\tau)$ и $f^{(4)}(\tau)$ – третья и четвёртая производные функции $f(\tau)$.

Второе и третье слагаемые в (7) отражают соответственно косость и крутость кривой распределения τ .

При интервалах движения, превышающих 20 мин, возникает привыкание постоянных пассажиров к ритму движения транспортных средств через остановочный пункт. В таком случае фактическое время ожидания посадки будет заметно отличаться от рассчитанного по приведённым зависимостям, поскольку не соблюдается равномерность распределения времени подхода пассажиров к остановочным пунктам в пределах каждого интервала движения. Поэтому при значительных интервалах движения поток пассажиров $P(t)$ описывается зависимостью:

$$P(t) = \frac{e^{M(t)}}{\int_0^t e^{M(t)} dt}, \quad (9)$$

где $M(t)$ – функция полезности для пассажира в зависимости от времени t его фактического подхода на остановочный пункт ($0 \leq t \leq I$).

Мониторинг регулярности движения подвижного состава на маршрутах обеспечивает применение спутниковых систем навигации. Наиболее серьёзные нарушения расписания движения и, вместе с тем, ухудшение качества обслуживания пассажиров проис-

ходят при срыве рейсов, обусловленном некомплексом числа единиц подвижного состава, находящихся в работе фактически.

При отсутствии части подвижного состава на маршруте средние затраты времени $T_{\text{ож}}$ значительно увеличиваются:

$$T_{\text{ож}} = \frac{I_{\text{эф}}}{2} \cdot K_{AU}, \quad (10)$$

где K_{AU} – коэффициент увеличения затрат времени;

A и U – число транспортных средств, соответственно, плановое и выбывшее из движения на маршруте, ед.

Отсутствующие на маршруте единицы подвижного состава могут по-разному располагаться в последовательности выходов, предусмотренных расписанием движения². Например, если на маршруте отсутствуют три единицы подвижного состава, то возможны три случайно формируемые ситуации: все отсутствующие транспортные средства (вакансии) расположены в последовательности выходов подряд; две вакансии расположены подряд, а третья – в другом месте; все вакансии расположены в различных местах. Вероятности появления этих ситуаций зависят от общего числа выходов, предусмотренных расписанием движения. Наиболее серьёзные отклонения возникают при концентрации вакансий в одном месте.

Выполненный анализ с учётом вероятности возникновения различных ситуаций показал, что при вакансиях, расположенных в различных местах последовательности выходов, $K_{AU} = \frac{A + 2 \cdot U}{A}$, если же все вакансии сконцентрированы в одном месте, то $K_{AU} = \frac{A + U^2 + U}{A}$.

Поскольку комбинация размещения вакансий заранее неизвестна, следует говорить о математическом ожидании этого коэффициента $M\{K_{AU}\}$:

$$\frac{A + 2 \cdot U}{A} < M\{K_{AU}\} < \frac{A + U^2 + U}{A}. \quad (11)$$

Попытка аналитического определения зависимости $K_{AU} = f(A, U)$ натолкнулась на значительные математические трудности –

² Выход – условная единица подвижного состава, для которой расписанием движения на маршруте предусмотрена работа на линии в данный день. В различные периоды работы выход может обеспечиваться различными транспортными средствами и водителями.



сложные комбинаторные соотношения учёта различных вариантов вакансий и вероятностей их появления при различном числе транспортных средств, «заложённых» в расписание движения. Поэтому решение задачи было получено путём прямого перебора на компьютере вариантов сочетания вакансий и других исходных данных. Расчёты проводились для вариантов, когда число автобусов менялось от $A = 2$ до $A = 50$ ед., при числе вакансий от $U = 1$ до $U = (A - 1)$. Точность расчётов $\pm 1,0^{-10}$. Такая точность с очень большим избытком обеспечивает допустимую погрешность, исходя из технологически обусловленных значений исходных данных и искомых результатов. Практически это позволяет говорить об абсолютной точности расчётов. В результате была получена матрица численных значений коэффициента K_{AU} при различных сочетаниях A и U .

Анализ матрицы позволил предложить формулу, по точности полностью идентичную указанной точности результата моделирования. Это позволяет сделать предположение, что нижеследующая формула является точной (во всяком случае, её точность более чем в миллион раз превосходит реально наблюдаемые на ГПТ погрешности данных) аналитической моделью рассматриваемого показателя:

$$K_{AU} = \begin{cases} \frac{A + (U - 1)}{A - (U - 1)} & \text{при } 0 < U < A, \\ 1 & \text{при } U = 0, \\ \infty & \text{при } U = A. \end{cases} \quad (12)$$

Формула (12) актуальна в случаях, когда диспетчер не изменяет расписания движения на маршруте (не производит раздвижку интервалов при сходе части подвижного состава). Если же расписание движения оперативно пересматривается и интервалы движения равномерно увеличиваются, следует использовать обычную зависимость, и расчёты следует производить при новом плановом, увеличенном интервале движения на маршруте.

Отказы в посадке возникают, когда свободное число мест в транспортном средстве меньше числа пассажиров, желающих совершить посадку. При организации перевозок и анализе их качества обеспечивается обслуживание пассажиров в условиях наполнения салона в соответствии с допустимым нормативом (не более 5 пасс./м³) [14].

Под вероятностью отказа пассажиру в посадке $P_{\text{отк}}$ понимается относительное число (доля) пассажиров, не севших в транспортное средство из-за его переполнения пассажирами физически, плюс сверхнормативное число пассажиров, которые, хотя и сумели войти в салон, но были перевезены в недопустимо стеснённых условиях.

Адекватная аналитическая модель для определения вероятности отказа пассажиру в посадке разработана и обоснована автором в [4; 11]:

$$P_{\text{отк}} = 1 / \sqrt{2\pi} \int_x^{\infty} \exp(-y^2 / 2) dy,$$

при $x = (q + 0,5 - I \cdot \lambda) / \sqrt{I \cdot \lambda}$ и $\infty \leq y \leq x$, (13)

где q — номинальная предельная пассажироместимость единицы подвижного состава, пасс.;

λ — средняя интенсивность пассажиропотока на соответствующем перегоне маршрута, пасс./мин.

Ошибка вычислений по представленной модели по результатам натурных экспериментов — не более 5 %. С учётом того, что дополнительные затраты времени пассажиров в связи с отказами в посадке составляют обычно не более 15...20 % общих затрат времени на ожидание посадки, такую точность следует признать удовлетворительной (обеспечивается общая погрешность $T_{\text{ож}}$ не более 1 %).

На практике часто необходимо провести экспресс-анализ затрат времени пассажиров, затраченного на ожидание посадки. Для этого рекомендуется при отсутствии конкретных исходных данных для расчётов по приведённым выше зависимостям принимать $T_{\text{ож}} = (0,7...0,75) I$. Заметим в этой связи, что в большинстве практических приложений используется существенно заниженная оценка затрат времени на ожидание посадки — $T_{\text{ож}} = 0,5I$.

ВРЕМЯ СЛЕДОВАНИЯ В ТРАНСПОРТНОМ СРЕДСТВЕ ПО МАРШРУТУ

Затраты времени на следование в подвижном составе, мин [1; 4]:

$$T_{\text{сл}} = (l_{\text{ср}} / v_{\text{с}}) \cdot 60, \quad (14)$$

где $l_{\text{ср}}$ — средняя дальность поездки пассажира на маршруте, км;

$v_{\text{с}}$ — скорость сообщения на маршруте, км/ч.

Среднюю дальность поездки при отсутствии конкретных данных определяют по приближённой формуле, предложенной в [1] канд. техн. наук А. Х. Зильберталем:

$$l_{cp} = 1,3 + n_{пл} \sqrt{F} \approx 1,3 + 0,3 \sqrt{F}, \quad (15)$$

где $n_{пл}$ — эмпирический коэффициент планировочной структуры городской территории;

F — селитебная площадь города, км².

Адекватная модель распределения поездок пассажиров по дальности (l_n , км) получается при использовании закона Эрланга [13]: $f(l_n) = ((k/l_n)^k \cdot l_n^{k-1} \cdot e^{-kl_n} / l_n) / (k-1)!$, (16)

где $f(l_n)$ — функция плотности распределения поездок по дальности;

k — порядок распределения Эрланга.

По экспериментальным данным, порядок k распределения Эрланга для рассматриваемого случая соответствует квадрату отношения дальности передвижения l_n к её среднеквадратичному отклонению:

$$k \approx ((5l_n / l_{max}) - 1)^2, \quad (17)$$

где l_{max} — протяжённость самого длинного маршрута в населённом пункте, км.

Полученное значение k округляют до целого числа. При отсутствии данных для расчёта принимают $k = 3$.

При сокращении пересадочности вследствие совершенствования маршрутной системы может несколько увеличиться средняя дальность маршрутной поездки, но сетевая поездка в среднем всегда становится короче.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные аналитические модели для определения численных значений затрат времени пассажиров на совершение поездок с использованием городского транспорта общего пользования опираются на использование исходных данных, извлекаемых из имеющейся отчётности. Практическое использование этих моделей возможно в следующих ситуациях:

- разработка и совершенствование транспортных планов в соответствии с программами и стратегиями развития городских пассажирских перевозок транспортом общего пользования;
- оценка и анализ качества обслуживания пассажиров на маршрутах транспорта общего пользования (общие затраты времени на совершение поездок и отдельные элементы этих затрат времени);

• обеспечение расчётов экстерналий результатов при реализации в городах мероприятий по устойчивому развитию городской среды и транспортной инфраструктуры [15];

• организация перевозок пассажиров на действующей маршрутной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зильберталь А. Х. Трамвайное хозяйство: Руководство для работников трамвая и учащихся. — Ч. 1. — М.-Л.: ОГИЗ — Гострансиздат, 1932. — 304 с.
2. Самойлов Д. С. Городской транспорт: Учебник. — М.: Стройиздат, 1983. — 384 с.
3. Асалиев А. М., Завьялова Н. Б., Сагинова О. В. [и др.]. Маркетинговый подход к управлению качеством транспортного обслуживания: Монография. — Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2016. — 172 с.
4. Спирин И. В. Перевозки пассажиров городским транспортом: Справочное пособие. — Изд. 2-е. — М.: Академкнига, 2006. — 413 с.
5. Спирин И. В. Научные основы комплексной реструктуризации городского автобусного транспорта // Дис... на соиск. уч. ст. док. техн. наук. — М.: МАДИ, 2007. — 421 с.
6. Papagostas, C. S. Fundamentals of Transportation Engineering. A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs, New Jersey, 1987, 458 p.
7. Eboli, L., Mazzulla, G. A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. Transport Policy, 2011, Vol. 18, Iss. 1, pp. 172–181. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967070X10000958>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.07.007>.
8. Dell'Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P. The quality of service desired by public transport users. Transport Policy, 2011, Vol. 18, Iss. 1, pp. 217–227. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X10001009>. Доступ 15.05.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.08.005>.
9. Horowitz, A. J. Subjective Value of Time in Bus Transit Travel. Transportation, 1981, Vol. 10, No. 2, pp. 149–164. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00165263>.
10. СП 42.13330.2011. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89 (с поправкой). Введен в действие с 20.05.2011. — М.: Минрегион России, 2011. — 109 с.
11. Антошвили М. Е., Либерман С. Ю., Спирин И. В. Оптимизация городских автобусных перевозок. — М.: Транспорт, 1985. — 102 с.
12. Вагнер Г. Основы исследования операций / Пер. с англ. в 3 томах. — Т. 3. — М.: Мир, 1973. — 503 с.
13. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. — М.: Наука, 1971. — 576 с.
14. Социальный стандарт транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским электрическим транспортом. Утв. распоряжением Минтранса РФ от 31 января 2017 г. № НА-19-р.
15. Гришаева Ю. М., Матанцева О. Ю., Спирин И. В., Савосина М. И., Ткачева З. Н., Васин Д. В. Устойчивое развитие транспорта в городах России: опыт и актуальные задачи // Юг России: экология, развитие. — 2018. — Т. 13. — № 4. — С. 24–46. ●





Estimation of Travel Time Spending by Urban Transport Passengers



Spirin, Iosif V., JSC NIIAT, Moscow, Russia.*

Iosif V. SPIRIN

ABSTRACT

The objective of the article is to obtain dependencies linking time spent by passengers on travel by public transport with the main factors that form the elements of this time spending. The research used methods of analytical modelling, mathematical and transport statistics, survey, analytical and logical analysis, methodology of transport research.

Mathematical models for estimating passenger travel time in cities using public transport are considered. Attention is drawn to formation of each of the elements of travel time and to the relationship of these elements with each other. Such

elements comprise time of walking to the stopping point of departure and of walking from the stopping point of arrival to the destination of the trip; waiting time for boarding a vehicle; travel time spent in a vehicle along the route. The dependences of these elements on the factors that form time spending have been identified. The increase in time spent waiting for boarding a vehicle is investigated depending on reduction in the planned number of vehicles due to breakdowns. The above models can be used in transport planning and assessing quality of public transportation in terms of passenger travel time.

Keywords: *urban passenger transport, passenger's trip, passenger travel, passenger travel time, walking time, waiting time, route travel time, transportation quality.*

*Information about the author:

Spirin, Iosif V. – D.Sc. (Eng), Professor, Chief Researcher of JSC Research Institute of Road Transport (JSC NIIAT), Moscow, Russia, ivspirin@yandex.ru.

Article received 15.04.2020, accepted 26.06.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 28.

Background.

Public urban passenger transport (PUPT) performs the bulk of passenger transportation in urban-type settlements in Russia, while the share of the urban population has reached 74 % of the total population of the country. Most of GDP is produced in cities. Motorization of the population cannot ensure mobility of the most of urban population due to economic, environmental, and urban planning constraints. Therefore, transportation of passengers by PUPT will now and in the foreseeable future retain its leading role in ensuring the «local» mobility of population of the cities. Public transport should provide passengers with such a quality of service that will stimulate citizens to use an alternative mode of transportation instead of cars, using PUPT vehicles. This will help mitigate numerous economic, urban planning, and environmental problems.

Passenger travel time is one of the most significant results of public transport activity. Therefore, the *objective* of this article is to determine a quantitative relationship between time spent by passengers on travel and individual elements of time spending with the main factors that form trip duration.

The research described in the article used review and analytical analysis of publications of domestic and foreign scientists, logical analysis, methods of analytical modelling, mathematical and transport statistics, methodology of transport research.

Studies carried out at different times show that time spent on daily travel is the most significant indicator of quality of transport services for passengers in cities [1–4]. Only for people with limited mobility and senior citizens (they constitute about 20 % of passengers), the opportunity to travel seated is more important than travel time. But even for those people travel time is among main indicators of transportation quality [5, p. 156].

According to the results of the studies by foreign researchers, travel time in public transport is also a leading indicator of quality of transportation services [6–8].

Thus, improving the methodology for estimating travel time spent by passengers is an urgent task of applied transportation science and practices. Reliable estimates of travel time serve as the basis for substantiating plans for development of PUPT systems and

for identifying priority areas for funding most relevant technology for urban passenger transportation and improving transport infrastructure.

For a passenger, primary interest is the ability to complete a network trip¹ in the shortest possible time, that is, a trip from his location to the destination point. In the simplest case, a network trip can be reduced to a trip along a single route. With city growth, its area and the number of transport micro-districts in this area increase, which leads to an accelerated increase in transportation links between those micro-districts. It becomes physically impossible to provide all these connections with direct correspondence. Therefore, in many cases, a network trip is performed with transfers: a passenger sequentially uses several routes, performing a route trip on each of them.

Total travel time

The elements of total travel time are:

- time spent on walking to the passenger's stopover point T_{px1} and from the arrival stop point to the destination of the trip T_{px2} . On average, $T_{px1} = T_{px2}$, since the number of trips «there» and «back» as a whole per day is practically equal to each other. Therefore, we can assume that the amount of time spent on walking is equal to $2 \cdot T_{px}$. If necessary, the walking time before boarding and after disembarking can always be taken into account in the calculations separately;

- time spent waiting for boarding a vehicle T_{wait} , min;

- time spent on travelling in a vehicle along the route between stopping points of embarkation and disembarkation T_{tr} , min.

Total travel time of a passenger for a route trip [1; 4]:

$$T_{route} = 2 \cdot T_{px} + T_{wait} + T_{tr}. \quad (1)$$

Total travel time of a passenger for a network trip [1; 4]:

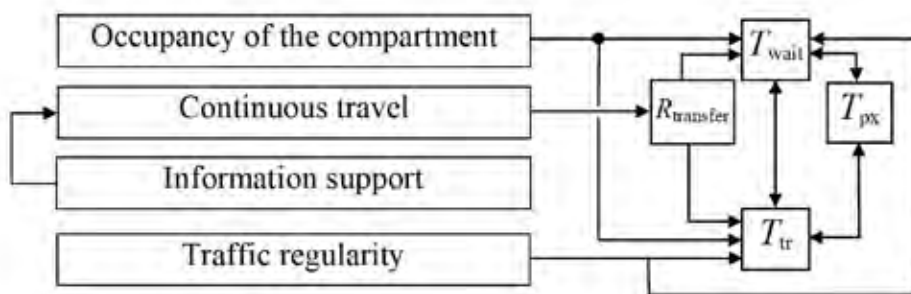
$$T_{net} = 2 \cdot T_{px} + (T_{wait} + T_{tr}) \cdot R_{transfer} \quad (2)$$

where $R_{transfer}$ is transfer rate (average number of passenger embarkations in vehicles of various routes during a network trip).

When transferring along the route, there is also a time spending for making transfers between routes $T_{transfer}$. In most cases, a transfer

¹ The term «network trip» emphasizes that movement is carried out through a transportation network.





Pic. 1. The relationship between elements of travel time and indicators of quality of transportation service.

to a vehicle of a different route is made at the same stopping point at which the passenger arrived during the previous route trip. Otherwise, $T_{transfer}$ should be considered, which can be established according to a large-scale plan of the corresponding urban area, considering the average walking speed of 4 km/h. Due to the limited volume of the article, we will focus on considering only transfers carried out at one stopping point.

With various options for organizing traffic of public transport in the city, it should be borne in mind that formation of elements of travel time is influenced by occupancy of passenger compartments of vehicles (with overcrowding of compartments, T_{wait} and T_{tr} increase), the continuous communication (affects $R_{transfer}$), regularity of traffic (with an unplanned increase in the intervals between the vehicles, T_{tr} and T_{wait} increase). Awareness of passengers about the transport network and timetables affects $R_{transfer}$. When comparing the options for traffic organization, one should take into account the mutual influence of various elements of time consumption on each other (Pic. 1). These relationships are detailed in the dependencies below. In transportation planning, considering these links can be provided by an iterative process implemented using a computer model.

Passengers evaluate psychologically time spent on certain elements of the trip in different ways according to its usefulness. Passengers' perception of the expenditure of their time does not always coincide with its physical flow. According to American scientists, a 30-minute journey by passengers sitting in a bus was perceived as equivalent to 18 minutes. Standing passengers rated the duration of the 30-minute trip as 53 minutes. In this experiment, the passengers did not

use the watch, they gave estimates of time «by eye» [9].

The research carried out by the author on a representative sample of passengers allowed him to conclude that the relative (psychological) assessment of travel time by passengers is differentiated by its elements and can be represented by a utility coefficient: the ratio of the apparent duration of a trip element to its real duration. The flow of time while travelling in the bus is perceived by the respondents to be practically equal to «physical» time. Therefore, utility coefficient for T_{tr} element was taken as the basis for comparison (equal to one). Statistical processing of the experimental results showed that the averaged value of the utility coefficient for the element is equal to 1,21, and for T_{wait} is equal to 1,82. Psychological assessments by passengers of travel time are formed under the influence of the fact that in their minds the passenger sets aside a certain time for the trip, which is organically connected with the feeling of movement in space. No movement is performed while waiting for boarding. Therefore, the passenger's biological clock is in a hurry due to the mismatch between the target and the actual state of the ongoing process. With walking, this misalignment is felt to a lesser extent, since movement in space is carried out, but at a much slower pace than during the trip itself.

The psychological assessment of total travel time by passengers forms their transport fatigue. Hence, when assessing the impact of travel time on quality of transportation services and planning, one should consider not the astronomically determined time spending, but its psychological perception by passengers (seeming time spending T_{seem}), considering the

correction for the utility coefficients of the corresponding elements:

$$T_{seem} = 2(1,21 \cdot T_{px}) + 1,82 \cdot T_{wait} + T_{tr}. \quad (3)$$

According to the results of the research, passenger transport fatigue is proportional to the seeming travel time.

Let us consider further the models of formation of travel time for various elements of the passenger trip.

Time for passenger walking

The average walking speed of a pedestrian in cities is $V_{ped} = 4$ km/h (for cities with a population of 1 million inhabitants or more, $V_{ped} = 5$ km/h) [10]. Therefore, time T_{px} is determined by remoteness of places where the passenger starts and ends walking from the corresponding stopping points. Taking into account the layout of streets and intra-block passages, the passenger's path will deviate from a straight line, however, regardless of the actual configuration of the pedestrian approach route, the distance covered by the passenger on foot can be geometrically decomposed into two components:

- moving from the depths of the block to the street along which the route passes (l_x);
- moving along the street to the nearest stopping point of the route (l_y).

On average $l_x = 1/(3\delta)$, where δ is transport network density, km^{-1} . After approaching of the transport highway, the passenger walks to the nearest stopping point. Average walked distance the street is $l_y = l_h/4$, where l_h is the average length of the route haul, km. Hence, time spent on walking T_{px} (one way) is (60 is the coefficient for converting hours into minutes):

$$T_{px} = \frac{60}{V_{ped}} \left(\frac{1}{3\delta} + \frac{l_h}{4} \right) \approx 15 \left(\frac{1}{3\delta} + \frac{l_h}{4} \right) \text{ min}. \quad (4)$$

The frequency of location of stopping points is among the indicators that require rationalization. When stopping points are frequently met, time of walking along the route is reduced. But, at the same time, speed of travelling decreases, which requires an increase in the number of vehicles or a proportional increase in their passenger capacity to ensure the estimated carrying capacity of the route. In intracity traffic, up to 60 % of the traction power consumption is associated with acceleration and deceleration of vehicles due to frequent stopping points [11].

With an increase in the average length of the haul, other things being equal, time spent waiting for boarding decreases. This is due to a decrease in the turnaround time on the route. In case of irregular movement of vehicles during long intervals of arrival of vehicles to neighboring stops, the number of passengers accumulates at stopping points, which exceeds the calculated value. As a result, the time for making a passenger exchange increases, which leads to a decrease in travelling speed and to an increase in passenger time spent on travelling along the considered route.

Based on the balance of interests the rational length of the haul should be about 500 m on average.

Currently, the average haul length is less than this value. Therefore, normalization of the average length of the haul is relevant by bringing this indicator to the standard. In order not to worsen quality of passenger service, it is necessary to determine how the walking distance of a passenger will change when the length of the haul is normalized. So, if the average length of the haul is 330 m, the passenger on average walks along the route $330 \text{ m} / 4 = 83 \text{ m}$. Dividing by 4 is since a passenger leaving the internal part block and going to the street along which the PUPT route passes, on average gets either to the right or to the left half of the corresponding haul. Next, the passenger will go towards the nearest stopping point. The walking distance in that case, on average, will be half of the half of the length of the haul, i.e., one-fourth of the haul.

With an increase in the average length of the haul to the standard value, a passenger will pass $500 \text{ m} / 4 = 125 \text{ m}$. The increase in the average walking distance will be 42 m, which will increase the passenger's travel time by an additional $42 \text{ m} \cdot 60/4000 \text{ m} = 0,63 \text{ min} \approx 36 \text{ s}$. Therefore, normalization of the length of hauls will practically not affect the level of quality of passenger service.

At the same time, the total number of stopping points on the route will decrease by approximately $[100 - (330 \text{ m} \cdot 100/500 \text{ m})] = 34 \%$. Delays at stopping points take about 40 ... 60 % of the time spent for each trip of a vehicle. Hence, the total duration of the bus trip along the route (excluding parking at the final points of the route) due to normalization (decrease) in the number of



stopping points will be reduced by approximately $[(0,4 \dots 0,6) \cdot 0,34 \cdot 100] = 13,6 \dots 20,5 \%$. Accordingly, the traffic speed will increase, providing a proportional decrease in time T_{pr} . Reduction of time spent on travelling through the route will be more than sufficient to compensate for the increase in walking time, and will ultimately improve quality of transportation services for passengers.

It is also possible to reduce time spent by passengers on walking by increasing density of the transport network, which is restrained by density of the road network in settlements and by deficiency of streets with a sufficient width of the carriageway in the old part of the city.

Waiting time for boarding a vehicle

Time spent waiting for boarding T_{wait} is the most significant reserve for reducing the total travel time and is determined by three factors:

- time interval between vehicles [only public urban transport vehicles that serve the route are considered];

- accuracy of respect of the timetable;
- passenger capacity of the vehicles used.

The influence of the first two factors on T_{wait} is shown by the formula [1; 4; 11; 12, p. 286]:

$$T_{wait} = \frac{I}{2} + \frac{\sigma_I^2}{2I} = 0,5 \left(I + \frac{\sigma_I^2}{I} \right) = 0,5 I_{ef}, \quad (5)$$

where I is planned time interval between the vehicles on the route, min;

σ_I is root-mean-square deviation from the planned interval (characterizes the irregularity of traffic), min;

I_{ef} is effective (seeming) interval of movement on the route [4; 11], min.

Considering possible cases of denied boarding (impossibility to board due to lack of free seats) the formula will be:

$$T_{wait} = \frac{I}{2} + \frac{\sigma_I^2}{2I} + P_{den} \cdot I_{ef} = 0,5 I_{ef} + P_{den} \cdot I_{ef} = (0,5 + P_{den}) \cdot I_{ef}, \quad (6)$$

where P_{den} is probability of a passenger being denied boarding due to the limited passenger capacity of the vehicle [11].

The effective time interval $I_{ef} = I + \sigma_I^2 / I$ considers the increase in the planned interval from the point of view of a passenger at the stopping point, taking into account the uneven arrival of vehicles.

Root mean square deviation from the planned interval:

$$\sigma_I = \sqrt{\sum_{i=1}^n (I - I_{acti})^2 / n}, \quad (7)$$

where n is total number of observations of the time interval in a considered place within the route;

I_{acti} is actual time interval according to the i -th observation, min.

During operation of automated traffic control systems and satellite navigation systems, statistics on regularity of traffic are accumulated automatically and the monitoring results can be used.

In most studies, distribution of deviations of the actual moment of arrival of the vehicle at the stopping point of the route from the planned moment according to the traffic timetable is assumed to be subject to the normal law of probabilities. But it is obvious that arrivals at a stopping point with significant advances in the schedule are less likely than those occurred late for the same time. In this regard, the use of a symmetric statistical distribution to characterize irregularity of traffic seems to be not entirely correct in all cases. Our studies allowed us to establish that more accurate results are provided by the Gram–Charlier function [13]:

$$P(\tau) = f(\tau) - \frac{r_3}{6} f^{(3)}(\tau) + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(4)}(\tau), \quad (8)$$

where $P(\tau)$ is probability of occurrence of a deviation τ ;

$f(\tau)$ is function of normal distribution of probabilities τ ;

r_3 and r_4 are third and fourth highlights of the aggregate of variance statistics;

$f^{(3)}(\tau)$ and $f^{(4)}(\tau)$ are third and fourth derivatives of the function $f(\tau)$.

The second and third terms in (7) reflect obliqueness and steepness of the distribution curve τ , respectively.

At intervals of more than 20 minutes, regular passengers get used to the rhythm of movement of vehicles through the stopping point. In this case, the actual waiting time for boarding will differ markedly from that calculated using the above dependencies, since uniformity of distribution of time for passengers' approach to stopping points within each interval is not observed. Therefore, when intervals are greater, the flow of passengers $P(t)$ is described by the dependence:

$$P(t) = \frac{e^{M(t)}}{\int_0^T e^{M(t)} dt}, \quad (9)$$

where $M(t)$ is utility function for the passenger depending on time t of his actual approach to the stopping point ($0 \leq t \leq T$).

Monitoring of regularity of fleet's traffic on routes is ensured using satellite navigation systems. The most serious violations of the traffic schedule and, at the same time, deterioration of quality of passenger service occur when trips are disrupted due to shortage of vehicles currently in operation.

In the absence of a part of vehicles on the route, the average time T_{wait} increases significantly:

$$T_{\text{wait}} = \frac{T_{\text{ef}}}{2} \cdot K_{AU}, \quad (10)$$

where K_{AU} is coefficient of increase in time spending;

A and U signify number of vehicles, that, respectively, was planned, and that left the route, units.

Vehicles that are currently absent on the route, may be differently listed in the sequence of service time provided for by the traffic schedule². For example, if three vehicles are missing on the route, then three randomly generated situations are possible: all missing vehicles (vacancies) are in a sequence to start operation in a row; two vacancies are located in a row, and the third — elsewhere; all vacancies are located in different locations. The probability of these situations depends on the total number of units in service provided for by the traffic schedule. The most serious deviations occur when vacancies are concentrated in one place.

The performed analysis, considering the likelihood of various situations, showed that with vacancies located in different places of the sequence of being in service $K_{AU} = \frac{A+2 \cdot U}{A}$,

if all vacancies are concentrated in one and the same place, then $K_{AU} = \frac{A+U^2+U}{A}$.

² [The author uses original Russian term that means «exit», referring to the fact that a vehicle, e.g. a bus, during its service hours exits vehicle park, and starts operation on the assigned route — *ed. note*] — conditional fleet unit, for which traffic schedule on the route established operation on the line on this particular day. In various work periods «exit» can be provided for to various vehicles and drivers.

Since the combination of vacancy placement is not known in advance, we should talk about the mathematical expectation of this coefficient $M\{K_{AU}\}$:

$$\frac{A+2 \cdot U}{A} < M\{K_{AU}\} < \frac{A+U^2+U}{A}. \quad (11)$$

An attempt to analytically determine the dependence $K_{AU} = f(A, U)$ came across significant mathematical difficulties: complex combinatorial relations for accounting for various options for vacancies and the probabilities of their occurrence for a different number of vehicles, included in the traffic schedule. Therefore, the solution to the problem was obtained by direct enumeration on a computer of options for combining vacancies and other initial data. The calculations were carried out for the options when the number of buses varied from $A = 2$ to $A = 50$ units, with the number of vacancies from $U = 1$ to $U = (A - 1)$. The accuracy of calculations is $\pm 1,0 \cdot 10^{-10}$. This accuracy, with a very large excess, provides an acceptable error based on the technologically determined values of the initial data and the desired results. In practice, this allows us to talk about the absolute accuracy of the calculations. As a result, a matrix of numerical values of K_{AU} coefficient was obtained for various combinations of A and U .

The analysis of the matrix allowed us to propose a formula that is completely identical in accuracy to the specified accuracy of the simulation result. This allows us to make the assumption that the following formula is accurate (in any case, its accuracy is more than a million times higher than the data errors actually observed on PUPT) analytical model of the indicator under consideration:

$$K_{AU} = \begin{cases} \frac{A+(U+1)}{A-(U-1)} & \text{if } 0 < U < A, \\ 1 & \text{if } U = 0, \\ \infty & \text{if } U = A. \end{cases} \quad (12)$$

Formula (12) is relevant in cases where the dispatcher does not change the traffic schedule for the route (does not shift the intervals when part of vehicles leaves the route). If the traffic schedule is being promptly revised, and the intervals are uniformly increasing, the usual dependence should be used, and calculations should be made with new planned increased intervals for the route.





Denied boarding occurs when the available number of seats in a vehicle is less than the number of passengers who wish to board. When organizing transportation and analyzing its quality, passenger service is provided in conditions of filling the cabin in accordance with the permissible standard (no more than 5 passengers/m²) [14].

The probability of a passenger being denied boarding P_{den} means the relative number (proportion) of passengers who did not board the vehicle due to its overcrowding with passengers physically, plus the excess number of passengers who, although they managed to enter the cabin, were transported in unacceptably cramped conditions.

An adequate analytical model for determining the probability of a passenger denied boarding was developed and substantiated by the author in [4; 11]:

$$P_{den} = 1 / \sqrt{2\pi} \int_x^{\infty} \exp(-y^2/2) dy,$$

if $x = (q + 0,5 - I \cdot \lambda) / \sqrt{I \cdot \lambda}$ and $\infty \leq y \leq x$, (13)

where q is nominal maximum passenger capacity of a vehicle, pass.;

λ is average intensity of passenger traffic on the corresponding section of the route, passengers/min.

The calculation error for the presented model based on the results of field experiments

is no more than 5 %. Considering the fact that the additional time spent by passengers due to denied boarding is usually no more than 15 ... 20 % of the total time spent waiting for boarding, this accuracy should be considered satisfactory (the overall error of T_{wait} is not more than 1 %).

In practice, it is often necessary to conduct an express analysis of the time spent by passengers waiting for boarding. For this, it is recommended, in the absence of specific initial data for calculations according to the above dependences, to take $T_{wait} = (0,7 \dots 0,75) I$. Note in this regard that in most practical applications a significantly underestimated estimate of time spent waiting for boarding is used: $T_{wait} = 0,5I$.

Time spent in a vehicle while travelling along the route

Travelling time spent in a vehicle, min [1; 4]:

$$T_{sl} = (l_{av} / v_s) \cdot 60, \quad (14)$$

where l_{av} is average distance of passenger trip along the route, km;

v_s is travel speed on the route, km/h.

The average trip distance in the absence of specific data is determined by the approximate formula proposed in [1] by Ph.D. (Eng) A. H. Zilbertal:

$$l_{av} = 1,3 + n_{pl} \sqrt{F} \approx 1,3 + 0,3 \sqrt{F}, \quad (15)$$

where n_{pl} is empirical coefficient of the urban development structure of the city territory;

F is residential area of the city, km².

An adequate model for distribution of passenger trips by distance (l_i , km) is obtained using Erlang's law [13]:

$$f(l_i) = ((k/l_i)^k l_i^{k-1} e^{-kl_i} / l_i) / (k-1)!, \quad (16)$$

where $f(l_i)$ is density function of distribution of trips by distance;

k is Erlang's positive integer, the «shape».

According to the experimental data, the k of Erlang's distribution for the case under consideration corresponds to the square of the ratio of the travel distance l_i to its standard deviation:

$$k \approx ((5l_i/l_{max}) - 1)^2, \quad (17)$$

where l_{max} is length of the longest route in the settlement, km.

The resulting value k is rounded to the nearest whole number. In the absence of data for the calculation, we take $k = 3$.

With a reduction in number of transfers and interchanges, due to improvement of the route system, the average distance of a route trip may slightly increase, but a network trip on average always becomes shorter.

Conclusions. The considered analytical models for determining the numerical values of travel time of passengers of public urban transport are based on the use of initial data extracted from the available reporting. The practical use of these models is possible in the following situations:

- development and improvement of transportation development plans in accordance with programs and strategies for development of urban passenger transportation by public transport;
- assessment and analysis of quality of passenger service on public transport routes (total travel time and individual elements of travel time spending);
- ensuring the calculation of external results when implementing measures towards sustainable development of the urban environment and transport infrastructure [15];
- organization of passenger transportation on the existing route network.

REFERENCES

1. Zilbertal, A. H. Tram facilities: A guide for tram employees and students. Part 1 [Tramvaynoe khozaystvo: Rukovodstvo dlya rabotnikov tramvaya i uchashchikhsya]. Moscow-Leningrad, OGIZ – Gostransizdat, 1932, 304 p.

2. Samoilov, D. S. Urban transport: Textbook [Gorodskoy transport: Uchebnik]. Moscow, Stroyizdat publ., 1983, 384 p.

3. Asaliev, A. M., Zavyalova, N. B., Saginova, O. V. [et al]. Marketing approach to quality management of transport services: Monograph [Marketingoviy podkhod k upravleniyu kachestvom transportnogo obsluzhivaniya: Monografiya]. Novosibirsk, Publishing House CRNS, 2016, 172 p.

4. Spirin, I. V. Transportation of passengers by urban transport: a reference guide [Perevozki passazhirov gorodskim transportom: Spravochnoe posobie]. 2nd ed. Moscow, Akademkniga publ., 2006, 413 p.

5. Spirin, I. V. Scientific bases of complex restructuring of urban bus transport. Ph.D. (Eng) thesis [Nauchnie osnovy kompleksnoi restruktizatsii gorodskogo avtobusnogo transporta. Dis... na soisk. uch. step. doc. tekhn. nauk]. Moscow, MADI publ., 2007, 421 p.

6. Papagostas, C. S. Fundamentals of Transportation Engineering. A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs, New Jersey, 1987, 458 p.

7. Eboli, L., Mazzulla, G. A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. *Transport Policy*, 2011, Vol. 18, Iss. 1, pp. 172–181. [Electronic resource]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967070X10000958>. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.07.007>.

8. Dell'Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P. The quality of service desired by public transport users. *Transport Policy*, 2011, Vol. 18, Iss. 1, pp. 217–227. [Electronic resource]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X10001009>. Last accessed 15.05.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.08.005>.

9. Horowitz, A. J. Subjective Value of Time in Bus Transit Travel. *Transportation*, 1981, Vol. 10, No. 2, pp. 149–164. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00165263>.

10. SP 42.13330.2011. Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements. Updated edition of SNiP 2.07.01–89 (as amended). Entered into force on 20.05.2011 [SP 42.13330.2011. Gradostroitelstvo. Planirovka i zastroika gorodskikh i selskikh poselenii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.07.01-89 (s popravkoi). Vveden v deystvie s 20.05.2011]. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2011, 109 p.

11. Antoshvili, M. E., Lieberman, S. Yu, Spirin, I. V. Optimization of urban bus transportation [Optimizatsiya gorodskikh avtobusnykh perevozok]. Moscow, Transport publ., 1985, 102 p.

12. Wagner, G. Fundamentals of Operations Research [Osnovy issledovaniya operatsii. Transl. from English] in 3 volumes. Vol. 3. Moscow, Mir publ., 1973, 503 p.

13. Mitropolskiy, A. K. Technique of statistical calculations [Tekhnika statisticheskikh vychislenii]. Moscow, Nauka publ., 1971, 576 p.

14. Social standard of transport services for the population in performance of transportation of passengers and luggage by road and urban electric transport. Approved by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of January 31, 2017 No. NA-19-r [Sotsialniy standart transportnogo obsluzhivaniya naseleniya pri osushchestvlenii perevozok passazhirov i bagazha avtomobilnym transportom i gorodskim elektricheskim transportom. Utv. Rasporyazheniem Mintransa RF ot 31 yanvarya 2017 g. No. NA-19-r].

15. Grishaeva, Yu. M., Matantseva, O. Yu., Spirin, I. V., Savosina, M. I., Tkacheva, Z. N., Vasin, D. V. Sustainable development of transport in Russian cities: experience and urgent tasks [Ustoichivoe razvitiye transporta v gorodakh Rossii: opyt i aktualnie zadachi]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*, 2018, Vol. 13, Iss. 4, pp. 24–46. ●



Перспективные направления современных научных исследований в сфере умной мобильности



Трегубов Владимир Николаевич – Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия.*

Владимир ТРЕГУБОВ

Современные технологии умной мобильности дают возможность решать проблемы городского транспорта, что позволяет улучшить качество городских перемещений, повысить доступность транспорта и обеспечить его эффективность. Цель исследования состоит в том, чтобы выявить ключевые тренды научных исследований по теме умной мобильности в научной литературе за последние годы. Автором с использованием программы VOS Viewer был выполнен библиометрический анализ публикаций, размещённых в базах данных Web of Science и Scopus и содержащих ключевые слова, связанные с умной городской мобильностью.

Для всего массива отобранных публикации были проанализированы: совместное цитирование, перекрёстные ссылки, совместно используемые ключевые слова, совместное авторство. В результате была построена карта связей публикаций в сфере

умной мобильности с определением существующих отношений между ключевыми словами и авторами в этой сфере. Также была построена карта кластеров, которая отображает близость публикаций друг к другу. Кластер образует группа тесно связанных по темам, авторам и ключевым словам исследований. Была проведена кластеризация публикаций и выделено шесть кластеров, каждый из которых отражает одно перспективное направление исследований в сфере умной мобильности. Полученные результаты позволяют установить перспективные направления умной мобильности путём автоматизированной обработки высококачественного массива публикаций. Результаты могут быть использованы городскими властями, транспортным бизнесом и научными исследователями для обзора и анализа перспективных технологий умной мобильности и обоснования решений в сфере городского транспортного планирования.

Ключевые слова: транспорт, умная городская мобильность, библиометрический анализ, тренды научных исследований.

*Информация об авторе:

Трегубов Владимир Николаевич – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры бизнес-технологий и логистики, Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия, tregubovvn@outlook.com.

Статья поступила в редакцию 29.03.2020, принята к публикации 11.06.2020.

For the English text of the article please see p. 49.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность использования технологий умной мобильности обусловлена наличием транспортных проблем в городах, к ним обычно относят: негативное воздействие транспорта на окружающую среду, транспортные заторы, избыточное использование личных транспортных средств, перегруженность городской инфраструктуры и т.д. Развитие умной мобильности даст возможность минимизировать указанные проблемы, а в перспективе позволит повысить качество городской жизни и улучшить доступность и эффективность городского транспорта.

В современных исследованиях умный город рассматривается как специфическая экосистема, которая развивается за счёт широкого использования информационных и логистических технологий, реализация которых направлена на улучшение качества жизни граждан через интеграцию различных систем и услуг. Сами термины «умный город» и «умная мобильность» в публикациях используются для описания перспективных направлений развития инновационных технологий в повседневной жизни города, в частности, развитие инноваций на городском транспорте [1].

Умная городская мобильность обеспечивается через внедрение в городе широкого спектра современных информационных технологий, создание интеллектуальных транспортных систем, применение специализированных баз данных. Интеллектуализация городской транспортной системы способствует уменьшению дорожных заторов, позволяет повысить безопасность городского движения, обеспечить максимальную синхронизацию работы городских видов транспорта. Существующие в данный момент технологии позволяют отслеживать транспорт в реальном времени, что даёт возможность повысить эффективность управления городским транспортом, а жителям — планировать свои перемещения по городу.

Цель работы состоит в том, чтобы установить существующие тренды исследований по теме умной городской мобильности в научной литературе. Для этого был выполнен библиометрический

анализ публикаций в базах данных Web of Science и Scopus за 2012–2017 годы. Для анализа был использован метод библиометрического исследования с помощью программы VOS Viewer [2]. Аннотации статей для анализа были взяты из базы публикаций <https://app.dimensions.ai/discover/publication>.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования были отобраны публикации, которые используют в заголовке, аннотации или в ключевых словах понятие «городская умная мобильность» («urban smart mobility»). Среди этих публикаций по критерию количества цитирований были выбраны наиболее влиятельные. В процессе анализа были рассмотрены 929 статей. Для этого массива публикаций были проанализированы: совместное цитирование, перекрёстные ссылки, совместно используемые ключевые слова, кластеры связанных публикаций. В результате была построена карта связей публикаций в сфере умной мобильности с определением существующих отношений между используемыми терминами и ключевыми словами. Подобные исследования в смежных сферах уже проводились, однако данная область является динамичной, изменения трендов в ней происходят непрерывно [3; 4].

Библиометрический анализ публикаций проводился в следующей последовательности.

На первом этапе был выполнен отбор библиометрической информации из базы данных Dimensions и проведена предварительная группировка этой информации. Информация была приведена к единому формату, очищена от повторов и ошибок, что дало возможность повысить качество используемых данных. Затем данные были преобразованы в семантическую сеть связанных публикаций, что позволяет отразить имеющиеся информационные связи и сформировать единое поле публикаций. Построенная семантическая сеть нормализуется для того, чтобы количественно выразить сходство между входящими в неё элементами.

Вторым этапом является обработка семантической сети с использованием VOS



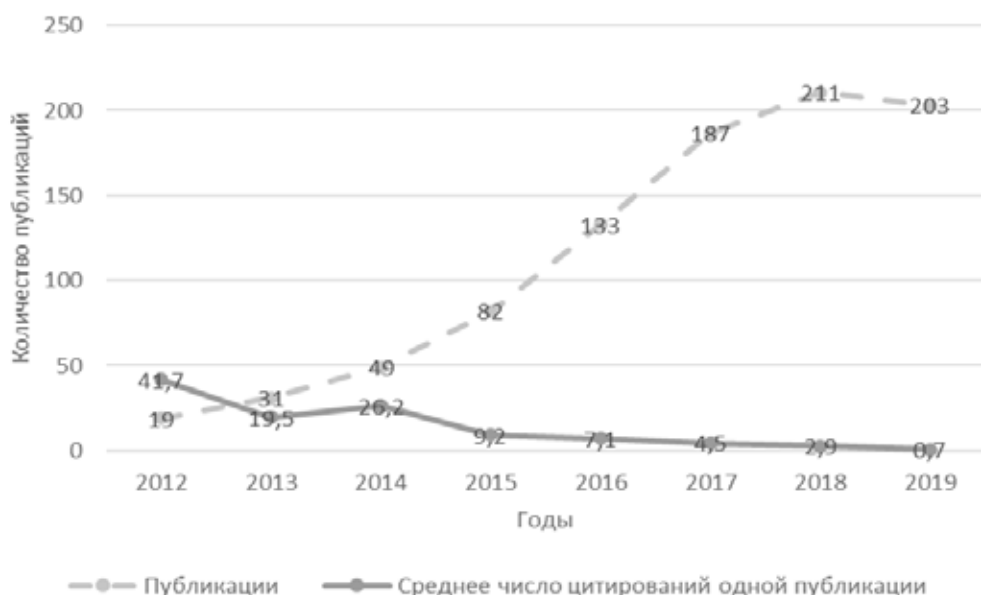


Рис. 1. Динамика публикаций и цитирований (подготовлен автором).

Viewer для графического представления результата.

На третьем, заключительном, этапе выполняется экспертная оценка результатов для того, чтобы установить тренды исследований, описать кластеры публикаций и выявить факторы научно-технического развития в выбранной области исследований [5].

На рис. 1 отражена динамика изменения количества публикаций по годам исследований. Явно выделяется тренд резкого увеличения количества публикаций по теме умной мобильности за последние годы, а работы, написанные до 2014 года, активно цитируются. В среднем каждая работа тех лет имеет более 30 цитирований.

Важным результатам исследования является карта кластеров, которая отображает связи между ключевыми словами и терминами, которые были использованы в публикациях. Кластер образует группа тематически связанных друг с другом исследований. На результирующей карте эти группы выделены различными цветами и пронумерованы. Было выявлено разбиение публикаций на шесть кластеров, для анализа было использовано 49 публикаций, каждая из которых имеет не менее 30 цитирований.

В первый кластер вошли публикации, связанные с темой умных методов городского транспортного планирования [6; 7]. Оптимизация городского транспортного планирования в настоящее время является ключевой концепцией умного города, поэтому часто рассматривается в исследованиях, связанных с развитием инфраструктуры умного города, оптимизацией транспортных потоков и т.д. Проблемы городского транспортного планирования являются характерными для многих городов, однако внутренняя специфика каждого из них приводит к тому, что отсутствует единое универсальное планировочное решение, и необходимо для каждого города разрабатывать индивидуальный транспортный план.

Второй кластер образуют публикации, связанные с темой умного городского общественного транспорта [1; 8].

Исследователи изучают тенденции развития технологий для решения проблем городских общественных перевозок. В развитии современных систем общественного транспорта городские власти инвестируют значительные средства, в том числе в создание информационной и дорожной инфраструктуры. В этой сфере активно развивается использование интеллектуальных сервисов, внедряются новые практики

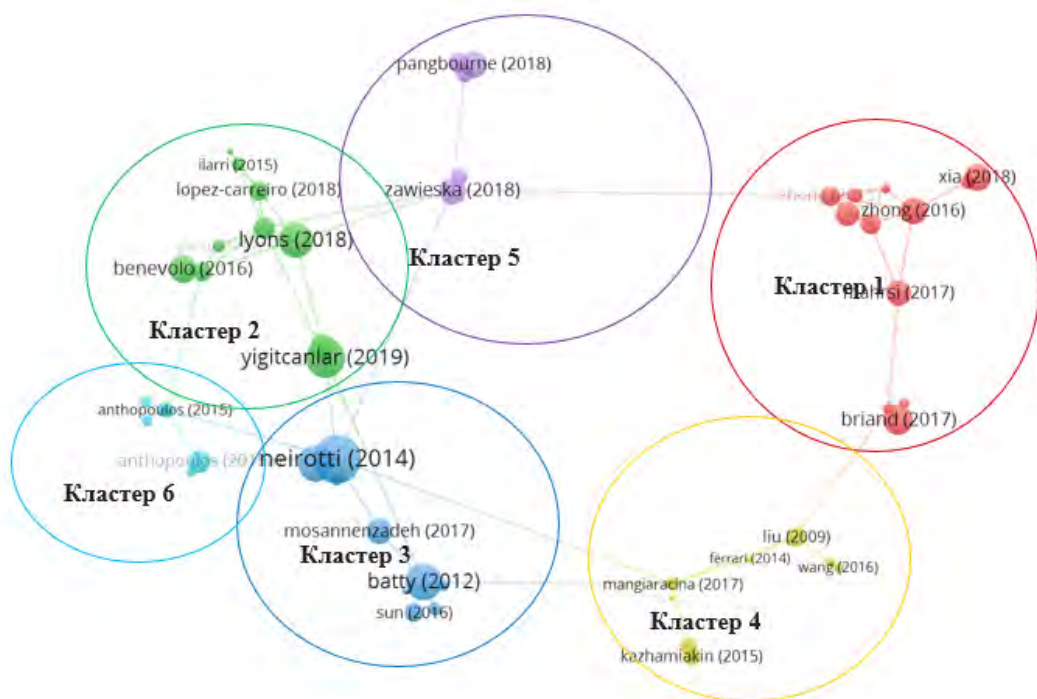


Рис. 2. Библиографическая карта кластеров публикаций (подготовлен автором).

использования транспортных средств. В публикациях описываются методы использования машинного обучения для управления перевозками общественным транспортом, методы внедрения в городскую практику смарт-карт, доступ к различным видам транспорта по единой карте, обеспечение соблюдения расписаний и т.д.

Третий кластер составляют публикации по теме использования перспективных инновационных технологий в сфере городского транспорта (включая грузовой транспорт и такси, в отличие от второго кластера) [9; 10]. Данная тема активно исследуется в последние годы, находясь на пересечении информационных и транспортных технологий. Предлагаемые решения кардинально изменяют существующие методы городской мобильности. Например, существенно изменилась система городского такси, появились новые способы аренды транспортных средств. В городах сформировались новые рынки аренды транспортных средств (велосипедов, электросамокатов).

Четвёртый кластер составляют публикации по теме интеллектуальных транспортных систем [11]. Это достаточно раз-

витое направление исследований, в которое входят темы, связанные с внедрением интеллектуальных технологий в сферу управления дорожным движением, городскими транспортными маршрутами и т.д. Целью данных разработок является повышение эффективности работы городской транспортной системы, снижение городских заторов. Современные информационные технологии позволяют создавать специализированные интеллектуальные решения, которые дают возможность централизованно управлять городским движением, что ведёт к снижению городского трафика, уменьшает загрязнение воздуха, обеспечивает более точную и полную навигацию транспорта в режиме реального времени.

Пятый кластер составляют публикации по разработке интеллектуальных решений, направленных на обеспечение автономной мобильности [12; 13]. Данная тема является перспективной, использование автономных транспортных средств в будущем будет важной технологией, с её развитием прогнозируются существенные изменения как в сфере общественного, так и личного городского транспорта. В будущем будут



развиваться технологии управления транспортом, основанные на внедрении распределённых систем транспортного регулирования, специализированной интеллектуальной дорожной инфраструктуры и автономных транспортных средств. Уже в настоящее время отмечается положительный эффект от внедрения подобных решений.

Шестой кластер составляют публикации, в которых описаны методы моделирования городских транспортных систем и подходы к формированию единых стандартов их создания [14]. В данных публикациях рассматриваются вопросы информационной поддержки методов моделирования городского транспорта, использования различных технологий сбора информации из городской среды для транспортных моделей. Важной частью данного кластера являются публикации, связанные с разработкой специализированных алгоритмов моделирования на основе машинного обучения, искусственного интеллекта, систем компьютерного зрения. В будущем эти технологии позволят обрабатывать информацию, собранную с использованием сенсорных датчиков и видеокamer, для решения задачи управления городским движением в реальном времени.

Библиометрический анализ является одним из эффективных методов обработки объёмной текстовой информации, позволяющих получить широкое представление о проблемах, стоящих перед исследователями, а также ознакомиться с направлениями развития научного вопроса путём автоматизированной обработки высококачественного массива публикаций. Результаты исследования могут быть использованы городскими властями, транспортным бизнесом и научными исследователями для выявления перспективных трендов умной мобильности и обоснования собственных решений в сфере городского планирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benevolo, C., Dameri, R. P., D'Auria, B. Smart mobility in smart city action taxonomy, ICT intensity and public benefits. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*. Springer International Publishing, 2016, Vol. 11, pp. 13–28. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23784-8>.
2. Eck, N. J. van, Waltman, L. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and

VOSviewer. *Scientometrics*, 2017, Vol. 111, No. 2, pp. 1053–1070. DOI: [10.1007/s11192-017-2300-7](https://doi.org/10.1007/s11192-017-2300-7).

3. Hajduk, S. Bibliometric Analysis of Publications on City Logistics in International Scientific Literature. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 182, pp. 282–290. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.03.194](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.194).

4. Tomaszewska, E. J., Florea, A. Urban smart mobility in the scientific literature – Bibliometric analysis. *Engineering Management in Production and Services*, 2018, Vol. 10, No. 2, pp. 41–56. DOI: [10.2478/emj-2018-0010](https://doi.org/10.2478/emj-2018-0010).

5. Akoev, M. Mapping Science and Technology, Forecasting Research and Development. *Handbook for Scientometrics: Indicators of science and technology development*. Publishing House of Ural University, 2014, pp. 164–184. [Электронный ресурс]: <https://science.urfu.ru/en/publications/mapping-science-and-technology-forecasting-research-and-developme>. Доступ 27.04.2020.

6. Briand, A.-S., Côme, E., Trépanier, M., Oukhellou, L. Analyzing year-to-year changes in public transport passenger behaviour using smart card data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 79, pp. 274–289. DOI: [10.1016/j.trc.2017.03.021](https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.021).

7. Hasan, S., Schneider, C. M., Ukkusuri, S. V., Gonzalez, M. C. Spatiotemporal Patterns of Urban Human Mobility. *Journal of Statistical Physics*, 2013, Vol. 151, No. 1–2, pp. 304–318. [Электронный ресурс]: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/89404/Gonzalez_Spatiotemporal%20patterns.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Доступ 27.04.2020.

8. Lyons, G. Getting smart about urban mobility – Aligning the paradigms of smart and sustainable. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, 2018, Vol. 115, pp. 4–14. DOI: [10.1016/j.tra.2016.12.001](https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.12.001).

9. Neirotti, P., De Marco, A., Cagliano, A. C., Mangano, G., Scorrano, F. Current trends in smart city initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 2014, Vol. 38, pp. 25–36. DOI: [10.1016/j.cities.2013.12.010](https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.12.010).

10. Batty, M., Axhausen, K., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., Portugali, Y. Smart cities of the future. *European Physical Journal: Special Topics*, 2014, Vol. 214, No. 1, pp. 481–518. DOI: [10.1140/epjst/e2012-01703-3](https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3).

11. Mangiaracina, R., Perego, A., Salvadori, G., Tumino, A. A comprehensive view of intelligent transport systems for urban smart mobility. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2017, Vol. 20, No. 1, pp. 39–52. [Электронный ресурс]: <https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1003931/309232/A%20comprehensive%20view%20of%20Intelligent%20Transport%20Systems%20%28ITS%29%20for%20urban%20Sm...pdf>. Доступ 27.04.2020.

12. Zawieska, J., Pieriegud, J. Smart city as a tool for sustainable mobility and transport decarbonisation. *Transport Policy*, Elsevier, 2018, Vol. 63 (C), pp. 39–50. DOI: [10.1016/j.tranpol.2017.11.004](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.11.004).

13. Pangbourne, K., Stead, D., Mladenović, M., Milakis, D. The Case of Mobility as a Service: A Critical Reflection on Challenges for Urban Transport and Mobility Governance. Ed. Marsden, G. and Reardon, L. *Governance of the Smart Mobility Transition*, Emerald Publishing Limited, 2018, pp. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.1108/978-1-78754-317-120181003>.

14. Anthopoulos, L., Janssen, M., Weerakkody, V. Smart Service Portfolios: Do the Cities Follow Standards? *Proceedings of the 25th International Conference Companion on World Wide Web*, Montreal, Canada. New York: ACM Press, 2016, pp. 357–362. DOI: [10.1145/2872518.2888618](https://doi.org/10.1145/2872518.2888618). ●



Promising Modern Research Areas in Smart Mobility



Tregubov, Vladimir N., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.*

Vladimir N. TREGUBOV

ABSTRACT

Contemporary smart mobility technology makes it possible to solve the problems of urban transport, improving quality of urban mobility, increasing availability of transport, and ensuring its efficiency. The objective of the study is to identify key trends of research on smart mobility in recent scientific sources. The author, using VOS Viewer program, carried out a bibliometric analysis of publications indexed in the Web of Science and Scopus databases and containing keywords related to smart urban mobility.

Co-citations, cross-references, shared keywords, co-authorships have been analyzed for the entire set of selected publications. As a result, a map of links between publications in the field of smart mobility was built, defining existing relationships between keywords and

authors in this area. Also, a map of clusters was built, which displays proximity of publications to each other. A cluster comprises a group of research closely related via research topics, authors, and keywords. Clustering of publications was conducted followed by identifying six clusters, each of which reflects single promising research area in the field of smart mobility. The results obtained make it possible to identify promising development trends for smart mobility through automated processing of a high-quality array of publications. The results can be used by municipal officials, transportation business and academia to review and analyze emerging smart mobility technologies and to make informed urban transport planning decisions.

Keywords: transport, smart urban mobility, bibliometric analysis, research trends.

*Information about the author:

Tregubov, Vladimir N. – D.Sc. (Economics), Associate Professor, Professor of the Department of Business Technologies and Logistics of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia, tregubovn@outlook.com.

Article received 29.03.2020, accepted 11.06.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 44.

Introduction.

The relevance of the use of smart mobility technology is due to the persevering transport problems in the world cities, usually comprising negative impact of transport on the environment, traffic congestion, excessive use of personal vehicles, congestion of urban infrastructure, etc. The development of smart mobility will make it possible to minimize these problems, and in the future will improve the quality of urban life, availability, and efficiency of urban transportation.

Modern research considers smart city as a specific ecosystem that develops through the widespread use of information and logistics technologies, which are implemented to improve quality of life of citizens through integration of various systems and services. The terms «smart city» and «smart mobility» themselves are used in publications to describe promising directions for development of innovative technology in the daily life of the city, for introducing innovations to urban transport [1].

Smart urban mobility is provided for through introduction of a wide range of modern information technologies into the city life, development of intelligent transport systems, and the use of specialized databases. Intellectualization of the urban transport system helps to reduce traffic congestion, improve safety of urban traffic, and ensure maximum synchronization of urban transport modes. Currently existing technologies allow tracking transport in real time, making it possible to improve efficiency of urban transport management, and help residents to plan their urban mobility.

The *objective* of the work is to identify existing research trends referring to smart urban mobility in the scientific publications. To do this, a bibliometric analysis of publications indexed in the Web of Science and Scopus databases for 2012–2017 was carried out. For the analysis, the *method* of bibliometric research with the help of VOS Viewer program [2] was used. The articles' abstracts for analysis were compiled from the publication database <https://app.dimensions.ai/discover/publication>.

Results.

For the study, publications that use the concept of «urban smart mobility» in the title, abstracts, or keywords were first selected. Among those publications, the publications with highest impact factor were selected by the criterion of the number of citations. During the analysis, 929 articles were

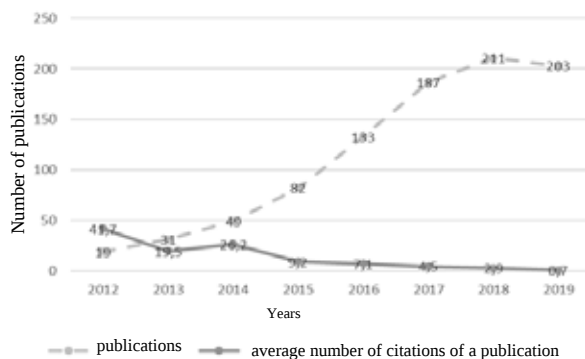
reviewed. Co-citations, cross-references, shared keywords, clusters of related publications were analyzed for the selected array of publications. A map of links between publications in the field of smart mobility was built followed by identification of the existing relationships between the terms and keywords used. Similar studies in related areas have already been carried out, but this field is rather dynamic, which is proved by continuous changing of the trends [3; 4].

Bibliometric analysis of publications was carried out in the following sequence. At the *first stage*, bibliometric information was selected from Dimensions database and preliminary grouping of this information was carried out. The information was converted to a single format, cleared of doubling, iterations, and errors, which made it possible to improve quality of the data used. Then the data was transformed into a *semantic network* of related publications, which made it possible to reveal the existing information links and to form a single publication field. The constructed semantic network was normalized to quantitatively express similarity between the elements included. The *second stage* was processing the semantic network using VOS Viewer to graphically represent the result. At the *third and final stage*, an expert assessment of the results was carried out to identify research trends, describe clusters of publications, and identify factors of scientific and technological development in the selected field of research [5].

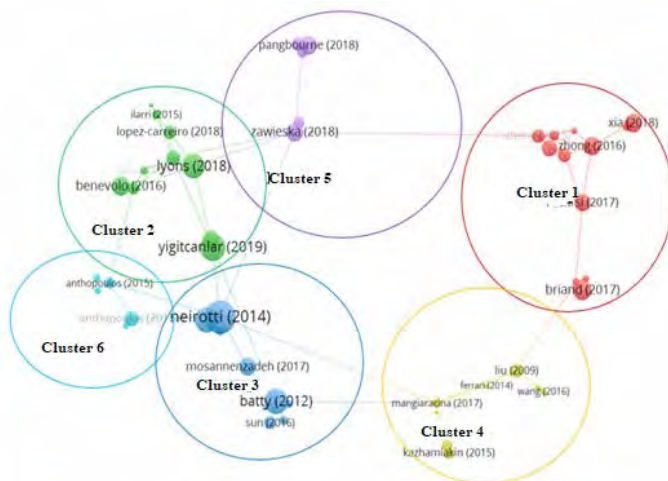
Pic. 1 reflects the dynamics of changes in the number of publications per years of research. There is a clear trend of a sharp increase in the number of publications on the topic of smart mobility in recent years, while works written before 2014 are actively cited. On average, each work of those years has got more than 30 citations.

An important research finding is the cluster map, which displays the relationships between keywords and terms that have been used in publications. The cluster consists of a group of thematically related studies. These groups are highlighted in different colors and enumerated on the resulting map. Division of publications into six clusters was identified, 49 publications were used for analysis, each of which had at least 30 citations.

The first cluster includes publications related to the topic of smart methods of urban transport planning [6; 7]. Optimization of urban transport planning is currently a key concept of a smart city; therefore it is often considered in studies related to development of smart city infrastructure, optimization of traffic flows, etc. The problems of



Pic. 1. Dynamics of publications and citations (constructed by the author).



Pic. 2. Bibliographic map of clusters of publications (developed by the author).

urban transport planning are typical of many cities, however, the internal specificity of cities leads to the absence of a single universal planning solution and it is necessary to develop an individual transport plan for each city.

The second cluster is formed by publications related to the topic of smart urban public transport [1; 8]. Researchers are looking at technology trends to address urban public transportation challenges. The city authorities are investing heavily in development of modern public transport systems, including in creation of information and road infrastructure. In this area, the use of intelligent services is actively developing, new practices of using vehicles are being introduced. The publications describe methods of using machine learning to manage public transportation, methods of introducing smart cards into urban practices, and of providing access to various modes of transport using a single card, ensuring respect of timetables, etc.

The third cluster consists of publications on the use of promising innovative technologies in the

field of urban transport, (including freight transport and taxis, in contrast to the second cluster) [9; 10]. This topic has been actively investigated in recent years, being at the intersection of information and transport technologies, the proposed solutions radically change the existing methods of urban mobility. For example, the city taxi system has changed significantly, new ways of renting vehicles have appeared, and new markets for rental of vehicles (bicycles, electric scooters) have emerged in the city.

The fourth cluster consists of publications on the topic of intelligent transport systems [11]. This is a developed area of research, which includes topics related to introduction of intelligent technologies in the field of traffic control, urban transport routes management, etc. The purpose of these developments is to improve efficiency of the urban transport system, reduce urban congestion. Modern information technologies make it possible to create specialized intelligent solutions that make it possible to centrally control city traffic, which leads to a decrease in urban traffic, reduces air



pollution, and provides more accurate and complete navigation of vehicles in real time.

The fifth cluster consists of publications on development of intelligent solutions aimed at ensuring autonomous mobility [12; 13]. This topic is promising, the use of autonomous vehicles in the future will be an important technology, followed by significant changes that have already been predicted in both public and personal urban transport. In the future, transport management and control technologies will be developed based on introduction of distributed transport regulation systems, specialized intelligent road infrastructure, and autonomous vehicles, while already at present, a positive effect from implementation of such solutions is evident.

The sixth cluster consists of publications that describe methods for modelling urban transport systems and approaches to developing uniform standards for them [14]. These publications consider the issues of information and software support for urban transport modelling methods, the use of various technologies for collecting information from the urban environment to further build transport models. As its important part this cluster contains publications related to the development of specific simulation algorithms based on machine learning, artificial intelligence, and computer vision systems. In the future, these technologies will make it possible to process information, collected using sensors and video cameras, to solve the problem of urban traffic control in real time.

Brief conclusions. Bibliometric analysis is among effective methods for processing voluminous textual information, allowing to get a broad understanding of the problems, which the researchers are facing, as well as to get acquainted with the directions of development of a research topic through automated processing of a high-quality array of publications. The results of the study can be used by city authorities, transportation business and researchers to identify promising trends in smart mobility and justify their own decisions in the field of urban planning.

REFERENCES

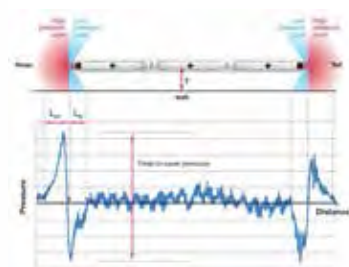
1. Benevolo, C., Dameri, R. P., D'Auria, B. Smart mobility in smart city action taxonomy, ICT intensity and public benefits. Lecture Notes in Information Systems and Organisation. Springer International Publishing, 2016, Vol. 11, pp. 13–28. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23784-8>.
2. Eck, N. J. van, Waltman, L. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, 2017, Vol. 111, No. 2, pp. 1053–1070. DOI: [10.1007/s11192-017-2300-7](https://doi.org/10.1007/s11192-017-2300-7).
3. Hajduk, S. Bibliometric Analysis of Publications on City Logistics in International Scientific Literature. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 182, pp. 282–290. DOI: [10.1016/j.proeng.2017.03.194](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.194).
4. Tomaszewska, E. J., Florea, A. Urban smart mobility in the scientific literature – Bibliometric analysis. *Engineering Management in Production and Services*, 2018, Vol. 10, No. 2, pp. 41–56. DOI: [10.2478/emj-2018-0010](https://doi.org/10.2478/emj-2018-0010).
5. Akoev, M. Mapping Science and Technology, Forecasting Research and Development. Handbook for Scientometrics: Indicators of science and technology development. Publishing House of Ural University, 2014, pp. 164–184. [Electronic resource]: <https://science.urfu.ru/en/publications/mapping-science-and-technology-forecasting-research-and-developme>. Last accessed 27.04.2020.
6. Briand, A.-S., Côme, E., Trépanier, M., Oukhellou, L. Analyzing year-to-year changes in public transport passenger behaviour using smart card data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 79, pp. 274–289. DOI: [10.1016/j.trc.2017.03.021](https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.021).
7. Hasan, S., Schneider, C. M., Ukkusuri, S. V., Gonzalez, M. C. Spatiotemporal Patterns of Urban Human Mobility. *Journal of Statistical Physics*, 2013, Vol. 151, No. 1–2, pp. 304–318. [Electronic resource]: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/89404/Gonzalez_Spatiotemporal%20patterns.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Last accessed 27.04.2020.
8. Lyons, G. Getting smart about urban mobility – Aligning the paradigms of smart and sustainable. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, 2018, Vol. 115, pp. 4–14. DOI: [10.1016/j.tra.2016.12.001](https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.12.001).
9. Neirotti, P., De Marco, A., Cagliano, A. C., Mangano, G., Scorrano, F. Current trends in smart city initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 2014, Vol. 38, pp. 25–36. DOI: [10.1016/j.cities.2013.12.010](https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.12.010).
10. Batty, M., Axhausen, K., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., Portugali, Y. Smart cities of the future. *European Physical Journal: Special Topics*, 2014, Vol. 214, No. 1, pp. 481–518. DOI: [10.1140/epjst/e2012-01703-3](https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3).
11. Mangiaracina, R., Perego, A., Salvadori, G., Tumino, A. A comprehensive view of intelligent transport systems for urban smart mobility. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2017, Vol. 20, No. 1, pp. 39–52. [Electronic resource]: <https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1003931/309232/A%20comprehensive%20view%20of%20Intelligent%20Transport%20Systems%20%28ITS%29%20for%20urban%20Sm...pdf>. Last accessed 27.04.2020.
12. Zawieska, J., Pieriegud, J. Smart city as a tool for sustainable mobility and transport decarbonisation. *Transport Policy*, Elsevier, 2018, Vol. 63 (C), pp. 39–50. DOI: [10.1016/j.tranpol.2017.11.004](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.11.004).
13. Pangbourne, K., Stead, D., Mladenović, M., Milakis, D. The Case of Mobility as a Service: A Critical Reflection on Challenges for Urban Transport and Mobility Governance. Eds. Marsden, G. and Reardon, L. Governance of the Smart Mobility Transition, Emerald Publishing Limited, 2018, pp. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.1108/978-1-78754-317-120181003>.
14. Anthopoulos, L., Janssen, M., Weerakkody, V. Smart Service Portfolios: Do the Cities Follow Standards? Proceedings of the 25th International Conference Companion on World Wide Web, Montreal, Canada. New York: ACM Press, 2016, pp. 357–362. DOI: [10.1145/2872518.2888618](https://doi.org/10.1145/2872518.2888618).



BCM

54

*Почему вылетает щебень?
Обзор исследований
и собственные модели.*



**РАДИОСВЯЗЬ
НА ТРАНСПОРТЕ**

72

*Продолжение разработки
признанной идеи по
устранению шумов и помех.*

СПГ

84

*Впервые предложены
расчёты испаряемости СПГ
при транспортировке.*

HSR

63

*Why do crushed stones fly?
Review of research and
authors' models.*

**RADIO COMMUNICATION
FOR THE
TRANSPORT**

78

*Continued development of
recognised design to avoid
noise and interference.*

LNG

96

*The models to calculate
evaporation rate while
transporting LNG have been
suggested for the first time
ever.*





Физические механизмы подъёма балластных гранул при прохождении высокоскоростных поездов



Владимир БЕЛЬКОВ



Георгий ГОГРИЧАНИ

*Бельков Владимир Максимович – АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.
Гогричани Георгий Венедиктович – АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия*.*

В статье проанализированы механизмы вылета щебня при высокоскоростном движении. Целью работы является исследование и выявление основного механизма вылета щебня из балластной постели. Обосновано, что им является выдавливание частиц из верхнего слоя гранул и их подъём над щебёночной постелью в результате действия продольных и поперечных напряжений в балласте, а наиболее вероятным местом их вылета является

граница контакта шпал и верхнего слоя щебёночной постели.

Представлена физика этого процесса, состоящая в подъёме балласта турбулентными вихрями, «взвешивании» частиц щебня над постелью под действием вибрации, в соударении движущихся частиц и процессе выдавливания и вылета гранул балласта.

Показаны причины возникновения горизонтальных и поперечных напряжений в щебёночном балласте.

Ключевые слова: железная дорога, высокоскоростные поезда, подъём гранул, вылет щебня, горизонтальные продольные и поперечные напряжения, балластная постель, наледообразование в подвагонном пространстве.

*Информация об авторах:

Бельков Владимир Максимович – доктор физико-математических наук, научный консультант Научно-консультационного центра аспирантуры АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.

Гогричани Георгий Венедиктович – доктор технических наук, заведующий Научно-консультационным центром аспирантуры АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия, press@vniizht.ru.

Статья поступила в редакцию 23.01.2020, принята к публикации 02.07.2020.

For the English text of the article please see p. 63.

ВВЕДЕНИЕ

При классическом верхнем строении пути из щебня за счёт разнообразных воздействий, например, зимой, в результате падения крупных кусков льда, отдельные щебёночные камни могут выбрасываться вверх из балластной постели. Затем щебёночные частицы соударяются с находящимися под полом оборудованием транспортного средства и, как правило, с высокой скоростью отбрасываются вперед в направлении движения. После этого щебёночные камни могут вновь ударяться о балластную постель и вызывать выбросы других камней. Таким образом, может возникать вертикально поддерживаемая массивная «щебёночная лавина», которая приводит к сильному повреждению расположенных в подвагонном пространстве рельсового транспортного средства системных компонентов. Проблема вылета гранул щебня актуальна для всех высокоскоростных поездов там, где используется балластный путь.

В России при эксплуатации поездов «Сапсан» и «Ласточка» со скоростью движения 200 км/час и более в подвагонном пространстве и на внешней поверхности пути вблизи рельсов наблюдается подъём крупных и мелких гранул и пылеватых частиц балласта, которые «бомбардируют» подвагонное оборудование и электрокабели, приводят к порче амортизаторов и силовых кабелей. Пылеватые частицы повреждают стёкла окон, делают их поверхность менее прозрачной и пористой.

Эксплуатация высокоскоростных поездов (ВСП) зимой сопровождается образованием снежно-ледяных отложений в подвагонной части поезда. Осыпающиеся глыбы льда, соударяясь с рельсами и щебнем, частично разрушаются и разлетаются, повреждая объекты инфраструктуры, вызывают выбросы щебёночных гранул и значительные повреждения подвагонного оборудования.

Целью настоящей работы является исследование, и выявление основного механизма вылета щебня из балластной постели с использованием аналитических методов.

1. БАЛЛАСТ ПУТИ И ДЕГРАДАЦИЯ ЕГО ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

В России в соответствии с ГОСТ 7392-2002 для балластного слоя путей 1–3 классов применяется только щебень твёрдых пород

марки И20 с пределом прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии не менее 20 МПа. Щебёночный балласт, приготовленный из прочных магматических пород (граниты, габбро, диориты, сиениты (глубинные породы), диабазы, базальты (излившиеся породы)), является лучшим из современных балластных материалов, благодаря долговечности, высокой сопротивляемости осадкам шпал и их смещениям в горизонтальной плоскости, хорошим дренирующим, упругим и электроизоляционным свойствам щебёночной призмы.

По мере накопления засорителей балласта ухудшаются его дренирующие свойства [1]. В щебёночной балластной призме наиболее сильно засоряется щебень в верхней части шпальных ящиков, у боковых граней и торцов шпал, а также под подошвой, начиная от краёв шпал и далее к её середине. Для щебня наибольший допустимый процент засорения (содержание частиц мельче 25 мм) по массе составляет 30 %, из них мельче 0,1 мм — не более 5 %. В очищенном щебне содержание частиц размерами менее 20 мм не должно превышать 5 % от массы пробы.

В период производства ремонтных работ или при укладке пути и уплотнению балласта может быть достигнута предельная плотность щебня 0,33–0,34. Обычно она находится в пределах 0,36–0,40. По мере загрязнения щебня и роста пропущенного по пути тоннажа наступает период нарастания неравномерно распределённых по длине пути деформаций, возникающих из-за выпирания балласта из-под шпал, накапливания мелких фракций загрязнений в нижней и верхней частях слоя балласта, а также из-за выплесков. Уровень динамического воздействия на путь и земляное полотно от ВСП растёт прямо пропорционально квадрату их скорости и с учётом высокочастотной вибрации вызывает резкий рост остаточных деформаций, в том числе интенсивное дробление балластного слоя в пути и интенсивный износ подвижного состава.

Выполненные исследования прочностных свойств балластного материала [2] показали, что засорение щебня песками и пылеватыми частицами приводит к снижению прочностных характеристик как при действии статических, так и вибрационных нагрузок. Величина удельного сцепления снижается при статической нагрузке





Рис. 1. Повреждения корпуса вагона от ударов частиц щебня [6].

на 25 %, при вибрационной — на 29 %. Снижение угла внутреннего трения в рассматриваемом диапазоне засорения щебня песками при действии статической и вибрационной нагрузки составляет 12 и 19 % соответственно. Вибрации, как широко известно, используются в технологии уплотнения и транспортирования сыпучих материалов, благодаря значительному снижению структурной вязкости дисперсных материалов. По заключению, сделанному в работах [3–5], вибрации вызывают расстройство нижнего строения пути и более интенсивное накопление в нём остаточных деформаций, а кроме того, снижают прочностные характеристики щебня.

Таким образом, вибрация способствует сепарации гранул щебня по размерам, заполнению порового пространства слоя щебня пылевидными частицами от перевозимых грузов, мелкой фракцией менее 1 мм при истирании балласта, рельсов и колёс, тормозных колодок и аэрозоля, при использовании песка для улучшения сцепления колёс и рельсов; приводит к удержанию осадков и талой влаги. Биологическое засорение балластного и песочного слоя корневыми системами травяной растительности, которые быстро прорастают вглубь, устремляясь вниз к воде (явление геотропизма), обуславливают появление набухания корней и расклинивающего давления 10–15 МПа [1]. Гранулы щебня, благодаря расклинивающему давлению растущих корней, раздвигаются, увеличивается порозность до 60–70 %, снижается прочность сцепления щебёночных гранул. При отмирании корней весной их место занимают гумус и вода. Из-за загрязнения нефтепродуктами из-за проливов на железнодорожное полотно и остатками смазки от лубрикации колёс и рельсов сгнившие остатки растений начинают обладать смазывающим действием и могут понизить структурную вязкость сыпучих материалов в 10 ... 30 раз [1].

2. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА БАЛЛАСТ

Спектр аэродинамических проблем, возникающих при движении ВСП со скоростями более 250 км/час, чрезвычайно разнообразен. Частицы или гранулы балласта, как считается, под действием турбулентных вихрей вылетают из балластной постели и приводят к повреждению подвижного состава, путевой инфраструктуры и придорожных сооружений в полосе отвода железной дороги [6]. Это явление является серьёзной угрозой для безопасности эксплуатации поезда и пассажиров (рис. 1 [6]).

По данным американских исследователей [7], скорость ВСП 260 км/ч может быть пороговым значением для подъёма и полёта гранул балласта, а при снежных заносах и сильном дожде подъём гранул балласта может начаться при более низких скоростях движения, что связано с понижением структурной вязкости щебня. В России подъём щебёночных гранул, по данным технического отдела Октябрьской железной дороги, наблюдается, начиная со скорости 210 км/час.

Проблема вылета гранул щебня из балластной постели обычно решается методом расчёта рисков [7], теоретически с экспериментальной проверкой и компьютерным моделированием [8; 9]. С помощью экспертных оценок рассчитывается последовательный риск наступления события вылета щебня и бомбардировки им кузова или инфраструктурного объекта с расчётом последующих финансовых потерь. Характер структуры потока воздуха вокруг поезда часто вообще не учитывается. В докладе [7] приводятся пять факторов возникновения подъёма щебня: эксплуатационная скорость, конструкция поезда и соответственно обтекание и турбулизация воздушного потока, величина динамической нагрузки, качество обслуживания пути и сильный боковой ветер. Подъём гранул балласта [7] также может наблюдаться и при меньшей скорости дви-

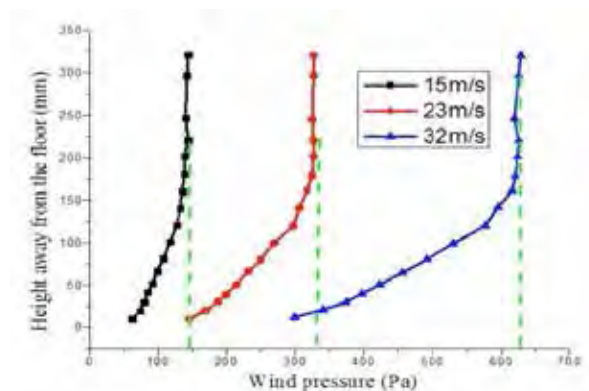


Рис. 2. Зависимость подъёма частиц от их размера и скорости потока и давления в нём [9].

жения поезда в тоннелях. Накопление снега вдоль пути, прохождение ВСП во встречном направлении также способствует подъёму гранул балласта. Было отмечено, что в тоннелях, где вывешены знаки ограничения в скорости «не более 140 км/час», высокоскоростные поезда также имели значительный ущерб от ударов гранул балласта.

В работе [8] проведено оптическое детектирование вылета щебня в аэродинамической трубе. По результатам лабораторных исследований разработана аэродинамическая модель для расчёта вылета гранул щебня, а также проведены динамические расчёты инерционной массы щебня, определены количество «подвижного» щебня на щебёночной постели для отдельных гранул щебня и вероятность попадания щебня в поезд и его повреждения. Кроме того, были рассчитаны аэродинамические силы, скорость начала возникновения турбулентных потоков от тележек и других конструкций вагона.

В работе [9] при моделировании учтены аэродинамические характеристики гранул щебня: их распределение по размерам, по площади поверхности, массе и форме. С помощью программного обеспечения CFD проведено моделирование поведения отдельных балластных частиц в воздушном потоке аэродинамической трубы и экспериментально найдены зависимости подъёма частиц от их размера и скорости потока и давления в нём, кривизны площадки, где были размещены гранулы щебня (рис. 2). В работе также приведена минимальная скорость ветра, при которой начинаются небольшие перемещения отдельных гранул щебня, — 8 м/с. При скорости ветра 25 м/с большинство гранул начинает дискретно перемещаться.

В режиме эксплуатации в летний период, как считают авторы работ [9; 10], скорости ВСП $V > 340$ км/час разумны только при условии безбалластного пути. Для скоростей поезда $V > 280$ км/ч требуется особая форма и большие размеры щебёночных гранул на поверхности постели. Эксплуатация ВСП в зимний период, когда путь покрывается льдом и снегом, при скорости движения $V_{\max} > 250$ км/ч должна проходить только на безбалластном пути. Компания SNCF рекомендует скорость движения ВСП в диапазоне критических температур и начала снегопада не выше 200 км/час. Для Франции такие условия наблюдаются в течение порядка 20 дней в году (для России — 90 дней).

В сообщении [10] впервые описан эффект изъязвления передней тележки ВСП из-за «бомбардировки» частицами щебня и продуктами его измельчения. В рамках этого исследования были измерены с помощью тензодатчиков вибрации в балласте, создаваемые ВСП. Как показал анализ, напряжения в щебёночной постели не связаны с аэродинамическими факторами. Поэтому авторы предположили, что механические вибрации земляного полотна способствуют «подвешиванию» частиц, и в сочетании с вертикальными турбулентными потоками воздуха возникает «облако» с наибольшей концентрацией частиц перед первым вагоном и с пониженной концентрацией у хвостового. Эти частицы, соударяясь с корпусом ВСП, дробятся и разлетаются по обе стороны поезда. Для обоснования предложенного вибрационного механизма вылета щебня, авторы ссылаются на инспекционные осмотры повреждений ВСП и свидетельства ремонтников. Для более детальной проверки



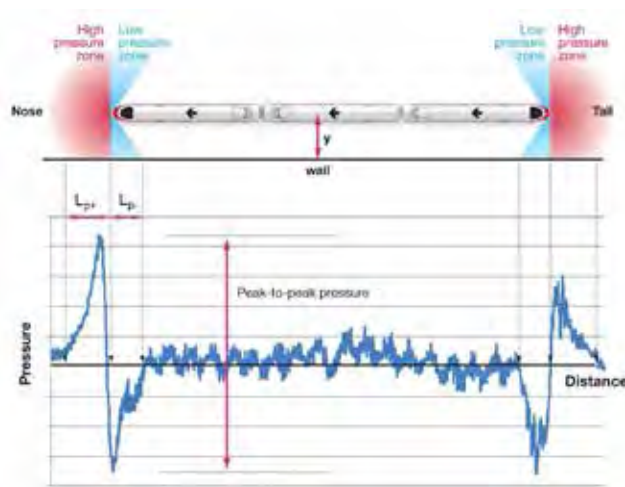


Рис. 3. Зоны высокого и низкого давления, возникающие при движении ВСП [10].

этой теории, по мнению авторов, требуются дополнительные исследования. На рис. 3, взятом из отчёта [10], схематично показана структура турбулентного потока, возникающая в носовой и хвостовой зонах ВСП. Интенсивность цвета в зонах соответствует большему давлению. Передняя область или фронт высокого давления, так называемый Slipstream, или скользящий поток, в виде «языка» может поднимать частицы щебня. Давления в указанных областях пульсируют во времени и для различных ВСП могут заметно отличаться.

В работе [11] экспериментально исследованы скорости и давления в аэродинамическом поле подвагонного пространства с помощью трубок Пито и тензодатчиков. Вблизи балластной постели средняя скорость составляет всего 1/3 от скорости поезда, в то же время стандартное отклонение колебаний скорости потока воздуха составляет порядка 1/10 скорости поезда. Средняя скорость потока воздуха изменяется под влиянием деталей в подвагонном пространстве и их формы, включая оси тележек, переходы между вагонами и вспомогательное оборудование. Вертикальный профиль флуктуаций скорости приблизительно равномерный. У щебёночной постели скорость потока составляет 0,06 скорости поезда. Высокая скорость видеозаписи движения балластных частиц помогла прояснить некоторые механизмы, определяющие их перемещения. Процесс перемещения гранул щебня включает в себя стадию начала движения или трогания с места отдельных небольших

гранул. Затем начинается продольная миграция по «шероховатой» поверхности балластной постели небольших гранул и соударения с соседними частицами, имеющими большие размеры.

Движущей силой процесса, по нашему мнению, могли бы быть знакопеременные аэродинамические силы турбулентных вихрей, стабилизированных пылеватыми минеральными частицами, снегом (в зимний период) и засорителями балласта и частицами льда размерами 1 ... 10 мм.

Авторы [11] считают, что контактные взаимодействия движущихся гранул с щебёночными частицами больших размеров играют центральную роль. Когда малые частицы достигают достаточного продольного импульса, контактные взаимодействия могут привести к тому, что большая гранула набирает достаточный горизонтальный импульс, чтобы при соударении с соседней произошёл подъём частицы в воздух.

Сформированный скользящий поток высокого давления перед ВСП (рис. 3 [10]) подхватывает вылетевшие гранулы и поднимает их на большую высоту. Вертикальные вибрации земляного полотна способствуют снижению структурной вязкости в верхнем слое щебня, облегчая процесс подъёма больших гранул щебня. Процитированные в данном разделе результаты научно-исследовательских работ и выводы, сделанные в этих работах, особенно на основании модельных экспериментов с малым числом гранул и без учёта вибрационного воздействия, а также численные эксперименты на

основе лабораторных экспериментов могут неадекватно описывать процесс вылета гранул щебня.

3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЛЕТА ЩЕБЁНОЧНЫХ ГРАНУЛ ИЗ БАЛЛАСТНОЙ ПОСТЕЛИ

На основании рассмотрения научных публикаций [6–11] можно систематизировать описанные в них возможные механизмы вылета балластных частиц:

1. Подъём балластных гранул турбулентными вихрями [6–9], которые, по мнению авторов [6; 7], возникают при высокой скорости движения поезда. Вылету щебня способствуют конструкционные недостатки вагонов, ухудшающие обтекание и приводящие к возрастанию турбулизации потока воздуха. Плохое состояние верхнего слоя щебёночной призмы и малые размеры гранул на её поверхности; сильный боковой ветер; движение поезда в тоннелях, в которых турбулизация потока воздуха наступает при значительно меньших скоростях; прохождение встречного ВСП и накопления снега вдоль путей — вот причины, по мнению авторов, которые увеличивают подъём балластных гранул.

2. «Подвешивание» частиц щебня над постелью под действием механических вибраций земляного полотна [10], которые способствуют в сочетании с вертикальными турбулентными потоками воздуха и фронтом высокого давления впереди ВСП подъёму частиц щебня.

3. Контактные соударения движущихся малых частиц с гранулами больших размеров и накопление достаточного горизонтального импульса таким образом, чтобы при соударении с соседней частицей произошёл подъём большой гранулы в воздух [11].

Для реализации первого механизма — подъёма балластных гранул турбулентными вихрями требуется высокая скорость движения ВСП, около 300 км/час. Неудовлетворительная аэродинамика подвагонной части ВСП приведёт к снижению скорости вблизи балластной постели ниже 1/3 скорости поезда [11]. Загрязнение верхнего слоя призмы только улучшит обтекание из-за уменьшения «шероховатости» балластной постели и снизит концентрацию турбулентных трубок. Сильный боковой ветер только смещает фронт высокого давления и граничный поток вокруг ВСП.

Турбулентные вихри в воздухе, по нашим исследованиям [12], представляют собой «трубки» диаметром 30 ... 40 мм с невысоким разряжением внутри. Для набора мощности «торнадо» турбулентные вихри должны набрать значительную массу минеральной пыли, но при скорости движения ВСП этот процесс не успеет осуществиться. Следовательно, первый механизм вылета гранул щебня маловероятен.

Оценим возможность реализации второго механизма — «подвешивания» частиц щебня над постелью под действием вертикальных механических вибраций земляного полотна. Вертикальная составляющая колебаний балластного слоя из гранитного щебня имеет сложный характер с резкими всплесками записи и значительными различиями в колебательном процессе при проходе вагонов [13].

Первая гармоника — низкочастотная, лежит в диапазоне от 1,13 (55 км/ч) до 1,48 Гц (125 км/ч) и имеет амплитуду 130 ... 450 мкм соответственно в сечении у подошвы торца шпал. При скорости движения ВСП 250 км/ч первая гармоника составит ~3 Гц, а амплитуда ~1 ... 1,2 мм. Период колебаний низкочастотной гармоники практически соответствует времени, необходимому для прохода экипажем расстояния между крайними осями тележки.

Вторая гармоника — среднечастотная, с частотой 3 ... 13,5 Гц и амплитудой 30 ... 220 мкм, зависит от скорости поезда и возникает при прямом силовом воздействии отдельных осей вагонов на рельсы и балласт. При скорости движения ВСП 250 км/ч вторая гармоника составит ~27 Гц, а амплитуда ~0,4 мм.

Третья высокочастотная гармоника амплитудой от 0 до 21 мкм при скорости движения вагонов от 55 до 125 км/ч находится в частотном диапазоне от 125 до 250 Гц. Высокочастотная вертикальная составляющая для скорости составит примерно 500 Гц и из-за инерционности щебёночной призмы практически полностью поглощается.

Максимальная скорость, получаемая частицей при гармонических колебаниях балласта, равна $v_{\max} = A\omega$, где A — амплитуда и ω — круговая частота компоненты вибрации. Для гранулы размером 60 мм кинетическая энергия будет равна $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ Дж. При упругом соударении частиц верхнего и ниж-



него слоёв без учёта трения частицы о соседние гранулы потенциальная энергия верхней частицы увеличится, и максимальная высота подъёма составит $\sim 0,5$ мкм. С учётом соударения с тремя соседними частицами в нижнем слое высота подъёма не превысит ~ 1 мкм.

Для среднечастотных колебаний и той же гранулы высота подъёма будет $\sim 0,23$ мм, а при соударении с тремя нижележащими соседними частицами составит $\sim 0,5$ мм. Такого подъёма гранулы от щебёночной постели, вблизи которой скорость потока, как показано в работе [11], близка к 15 км/ч, недостаточно. Кроме того, турбулентные вихри у стены движутся в противоположном направлении. Поэтому захват лёгких гранул фронтом высокого давления также маловероятен.

Третий механизм — контактные взаимодействия движущихся малых частиц с гранулами больших размеров для подъёма над щебёночной постелью также маловероятен, так как гранулы плотно упакованы даже в верхнем слое и не могут независимо двигаться под действием воздушного потока, и, принимая во внимание его низкую скорость на границе раздела «воздушный поток—щебёночная постель», получаемые частицами импульсы из-за соударений с соседями будут рассеиваться в поверхностном слое в объём щебня.

4. НОВЫЙ МЕХАНИЗМ — ВЫДАВЛИВАНИЕ ГРАНУЛ ИЗ БАЛЛАСТНОЙ ПОСТЕЛИ

Наиболее вероятным механизмом вылета щебня, по нашему мнению, является выдавливание и выброс гранул из верхнего слоя щебёночной постели при возникновении продольных и поперечных горизонтальных и отражённых от внутренних слоёв щебёночной призмы вертикальных напряжений в щебёночном балласте. Горизонтальные продольные и поперечные напряжения в щебёночном балласте между шпалами возникают при уgone рельсов в результате торможения ВСП при больших скоростях движения и температурных градиентах вдоль пути и концентрируются вблизи боковых поверхностей шпал. Кручение шпал при наезде на них колёс также способствует выдавливанию щебёночных гранул. Продольные силы возникают также при проскальзывании колёс

по рельсам в кривых и рекуперативном торможении поездов.

Для моторного вагона, имеющего две тормозные оси, коэффициента трения колёс о рельсы 0,24, нагрузки от колёсной пары на рельсы 80 кН, доли сцепного веса, используемого для торможения, равной 0,5, сила угона от торможения будет равна $F_y = 2/2 \cdot 0,24 \cdot 0,5 \cdot 80 = 9,6$ кН. Примем коэффициент передачи силы угона на шпалу, равным 40 % [14; 15], тогда сила, действующая со стороны шпалы на верхний слой балласта, будет равна 3,8 кН. Наибольшие напряжения отмечаются вблизи шпал под рельсами, поэтому для геометрической площади боковой поверхности шпалы, равной $S_6 = 0,154 \cdot 2,7 = 0,416$ м², истинная площадь контакта гранул поверхностного слоя гранул будет в два раза меньше, то есть 0,208 м². Доля площади подошвы шпалы β_r с гранулами под нагрузкой 80 кН, контактирующей со щебёночными гранулами, составляет $\beta_r = 8$ % [16]. Так как фактическая площадь упругого контакта прямо пропорциональна нормальной нагрузке [17], то доля площади боковой поверхности шпалы под нагрузкой силы угона 3,8 кН с поверхностными гранулами балласта будет в двадцать раз меньше (0,4 %). С боковой поверхностью шпалы контактирует приблизительно $n \approx 50$ гранул, поэтому на границу контакта каждой гранулы со шпалой будет действовать напряжение, вектор которого направлен нормально к боковой поверхности шпалы:

$$\tau_r = (0,4 \cdot F_y) / (\beta_r \cdot S_6 \cdot n) = (0,4 \cdot 9,6 \cdot 10^3) / (0,004 \cdot 0,208 \cdot 50) \approx 91,3 \text{ кПа.} \quad (1)$$

Угол наклона боковой поверхности шпалы к горизонту равен $\alpha \approx 72^\circ$. Горизонтальные реакции касающейся шпалы гранулы будут скомпенсированы двумя соседними, находящимися в одной плоскости с основной гранулой (наихудший случай). Если соседние гранулы располагаются несколько ниже основной гранулы, например, на 30° ниже, то появится дополнительное вертикальное напряжение:

$$\tau_{\text{верт.}} \approx 2\tau_r \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \cdot \sin 30^\circ = 0,76\tau_r. \quad (2)$$

Вертикальный импульс силы угона, действующий на ближайшую к шпале округлую, размером 60 мм и весом 0,07 кг гранулу, будет равен:

$$\begin{aligned} \tau_r \cdot S_k \cdot \Delta t \cdot [\cos \alpha + 0,76 + 2\cos 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \cdot \sin 30^\circ] = \\ 1,81\tau_r \cdot S_k \cdot \Delta t = m_r \cdot V_r, \end{aligned} \quad (3)$$

где S_k — площадь контакта одной гранулы со шпалой, равна $\beta_r \cdot S_0/n = 1,7 \cdot 10^{-4}$;

$\alpha = 72^\circ$ — угол наклона контактной площадки к поверхности щебёночной постели; время действия импульса равно $\Delta t = l/V_n$; l — половина расстояния между шпалами (~ 273 мм);

V_n — скорость поезда (250 км/ч).

Коэффициент трения сухого бетона по сухому бетону составляет 0,7, а для частично загрязнённого нефтепродуктами и покрытого обводнёнными пылеватыми частицами коэффициент трения в два–три раза ниже (0,35). Сила трения, действующая вдоль боковой поверхности шпалы и с соседними гранулами, равна:

$$F_{тр} = k_{тр} \cdot \tau_r \cdot S_k \cdot (\cos 72^\circ + 2 \cos 30^\circ) = 2,1 k_{тр} \cdot \tau_r \cdot S_k. \quad (4)$$

Добавим в левую часть уравнения (3) вертикальную отрицательную проекцию импульса силы трения $F_{тр} \Delta t$, и, решив уравнение относительно начальной скорости вылетевшей из постели частицы щебня, в окончательном виде получим:

$$V_r = \frac{(1,81 - 0,73)l \cdot S_k \tau_r}{m_r \cdot V_n} = \frac{1,08 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot 0,273 \cdot 91,3 \cdot 10^3}{0,07 \cdot 69,4} \approx 0,94 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Для гранулы размером 25 мм скорость вылета равна 2,2 м/с. При выдавливании гранул щебня из балластной постели мы не учли импульс силы, направленный вниз, при наезде колеса на шпалу и обратную упругую реакцию земляного полотна. В разделе 3 настоящей статьи при оценке возможности реализации второго механизма «подвешивание» частиц щебня в сечении у подошвы торца шпал осуществляется энергией второй гармоники с частотой ~ 27 Гц и амплитудой $\sim 0,23$ мм. Средняя вертикальная гармоническая сила, прилагаемая к грануле вблизи шпал в течение полупериода для первой гармоники, будет равна:

$$\bar{F}_{\text{гарм1}} = \frac{m_r \cdot A \omega^2}{\pi} \int_0^\pi \sin \omega t \, dt = \frac{2 A m_r \omega}{\pi} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ Н}. \quad (6)$$

Для второй гармоники $F_{\text{гарм2}} = 1,24$ кН. Импульс силы для полуволны второй гармоники равен $5,5 \cdot 10^{-2}$ Н·с, а дополнительная скорость гранулы размером 60 мм составит 0,8 м/с, для гранулы размером 25 мм — 0,34 м/с.

Угол поворота шпалы не входит в нормируемые параметры железнодорожной колеи,

рассчитаем его относительно скрепления для равномерного прогиба рельса на 3 мм в средней его части между шпалами. Для соотношения рельсового плеча (546:2 мм) и высоты шпалы (183 мм) угол α равен $6,4^\circ$. Но, поскольку мы не учли нелинейный прогиб рельса, примем угол поворота $\alpha \approx 6^\circ$. С учётом верчения шпалы на 6° уравнение (3) примет вид:

$$\tau_r \cdot S_k \cdot \Delta t \cdot \cos(\alpha - 6^\circ) = m_r \cdot V_r, \quad (7)$$

и скорость, найденная из уравнения (4), увеличится в 1,1 и составит 1,03 м/с плюс 0,8 м/с.

Из равенства кинетической и потенциальной энергии щебёночной частицы размером 60 мм находим высоту подъёма самой крупной гранулы щебня $\sim 0,17$ м.

Скорость распространения волны напряжений сжатия в стали при уgone рельсов составляет ~ 10 км/с, поэтому воздушный фронт высокого давления способен поднять вылетающие гранулы на большую высоту, опасную для ВСП и инфраструктуры. Гораздо большие значения имеют продольные силы в рельсах от изменения температуры и при экстренном торможении. Например, для новых рельсов типов Р65 сила угона, действующая на шпалу при повышении температуры на 1°C , равна соответственно 20,7 кН, и подъём частиц увеличится в 2,2 раза.

По мере истирания щебёночного слоя округлых частиц будет всё больше, порозность поверхностного слоя выше, и, следовательно, меньше трение, и чаще будет происходить вылет гранул щебня. Наиболее вероятными местами вылета гранул щебня являются перегоны вблизи населённых пунктов, где происходят изменения режимов движения (набор скорости движения и торможение), а также обледенение поверхности частиц щебня. Поднявшиеся лёгкие гранулы, соударяясь с подвагонным оборудованием и отлетая с высокой скоростью, могут вызывать лавинный процесс подъёма щебёночных частиц.

ВЫВОДЫ

1. На основании оценочных расчётов показано, что основным механизмом вылета щебня при высокоскоростном движении является выдавливание частиц из верхнего слоя гранул и их подъём над щебёночной постелью в результате действия продольных и поперечных напряжений в балласте. Наи-



более вероятным местом вылета щебёночных частиц является граница контакта шпал и верхних слоёв щебёночной постели.

2. Физические механизмы — подъём балласта турбулентными вихрями, «подвешивание» частиц щебня над постелью под действием механических вибраций земляного полотна, контактные соударения движущихся малых частиц с гранулами больших размеров — способствуют увеличению пористости щебёночного слоя, снижению структурной вязкости, изменению ориентации частиц и, следовательно, облегчают выдавливание и вылет гранул балласта.

3. Образующиеся в подвагонном пространстве ВСП при определённых погодных условиях глыбы льда осыпаются, соударяясь с рельсами и щебнем и разрушаясь, и также являются механизмом вылета щебёночных частиц.

4. В работе сформулирован новый механизм подъёма гранул над щебёночной постелью в результате действия продольных и поперечных напряжений в поверхностном слое балласта. Для исключения вылета щебёночных гранул и предотвращения ущерба ВСП и инфраструктуре могут быть разработаны комплексные способы резкого снижения продольных и поперечных напряжений в поверхностном слое балласта и наледообразования в подвагонном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельков В. М., Антипов Б. В. Физико-химические основы устойчивости пути // Путь и путевое хозяйство. — 2013. — Вып. 12. — С. 21–24.
2. Колос А. Ф., Турсунов Х. И., Николайтис Д. С. Исследование прочностных свойств балластного материала, засорённого барханными песками // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2012. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-prochnostnyh-svoystv-ballastnogo-materiala-zasorennymi-barhannymi-peskami/pdf>. Доступ 14.05.2020.
3. Каменский В. Б. Совершенствование системы ведения путевого хозяйства в современных условиях работы железных дорог // Автореф. канд. тех. наук. — М., 2011. — 23 с.
4. Пейч Ю. Л. Взаимодействие элементов пути в условиях засорения и увлажнения // Автореф. док. тех. наук. — М., 2011. — 23 с.
5. Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. — М.: Из-во МГУ, 1977. — 372 с.
6. Derkowski, P., Clark, S., Sturt, R., Keylin, A., Baker, C., Vardy, A., Wilson, N. High-Speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report. U.S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration, Office of Research, Development, and Technology, Washington, DC20590. Report Number: DOT/FRA/ORD-15/40. December 2015, 258 p. [Электронный ресурс]: <https://railroads.dot.gov/>

elibrary/high-speed-rail-aerodynamic-assessment-and-mitigation-report. Доступ 14.05.2020.

7. Saat, M. R., Bedini-Jacobini, F., Tutumluer, E., Barkan, C. P. L. Identification of High-Speed Rail Ballast Flight Risk Factors and Risk Mitigation Strategies, Final Report. Federal Railroad Administration, Washington, DC, Report Number: DOT/FRA/ORD-15/03. 2015, 76 p. [Электронный ресурс]: https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/pdf-archive/TR_Identification-of-Ballast-Flight-Risk_final.pdf. Доступ 14.05.2020.

8. Baker, C. J. A review of train aerodynamics. Part 1 — Fundamentals; Part 2 — Applications. The Aeronautical Journal, 2014, Vol. 118, Iss. 1201, 1202. [Электронный ресурс]: <https://core.ac.uk/download/pdf/185479708.pdf>; <https://core.ac.uk/download/pdf/185479709.pdf>. Доступ 14.05.2020.

9. Jing, G., Liu, G. X., Lin, J., Martinez, J., Yin, C. T. Aerodynamic Characteristics of Individual Ballast Particle by Wind Tunnel Tests. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2014, Vol. 7, Iss. 2, pp. 137–142. [Электронный ресурс]: <http://www.jestr.org/downloads/Volume7Issue2/fulltext217214.pdf>. Доступ 14.05.2020. DOI: 10.25103/jestr.072.21.

10. Quinn, A. D., Hayward, M. Full-scale aerodynamic measurements underneath a high speed train. BBAA 6th International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. Milano, Italy, July, 20–24, 2008. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/237112260_full-scale_aerodynamic_measurements_underneath_a_high_speed_train/link/554898b80cf2b0cf7aced5ff/download. Доступ 14.05.2020.

11. Lazaro, B. J., Gonzalez, E., Rodriguez, Manuel; Rodriguez, Miguel, Osma, S., Iglesias, J. Characterization and Modeling of Flying Ballast Phenomena in High-speed Train Lines. 9th World Congress Railway Research, May 22–24, 2011. [Электронный ресурс]: Challenge E: Bringing the territories closer together at higher speeds. http://www.railway-research.org/IMG/pdf/e4_lazaro_benigno.pdf. Доступ 14.05.2020.

12. Бельков В. М., Журавлева М. А. Моделирование загрязнения железнодорожного полотна и технической полосы пылеватыми частицами // Вестник ВНИИЖТ. — 2015. — № 2. — С. 9–14. [Электронный ресурс]: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/article/viewFile/22/23>. Доступ 14.05.2020.

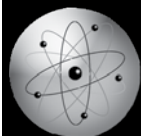
13. Турсунов Х. И. Исследование колебательного процесса в балластной призме железнодорожного пути, засорённой барханными песками // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». — 2012. — № 3. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kolebatelnogo-protsessa-v-ballastnoy-prizme-zheleznodorozhnogo-puti-zasorennymi-barhannymi-peskami/pdf>. Доступ 14.05.2020.

14. ГОСТ Р 55050-2012 Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний (с Изменением № 1). [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200096113>. Доступ 14.05.2020.

15. Эффективные подпольные и напольные прокладки из материалов SYLOMER и SYLODYN. ООО «Акустические материалы и технологии», Киев. [Электронный ресурс]: <http://www.acoustic.ua/articles/113>. Доступ 14.05.2020.

16. Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении: Монография / Под ред. А. М. Бржезовского. — М.: РАС, 2019. — 152 с.

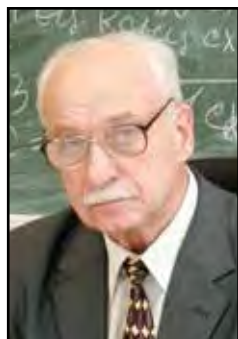
17. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. — М.: Физматлит, 2012. — 348 с.



Physical Mechanisms of Ballast Granules Flying during Passage of High-Speed Trains



Vladimir M. BELKOV



Georgy V. GOGRICHIANI

*Belkov, Vladimir M., JSC VNIIZhT, Moscow, Russia.
Gogrichiani, Georgy V., JSC VNIIZhT, Moscow,
Russia*.*

ABSTRACT

The article analyzes the mechanisms of crushed stone flying on high-speed railways. The objective of the work was to study and identify main mechanisms entailing flight of crushed stone from the ballast bed. It is substantiated that the main mechanism consists in squeezing of crushed stone particles from the upper layer of granules and their rise above the crushed stone bed following the action of longitudinal and transverse stresses in ballast, and that the most probable places

of ejection of crushed stone particles is the border of contact between sleepers and the upper layer of the crushed stone bed.

The physics of this process is presented, which consists in lifting ballast by turbulent vortices, suspension of crushed stone particles over the bed under the influence of vibration, in collision of moving particles and the process of squeezing and ejection of ballast granules. The reasons for the occurrence of horizontal and lateral stresses in crushed stone ballast are shown.

Keywords: railway, high speed trains, lifting of granules, ejection of crushed stone, flying of crushed stone, horizontal longitudinal and transverse stresses, ballast bed, ice formation in the undercar space.

*Information about the authors:

Belkov, Vladimir M. – D.Sc. (Physics and Mathematics), Scientific Consultant of the Scientific and Consulting Center for Ph.D. studies of JSC Rail Research Institute (JSC VNIIZhT), Moscow, Russia.
Gogrichiani, Georgy V. – D.Sc. (Eng), Head of the Scientific and Consulting Center for Ph.D. studies of JSC Rail Research Institute (JSC VNIIZhT), Moscow, Russia, press@vniizht.ru.

Article received 23.01.2020, accepted 02.07.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 54.

Background. Once the classic track superstructure is made of crushed stone, individual crushed stones can be ejected upwards from the ballast bed due to various influences, for example, falling of large pieces of ice in winter. The crushed stone particles then collide with the equipment situated under vehicle's floor and are usually thrown forward at high speed in the direction of travel. Thereafter, the crushed stone can hit the ballast bed again and cause ejection of other stones. Thus, a vertically supported massive «crushed stone avalanche» can occur, which can severely damage the system components located in the undercar space of a rail vehicle. The problem of ejection of crushed stone granules is relevant for all high-speed trains there where the ballast track is used.

In Russia when operating Sapsan and Lastochka trains at a speed of 200 km/h and more a flying of large and small granules and dusty ballast particles can be observed in the undercar space and on the outer surface of the track near rails. Those granules and particles «bombard» the undercar equipment and electrical cables, cause damage to shock absorbers and power cables. Dusty particles damage glass windows, making their surface porous and less transparent.

The operation of high-speed trains (HST) in winter is accompanied by formation of snow-ice deposits in the undercar space of the train. Blocks of ice, when crumbling collide with rails and crushed stone, partially collapse and scatter, damaging infrastructure facilities, causing ejection of crushed stone granules and significant damage to undercar equipment.

The *objective* of this work is to study and identify the main mechanism entailing flight of crushed stone from the ballast bed using analytical *methods*.

1. Track ballast and degradation of its strength properties

In Russia in accordance with GOST [State Standard] 7392–2002, only hard rock crushed stone of grade 120 with a compressive strength in a water-saturated state of at least 20 MPa is used for the ballast layer of tracks of 1–3 classes. Crushed stone ballast, made from solid igneous rocks (granites, gabbro, diorites, syenites (deep rocks), diabase, basalts (erupted rocks)) is the best modern ballast material due to its durability, high resistance to settlement of sleepers and

their displacement in the horizontal plane, good drainage, and possibility to provide crushed stone prism with elastic and electrical insulating properties.

With accumulation of ballast impurities, its drainage properties deteriorate [1]. In the crushed stone ballast prism, crushed stone is most heavily contaminated in the upper part of sleeper cribs, at the side edges and ends of sleepers, as well as under the sole, starting from the edges of sleepers and further to the middle. For crushed stone, the maximum permissible percentage of clogging (content of particles finer than 25 mm) by weight is 30 %, of which not more than 5 % can be less than 0,1 mm. The contents particles less than 20 mm in size should not exceed 5 % of the sample mass for cleaned crushed stone.

During maintenance works, laying of track or compaction of ballast, the maximum density of crushed stone of 0,33–0,34 should be reached. Usually, it is in the range of 0,36–0,40. As crushed stone becomes dirty and the total tonnage transported along the track grows, there comes a period of increasing deformations unevenly distributed along the length of the track, arising from bulging of ballast from under sleepers, accumulation of fine fractions of contaminating agents in lower and upper parts of the ballast layer, and due to splashes. The level of dynamic impact on the track and roadbed from HST grows in direct proportion to the square of their speed and, considering high-frequency vibration, causes a sharp increase in residual deformations, including intensive crushing of the ballast layer on the track and intensive wear of rolling stock.

The performed studies on strength properties of ballast material [2] showed that clogging of crushed stone with sands and dusty particles leads to a decrease in strength characteristics under the action of both static and vibration loads. The value of specific adhesion decreases under static load by 25 %, under vibration load by 29 %. The decrease in the angle of internal friction in the considered range of clogging of crushed stone by sands under the action of static and vibration loads is 12 and 19 %, respectively. Vibrations, as is widely known, are used in the technology of compaction and transportation of bulk materials, due to a significant decrease in structural viscosity of dispersed materials. According to the conclusion in works [3–5],



Pic. 1. Damage to the car body from impacts of crushed stone particles [6].

vibrations cause deterioration of the lower structure of the track, more intensive accumulation of residual deformations in it, and, in addition, reduce strength characteristics of crushed stone.

Thus, vibration contributes to the separation of crushed stone granules by size, to filling the pore space of the crushed stone layer with dust particles from the transported goods and by fine fractions of less than 1 mm when ballast, rails and wheels, brake shoes and aerosol are abraded, as well as when sand is used to improve adhesion of wheels and rails; leads to retention of precipitation and melt moisture. Biological clogging of the ballast and sandy layer by root systems of herbal vegetation, which quickly grow inward, rushing down to water (the phenomenon of geotropism), causes swelling of roots and a wedging pressure of 10–15 MPa [1]. Crushed stone granules, due to wedging pressure of growing roots, move apart, porosity increases to 60–70 %, the adhesion strength of crushed stone granules decreases. When the roots die off in spring, humus and water take their place. Due to oil pollution caused by spills on the railway bed or by grease residues from lubrication of wheels and rails, decayed plant residues begin to have a lubricating effect and can reduce structural viscosity of bulk materials by 10 ... 30 times [1].

2. Aerodynamic effect on ballast

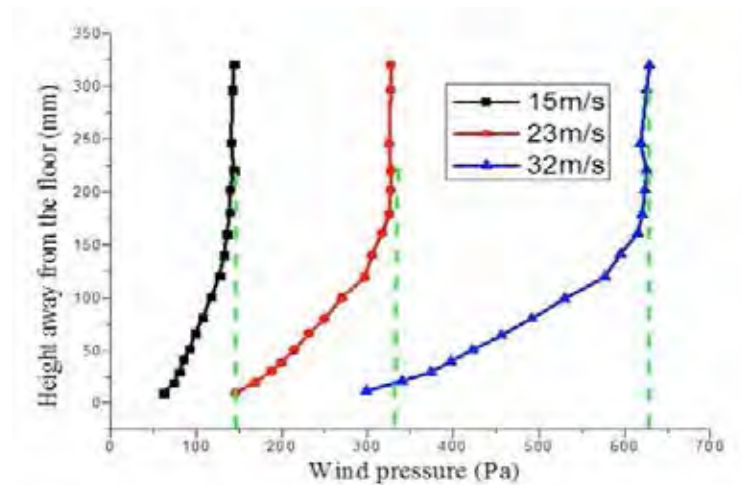
The spectrum of aerodynamic problems arising when HST moves at speeds over 250 km/h is extremely diverse. Ballast particles or granules are believed to fly from the ballast bed under the action of turbulent vortices and damage rolling stock, track infrastructure and roadside structures in the railway right-of-

way [6]. This phenomenon is a serious threat to safety of train and passenger operation (Pic. 1 [6]).

According to the data of American researchers [7], HST speed of 260 km/h can be a threshold value for rise and flight of ballast granules, and in case of snow drifts and heavy rain, the ballast granules can begin to rise at lower speeds, which is associated with a decrease in structural viscosity of crushed stone. In Russia, rise of crushed stone granules, according to the technical department of Oktyabrskaya railway, is observed starting at a speed of 210 km/h.

The problem of crushed stone granules flight from the ballast bed is usually solved by the method of theoretically calculating risks [7] followed by experimental verification and computer simulation [8; 9]. Expert assessments help to evaluate risk sequence of occurrence of the event of flight of crushed stone and of bombardment of the body or infrastructure facility followed by calculation of subsequent financial losses. The nature of the air flow pattern around the train is often not considered at all. In the report [7], five factors of the rise of crushed stone are given: operating speed, train design and structure and, accordingly, air flow and turbulence, the value of dynamic load, quality of track maintenance, and a strong side wind. The rise of ballast granules [7] can also be observed at a lower train speed in tunnels. The accumulation of snow along the track, the passage of HST in the opposite direction also contributes to lifting of ballast granules. It was noted that in tunnels where speed limit signs «no more than 140 km/h» were posted, high-speed trains also suffered significant damage from impacts of ballast granules.





Pic. 2. Dependence of the rise of particles on their size, flow rate and its pressure [9].

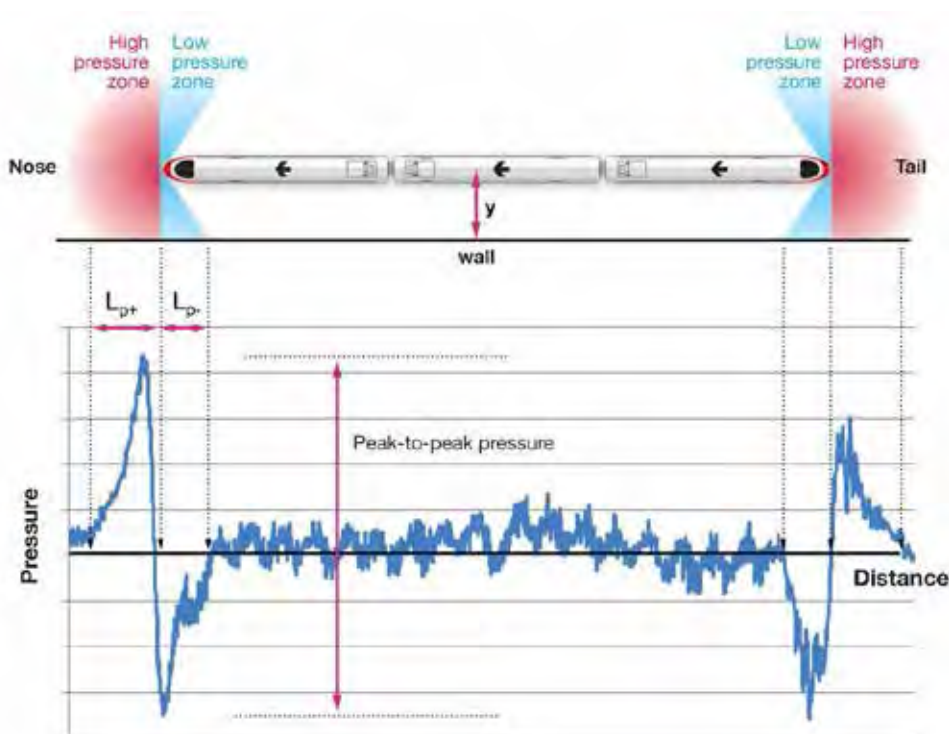
In [8], optical detection of flight of crushed stone in a wind tunnel was carried out. Based on the results of laboratory studies, an aerodynamic model was developed for calculating flight of crushed stone granules. This made it possible to proceed with dynamic calculations of the inertial mass of crushed stone, of the amount of «mobile» crushed stone on the crushed stone bed for individual crushed stone granules, and to calculate probability of crushed stone getting into the train and the consequent damage. In addition, aerodynamic forces, speed of the onset of turbulent flows from bogies and other car structures were computed.

In [9], when modelling, the aerodynamic characteristics of crushed stone granules were considered: their distribution by size, surface area, mass, and shape. Using CFD software, the behavior of individual ballast particles in the air flow of a wind tunnel was simulated, and the dependences of the rise of particles on their size and flow rate and pressure, curvature of the site where the crushed stone granules were placed, were identified (Pic. 2). The paper has also suggested the minimum wind speed at which small movements of individual crushed stone granules start, that speed is of 8 m/s. At a wind speed of 25 m/s, most of the granules begin to move discretely.

In the operating mode in summer, according to the authors of works [9; 10], HST speeds $V > 340$ km/h are reasonable only under the condition of a ballastless track. For train speeds $V > 280$ km/h, a special shape and larger sizes of crushed stone granules on the bed surface

are required. Operation of HST in winter, when the track is covered with ice and snow, at a speed of $V_{\max} > 250$ km/h, should only be carried out on a ballastless track. SNCF recommends that the speed of HST in the range of critical temperatures and at the beginning of snowfall should be no more than 200 km/h. In France, such conditions are observed for about 20 days a year (in Russia for 90 days).

The report [10] describes for the first time the effect of ulceration of HST front bogie due to «bombardment» by rushed stone particles and by the products of their crushing. As part of this study, the vibrations in ballast generated by HST were measured using strain gauges. Analysis has shown that stresses in the crushed stone bed are not related to aerodynamic factors. Therefore, the authors assumed that mechanical vibrations of the roadbed contribute to suspension of particles, and due also to vertical turbulent air flows, a «cloud» appears where the highest concentration of particles is situated in front of the first car and a reduced concentration is at the tail car. These particles, colliding with HST body, are crushed and fly away from both sides of the train. To substantiate the proposed vibration mechanism for flight of crushed stone, the authors refer to inspections of HST damage and the testimony of repairmen. For a more detailed verification of this theory, according to the authors, additional research is required. Pic. 3, taken from the report [10], schematically shows the structure of the turbulent flow arising in the nose and tail zones of HST. The intensity of color in the zones corresponds to



Pic. 3. Zones of high pressure and low pressure, arising during HST movement [10].

the higher pressure. The front area or high pressure front, called Slipstream or sliding stream, in the form of a «tongue» can lift particles of crushed stone. The pressures in the indicated areas pulsate in time and may differ markedly for different HST.

The work [11] experimentally investigates speeds and pressures in the aerodynamic field of the undercar space using Pitot tubes and strain gauges. Near the ballast bed, the average speed is only 1/3 of the train speed, while the standard deviation of fluctuations in the air flow rate is about 1/10 of the train speed. The average air flow rate changes under the influence of parts in the undercar space and their shape, including the axles of bogies, transitions between cars and auxiliary equipment. The vertical profile of speed fluctuations is approximately uniform. At a crushed stone bed, the flow rate is 0,06 of the train's velocity. High speed video recording of motion of ballast particles helped to clarify some of the mechanisms that determine their movement. The process of motion of crushed stone granules includes the stage of starting movement or starting movement of individual small granules. Then, longitudinal migration

of small granules begins along the «rough» surface of the ballast bed followed by collisions with neighboring larger particles.

The driving force of the process, in our opinion, could be associated with the alternating aerodynamic forces of turbulent vortices stabilized by silty mineral particles, snow (in winter), ballast contaminants, and ice particles of 1 ... 10 mm.

The authors of [11] believe that the contact interactions of moving granules with crushed stone particles of larger sizes play a central role. When small particles reach a sufficient longitudinal momentum, contact interactions can provoke a large granule to gain sufficient horizontal momentum to make the neighbouring particle rise into the air upon the collision.

The Slipstream s in front of HST (Pic. 3 [10]) picks up the escaped granules and raises them to a great height. Vertical vibrations of the roadbed help to reduce the structural viscosity in the upper layer of crushed stone, facilitating the process of lifting large granules of crushed stone. The results of research works cited in this section and the conclusions made in these works, especially based on model experiments



with a small number of granules and without considering vibration exposure, as well as numerical experiments based on laboratory experiments, may inadequately describe the process of crushed stone granules ejection.

3. Analysis of the methods for flight of crushed stone granules from the ballast bed

Based on the consideration of research publications [6–11], it is possible to systematize the possible mechanisms of ejection of ballast particles described there-in.

1. Lifting of ballast granules by turbulent vortices [6–9], which, according to the authors [6; 7], arise at a high train speed. Ejection of crushed stone is facilitated by the design flaws of the cars, which worsen the flow around, and lead to an increase in the turbulence of the air flow. The reasons, according to the authors, that increase the lifting of ballast granules are: poor condition of the upper layer of crushed stone prism and small size of granules on its surface; strong side wind; train movement in tunnels, in which air flow turbulization occurs at much lower speeds; the passage of the oncoming HST; and accumulation of snow along the tracks.

2. Suspension of crushed stone particles over the bed under the action of mechanical vibrations of the roadbed [10], which, in combination with vertical turbulent air flows and a slipstream in front of HST contributes to the flight of crushed stone particles.

3. Contact collisions of moving small particles with granules of larger sizes and accumulation of sufficient horizontal momentum happening in such a way that, upon collision with a neighboring particle, a large granule rises into the air [11].

To implement the *first mechanism* (lifting of ballast granules by turbulent vortices), a high speed of HST is required, that is about 300 km/h. Unsatisfactory aerodynamics of the undercar space of HST will lead to a decrease in speed near the ballast bed below 1/3 of the train speed [11]. Contamination of the upper layer of the prism will only improve the flow due to a decrease in roughness of the ballast bed and reduce concentration of turbulent tubes. The strong crosswind only displaces the slipstream and boundary flow around HST.

Turbulent vortices in the air, according to our research [12], are «tubes» with a diameter of 30 ... 40 mm with a low vacuum inside. To gain power of «tornado», turbulent vortices must accumulate a significant mass of mineral dust, but at the speed of HST, this process will not have time to be realized. Consequently, the first mechanism of crushed stone granules ejection is unlikely.

Let us evaluate the possibility of implementing the *second mechanism* (suspension) of crushed stone particles over the bed under the action of vertical mechanical vibrations of the roadbed). The vertical component of vibrations of the ballast layer of crushed granite has a complex character with sharp bursts of recording and significant differences in the oscillatory process during the passage of wagons [13].

The first harmonic is a low-frequency one, and it lies in the range from 1,13 (55 km/h) to 1,48 Hz (125 km/h), and has the amplitude of 130 ... 450 microns, respectively, in the cross-section at the foot of the end of sleepers. At HST speed of 250 km/h, the first harmonic will be ~3 Hz, and the amplitude ~1 ... 1,2 mm. The oscillation period of the low-frequency harmonic practically corresponds to the time required for the carriage to travel the distance between the extreme axes of the bogie.

The second harmonic is a medium-frequency one, with a frequency of 3 ... 13,5 Hz and an amplitude of 30 ... 220 μm . It depends on speed of the train and arises under the direct force of individual axles of the cars applied to rails and ballast. At HST speed of 250 km/h, the second harmonic will be ~27 Hz, and the amplitude ~0,4 mm.

The third high-frequency harmonic with an amplitude from 0 to 21 μm at a car speed from 55 to 125 km/h is in the frequency range from 125 to 250 Hz. The high-frequency vertical component for speed will be approximately 500 Hz and, due to the inertia of the crushed stone prism, is almost completely absorbed.

The maximum speed obtained by a particle during its harmonic vibrations of the ballast is $v_{\text{max}} = A\omega$, where A is the amplitude and ω is the circular frequency of the vibration component. For a granule with a size of 60 mm, the kinetic energy will be $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ J. In case of elastic collision of particles of the upper and lower layers,

without considering friction of a particle against neighbouring granules, the potential energy of the upper particle will increase, and the maximum rise height will be $\sim 0,5 \mu\text{m}$. Considering the collision with three neighbouring particles in the lower layer, the ascent height will not exceed $\sim 1 \mu\text{m}$.

For medium-frequency vibrations and the same granule, the lift height will be $\sim 0,23 \text{ mm}$, and when colliding with three underlying neighbouring particles, the lift height will be $\sim 0,5 \text{ mm}$. Such a rise of the granule from the crushed stone bed, near which the flow speed, as shown in [11], is close to 15 km/h , is not enough. Besides, the turbulent vortices near the wall move in the opposite direction. Therefore, capture of light granules by slipstream is also unlikely.

The *third mechanism* is associated with contact interactions of moving small particles with granules of larger sizes resulting in flight above the crushed stone bed, and it is also unlikely, since the granules are densely packed even in the upper layer and cannot independently move under the action of the air flow, and, considering its low speed at the boundary section of air flow and crushed stone bed, impulses received by particles due to collisions with neighbours will be scattered in the surface layer of the crushed stone.

4. New mechanism: squeezing of granules from the ballast bed

In our opinion, the most probable mechanism of crushed stone ejection is squeezing out and flight of granules from the upper layer of the crushed stone bed when longitudinal and transverse horizontal and vertical stresses reflected from the inner layers of the crushed stone prism occur in the crushed stone ballast. Horizontal longitudinal and transverse stresses in the crushed stone ballast between the sleepers arise during the stealing of rails as a result of HSP braking from high speeds and at high temperature gradients along the track, and then they are concentrated near the lateral surfaces of the sleepers. The twisting of sleepers when wheels hit them also contributes to squeezing out of crushed stone granules. Longitudinal forces also arise during wheel slip on rails in curves and regenerative braking of trains.

For a motor powered car with two brake axles, friction rate of wheels against rails of $0,24$, the load from the wheel set on rails 80 kN ,

fraction of the total weight used in braking of $0,5$, the thrust force from braking will be equal to $F_t = 2:2 \cdot 0,24 \cdot 0,5 \cdot 80 = 9,6 \text{ kN}$. Let us take the coefficient of transfer of thrust force to the sleeper, equal to 40% [14; 15], then the force acting from the sleeper on the top layer of ballast will be $3,8 \text{ kN}$. The highest stresses are observed near the sleepers under the rails, therefore, for the geometric area of the lateral surface of the sleeper equal to $S_l = 0,154 \cdot 2,7 = 0,416 \text{ m}^2$, the true contact area of granules of the surface layer of granules will be half as much, that is, $0,208 \text{ m}^2$. The proportion of the area of the foot of the sleeper β_g with granules under the load of 80 kN in contact with crushed stone granules is $\beta_g = 8 \%$ [16]. Since the actual area of elastic contact is directly proportional to the normal load [17], fraction of the lateral surface area of the sleeper under the load of thrust force of $3,8 \text{ kN}$ with surface ballast granules will be twenty times less ($0,4 \%$). Approximately $n \approx 50$ granules are in contact with the lateral surface of the sleeper; therefore, a stress force will act on the boundary of contact of each granule with the sleeper, the vector of which is directed normally to the lateral surface of the sleeper:

$$\tau_g = (0,4 \cdot F_t) / (\beta_g \cdot S_l \cdot n) = (0,4 \cdot 9,6 \cdot 10^3) / (0,004 \cdot 0,208 \cdot 50) \approx 91,3 \text{ kPa}. \quad (1)$$

The angle of inclination of the lateral surface of the sleeper to the horizon is $\alpha \approx 72^\circ$. The horizontal reactions of a granule touching the sleeper will be compensated by two adjacent granules in the same plane as that of the main granule (worst case). If neighbouring granules are located slightly below the main granule, for example 30° lower, then additional vertical stress will appear:

$$\tau_{\text{vert.}} \approx 2\tau_g \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \cdot \sin 30^\circ = 0,76\tau_g. \quad (2)$$

The vertical impulse of thrust force acting on the round granule closest to the sleeper, 60 mm in size and weighing $0,07 \text{ kg}$, will be equal to:

$$\tau_g \cdot S_c \cdot \Delta t \cdot [\cos \alpha + 0,76 + 2\cos 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \cdot \sin 30^\circ] = 1,81\tau_g \cdot S_c \cdot \Delta t = m_g \cdot V_{tr}, \quad (3)$$

where S_c is area of contact of a granule with the sleeper, equal to $\beta_g \cdot S_l / n = 1,7 \cdot 10^{-4}$;

$\alpha = 72^\circ$ is angle of inclination of the contact area to the surface of the crushed stone bed;

time of the pulse is equal to $\Delta t = l/V_{tr}$;

l is half of the distance between sleepers ($\sim 273 \text{ mm}$);

V_{tr} is train speed (250 km/h).



The friction rate of dry concrete against dry concrete is 0,7, and for concrete, partially contaminated with oil products and covered with watered dust particles, the friction rate is two to three times lower (0,35). The friction force acting along the lateral surface of the sleeper and with adjacent granules is:

$$F_{fr} = k_{fr} \cdot \tau_g \cdot S_c \cdot (\cos 72^\circ + 2 \cos 30^\circ) = 2,1 k_{fr} \cdot \tau_g \cdot S_c. \quad (4)$$

We add to the left side of equation (3) a vertical negative projection of the impulse of the friction force $F_{fr} \Delta t$, and, having solved the equation with respect to the initial speed of the crushed stone particle that flew out of the bed, in the final form we obtain:

$$V_g = \frac{(1,81 - 0,73) l \cdot S_c}{m_g \cdot V_r} \tau_g = \frac{1,08 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot 0,273 \cdot 91,3 \cdot 10^3}{0,07 \cdot 69,4} \approx 0,94 \text{ m/s}. \quad (5)$$

For a 25 mm granule, ejection speed is 2,2 m/s. When evaluating squeezing of crushed stone granules out of the ballast bed, we did not take into account the downward force impulse when the wheel hits the sleeper and the reverse elastic reaction of the roadbed. In section 3 of this article, when assessing the possibility of realizing the second mechanism suspension of crushed stone particles in the cross section at the foot of the end of sleepers is carried out by the second harmonic energy with a frequency of ~27 Hz and an amplitude of ~0,23 mm. The average vertical harmonic force applied to the granule near the sleepers during the half-period for the first harmonic will be:

$$\bar{F}_{harm1} = \frac{m_g \cdot A \omega^2}{\pi} \int_0^\pi \sin \omega t dt = \frac{2 A m_g \omega}{\pi} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ N}. \quad (6)$$

For the second harmonic $F_{harm2} = 1,24 \text{ k}$. The force impulse for a half-wave of the second harmonic is $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{s}$, and the additional speed of a 60 mm granule will be 0,8 m/s, and for a 25 mm granule the velocity will be 0,34 m/s.

The sleeper rotation angle is not included in the standardized parameters of the railway track, we calculate it relative to the fastening for a uniform rail deflection by 3 mm in its middle part between sleepers. For the ratio of the rail shoulder (546: 2 mm) and height of the sleeper (183 mm), the angle α is $6,4^\circ$. But, since we did not consider the nonlinear deflection of the rail, we take the angle of rotation $\alpha \approx 6^\circ$. Considering the rotation of the sleeper by 6° , equation (3) takes the form:

$$\tau_g \cdot S_c \cdot \Delta t \cdot \cos(\alpha - 6^\circ) = m_g \cdot V_g, \quad (7)$$

and speed, found from equation (4), will increase by 1,1 and will be 1,03 m/s plus 0,8 m/s.

From the equality of the kinetic and potential energy of a crushed stone particle with a size of 60 mm, we find the lifting height of the largest crushed stone granule ~ 0,17 m.

The speed of propagation of a wave of compressive stresses in steel during thrust of rails is ~ 10 km/s; therefore, a slipstream is able to lift outgoing granules to a great height, which is dangerous for HST and infrastructure. Longitudinal forces in rails due to temperature changes and during emergency braking have much greater values. For example, for new rails of R65 type, thrust force acting on the sleeper when the temperature rises by 1°C is, respectively, 20,7 kN, and the rise of particles will increase by 2,2 times.

As the crushed stone layer abrades, there will be more and more rounded particles, porosity of the surface layer will be higher and, therefore, there will be less friction, and more crushed stone granules will eject. The most probable places of ejection of crushed stone granules are hauls near settlements, where there are changes in the modes of movement (acceleration of movement and braking), as well as icing of the surface of crushed stone particles. Raised light granules, hitting the undercar equipment and flying off at high speed, can cause an avalanche process of lifting of crushed stone particles.

Conclusions.

1. Based on estimates, it is shown that the main mechanism of crushed stone ejection during high-speed movement is squeezing of particles from the upper layer of granules and their rise above the crushed stone bed as a result of action of longitudinal and transverse stresses in the ballast. The most probable place of ejection of crushed stone particles is the boundary of contact between sleepers and the upper layers of the crushed stone bed.

2. Physical mechanisms (lifting of ballast by turbulent vortices, suspension of crushed stone particles over the bed under the action of mechanical vibrations of the roadbed, contact collisions of moving small particles with larger granules) contribute to an increase in porosity of the crushed stone layer, a decrease in structural viscosity, a change in orientation of

particles and, consequently, facilitate squeezing and flight of ballast granules.

3. The blocks of ice formed in the undercar space of HST under certain weather conditions crumble, colliding with rails and crushed stone and collapsing; they are also part of the mechanism of the ejection of crushed stone particles.

4. The paper formulates a new mechanism for lifting granules over the crushed stone bed as a result of action of longitudinal and transverse stresses in the surface layer of ballast. To exclude ejection of crushed stone granules and prevent damage to HST and infrastructure, complex methods should be developed to dramatically reduce longitudinal and lateral stresses in the surface layer of ballast and ice formation in the undercar space.

REFERENCES

1. Belkov, V. M., Antipov, B. V. Physical and chemical foundations of track stability [*Fiziko-khimicheskie osnovy ustoiчивosti puti*]. *Put' i putevoe khoziaistvo*, 2013, Iss. 12, pp. 21–24.
2. Kolos, A. F., Tursunov, Kh. I., Nikolaytist, D. S. Investigation of strength properties of ballast material clogged with sand dunes [*Issledovanie prochnostnykh svoystv ballastnogo materiala zasorenno barkhatnymi peskami*]. Electronic scientific journal «Engineering Bulletin of the Don», 2007–2012. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-prochnostnykh-svoystv-ballastnogo-materiala-zasorennyimi-barhannymi-peskami/pdf>. Last accessed 14.05.2020.
3. Kamenskiy, V. B. Improvement of the track management system in modern conditions of railways operation [*Sovershenstvovanie sistemy vedeniya putevogo khoziaistva v sovremennykh usloviyakh raboty zheleznnykh dorog*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. Moscow, 2011, 23 p.
4. Peich, Yu. L. Interaction of track elements in conditions of clogging and humidification [*Vzaimodeistvie elementov puti v usloviyakh zasoreniya i uvlazhneniya*]. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis. Moscow, 2011, 23 p.
5. Ogibalov, P. M., Mirzadzhanzade, A. Kh. Nonstationary movements of viscoplastic media [*Nestatsionarnie dvizheniya vyazkoplastichnykh sred*]. Moscow, Publishing house of MSU, 1977, 372 p.
6. Derkowski, P., Clark, S., Sturt, R., Keylin, A., Baker, C., Vardy, A., Wilson, N. High-Speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report. U.S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration, Office of Research, Development, and Technology, Washington, DC20590. Report Number: DOT/FRA/ORD-15/40. December 2015, 258 p. [Electronic resource]: <https://railroads.dot.gov/elibrary/high-speed-rail-aerodynamic-assessment-and-mitigation-report>. Last accessed 14.05.2020.
7. Saat, M. R., Bedini-Jacobini, F., Tutumluer, E., Barkan, C. P. L. Identification of High-Speed Rail Ballast Flight Risk Factors and Risk Mitigation Strategies, Final Report. Federal Railroad Administration, Washington, DC, Report Number: DOT/FRA/ORD-15/03. 2015, 76 p. [Electronic resource]: https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/pdf-archive/TR_Identification-of-Ballast-Flight-Risk_final.pdf. Last accessed 14.05.2020.
8. Baker, C. J. A review of train aerodynamics. Part 1 – Fundamentals; Part 2 – Applications. *The Aeronautical Journal*, 2014, Vol. 118, No. 1201, 1202. [Electronic resource]: <https://core.ac.uk/download/pdf/185479708.pdf>; <https://core.ac.uk/download/pdf/185479709.pdf>. Last accessed 14.05.2020.
9. Jing, G., Liu, G. X., Lin, J., Martinez, J., Yin, C. T. Aerodynamic Characteristics of Individual Ballast Particle by Wind Tunnel Tests. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2014, Vol. 7, Iss. 2, pp. 137–142. [Electronic resource]: <http://www.jestr.org/downloads/Volume7Issue2/fulltext217214.pdf>. Last accessed 14.05.2020. DOI: 10.25103/jestr.072.21.
10. Quinn, A., Hayward, M. Full-scale aerodynamic measurements underneath a high speed train. BBAA 6th International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. Milano, Italy, July, 20–24, 2008. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/237112260_full-scale_aerodynamic_measurements_underneath_a_high_speed_train/link/554898b80cf2b0cf7aced5ff/download. Last accessed 14.05.2020.
11. Lazaro, B. J., Gonzalez, E., Rodriguez, Manuel, Rodriguez, Miguel, Osma, S., Iglesias, J. Characterization and Modeling of Flying Ballast Phenomena in High-speed Train Lines. 9th World Congress Railway Research, May 22–24, 2011. [Electronic resource]: Challenge E: Bringing the territories closer together at higher speeds. http://www.railway-research.org/IMG/pdf/e4_lazaro_benigno.pdf. Last accessed 14.05.2020.
12. Belkov, V. M., Zhuravleva, M. A. Modelling of contamination of railway tracks and technical strip with dust particles [*Modelirovanie zagryazneniya zheleznodorozhnogo polotna tekhnicheskoi polosy pylavatymi chastitsami*]. *Vestnik VNIIZhT*, 2015, Iss. 2, pp. 9–14. [Electronic resource]: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/article/viewFile/22/23>. Last accessed 14.05.2020.
13. Tursunov, Kh. I. Investigation on the oscillatory process in the ballast prism of a railway track, clogged with sand dunes [*Issledovanie kolebatelnogo protsessa v ballastnoi prizme zheleznodorozhnogo puti, zasorennoi barkhatnymi peskami*]. *Engineering Bulletin of the Don*, 2012, Iss. 3. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kolebatelnogo-protsessa-v-ballastnoy-prizme-zheleznodorozhnogo-puti-zasorennoy-barhannymi-peskami/pdf>. Last accessed 14.05.2020.
14. GOST R [State Standard] 55050-2012 Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods (with Amendment No. 1) [*GOST R 55050-2012 Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy puti i metody ispytaniy (s Izmeneniyem No.1)*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200096113>. Last accessed 14.05.2020.
15. Effective underrail and rail pads made of SYLOMER and SYLODYN materials [*Effektivnie podrelsovie i nashpalnie prokladki iz materialov SYLOMER i SYLODYN*]. LLC Acoustic Materials and Technologies, Kiev [Electronic resource]: <http://www.acoustic.ua/articles/113>. Last accessed 14.05.2020.
16. Experimental assessment of interaction of the vehicle and track at speed and high-speed traffic: Monograph [*Eksperimentalnaya otsenka vzaimodeystviya ekipazha i puti pri skorostnom i vysokoskorostnom dvizhenii: Monografiya*]. Ed. by A. M. Brzhezovskiy. Moscow, RAS, 2019, 152 p.
17. Popov, V. L. Mechanics of contact interaction and physics of friction [*Mekhanika kontaktного vzaimodeystviya i fizika treniya*]. Moscow, Fizmatlit, 2012, 348 p. ●





Повышение частотной эффективности сигналов с абсолютной фазовой манипуляцией на 180°



Анатолий ВОЛКОВ



Максим МОРОЗОВ



Василий КУЗЮКОВ

Волков Анатолий Алексеевич — Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Морозов Максим Сергеевич — АО «Метрогипротранс», Москва, Россия.*

Кузюков Василий Александрович — Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Связь с подвижными объектами на железнодорожном транспорте осуществляется только по радио, поэтому представляет интерес вопрос максимизации её частотной эффективности и помехоустойчивости. Этого можно добиться, используя двукратную абсолютную ФМн (ДФМн) на 180° , однако на практике она до сих пор не используется из-за обратной работы обоих когерентных детекторов её сигналов.

Целью данной статьи является разработка когерентного детектора без обратной работы, что позволяет использовать его на практике без снижения помехоустойчивости,

также предложен фильтро-фазовый метод формирования одной боковой полосы частот с фазовой манипуляцией на 180° (ОБП ФМн), эквивалентный ДФМн по частотной эффективности.

Предложенный когерентный детектор сигналов ДФМн включает в себя формирователь опорного колебания (ФОК) из входного сигнала, два когерентных детектора и введённые последетекторные блоки, устраняющие обратную работу этих когерентных детекторов. Однополосная ФМн формируется по клипированному речевому сигналу и его квадратуре.

Ключевые слова: транспорт, связь, когерентный детектор, формирователь опорного колебания, регенератор импульсов, частотный детектор, триггер, помехоустойчивость, эффективность радиосвязи.

*Информация об авторах:

Волков Анатолий Алексеевич — доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, aavolkov2009@rambler.ru.

Морозов Максим Сергеевич — инженер отдела автоматики, телемеханики и связи АО «Метрогипротранс», Москва, Россия, super-1990@gmail.com.

Кузюков Василий Александрович — кандидат технических наук, доцент Российского университета транспорта, Москва, Россия, raconteurs.mm@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 02.03.2020, принята к публикации 11.06.2020.

For the English text of the article please see p. 78.

Известно [1, с. 181–187], что двукратная абсолютная ФМн (ДФМн) на 180° обеспечивает не только максимально возможную помехоустойчивость радиосвязи, но и увеличивает частотную эффективность в 2 раза [2] по сравнению с однократной, поскольку в одном канале можно передавать два квадратурных сигнала. Это эквивалентно однополосной абсолютной ФМн на 180° . Повышение частотной эффективности снижает основную проблему радиосвязи – дефицит частотного ресурса. Связь с подвижными объектами осуществляется только по радио. Поэтому максимизация помехоустойчивости радиосвязи способствует повышению их безопасности, в частности повышению безопасности движения поездов. Однако абсолютная ДФМн на 180° на практике не используется из-за того, что положительные дискретные импульсы воспринимаются как отрицательные и наоборот. Данное явление называется «обратной работой когерентных детекторов» [2]. Для её устранения разрабатывались новые схемы когерентных детекторов, формирующих колебание несущей частоты из входного сигнала. Первым когерентным детектором был детектор А. А. Пистолькорса, разработанный

в 1933 г., на котором была обнаружена его обратная работа. В 1937 г. появился когерентный детектор В.И. Сифорова, а в 1945 г. – детектор Д. В. Агеева. В 1954 г. стал использоваться когерентный детектор Костаса – американского учёного в области радиосвязи. Ни один из вышеуказанных детекторов не устранял обратную работу, что подтверждают приведённые в данной статье соответствующие литературные источники [1–8]. Поэтому был сделан вывод, что обратная работа – неустранима [10]. В связи с этим в 1954 г. российский учёный Н. Т. Петрович предложил [1] относительную ФМн (ОФМн) на 180° [2; 10], практически [1; 9] устраняющую обратную работу когерентного детектора [9]. Однако относительная фазовая манипуляция, с точки зрения, помехоустойчивости уступает абсолютной.

Целью исследования является устранение обратной работы с помощью различных методов:

- 1) предложен детектор сигналов без обратной работы с абсолютной ФМн на 180° ;
- 2) фильтро-фазовый метод формирования одной боковой полосы частот с фазовой манипуляцией на 180° (ОБП ФМн).

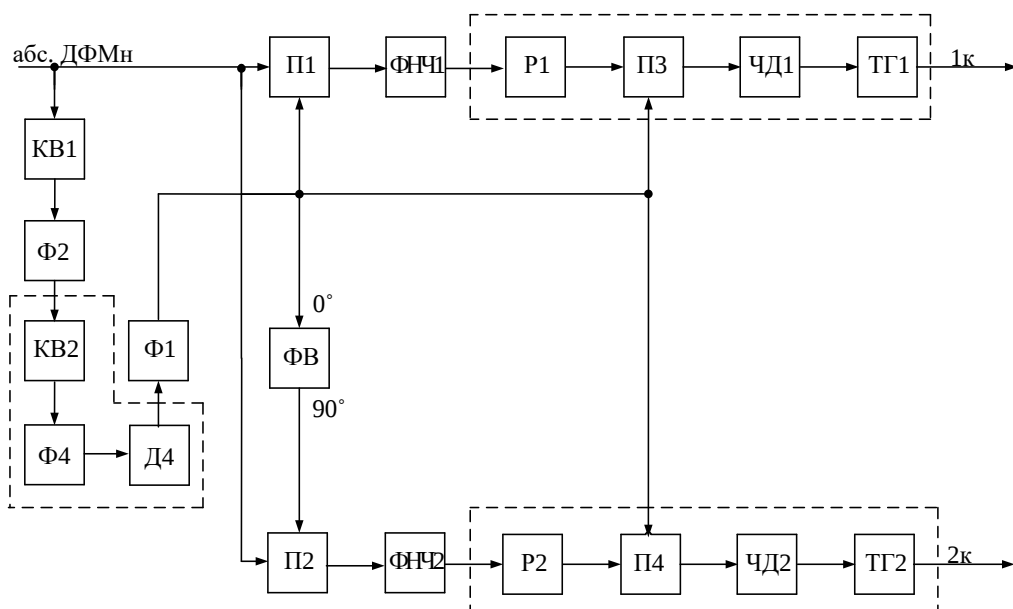


Рис. 1. Структурная схема когерентного детектора.

Таблица 1

Варианты разницы функций $\gamma(t)$

Варианты $(\gamma_2(t) - \gamma_1(t)) \cdot \pi/2$	Слагаемые $\sin [(\gamma_2(t) - \gamma_1(t)) \cdot \pi/2]$
$(+1 - (+1)) \cdot \pi/2 = 0$	$\sin 0 = 0$
$(+1 - (-1)) \cdot \pi/2 = \pi$	$\sin \pi = 0$
$(-1 + (+1)) \cdot \pi/2 = 0$	$\sin 0 = 0$
$(-1 + (-1)) \cdot \pi/2 = -\pi$	$\sin (-\pi) = 0$

Таблица 2

Варианты суммы функций $\gamma(t)$

Варианты $[\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2]$	Слагаемые $\sin \{2\omega_0 t + [\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2] \cdot \pi/2\}$
$(1 + 1 - 2) \cdot \pi/2 = 0$	$\sin 2\omega_0 t$
$(1 - 1 - 2) \cdot \pi/2 = -\pi$	$-\sin 2\omega_0 t$
$(-1 + 1 - 2) \cdot \pi/2 = -\pi$	$-\sin 2\omega_0 t$
$(-1 - 1 - 2) \cdot \pi/2 = -2\pi$	$\sin 2\omega_0 t$

1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РАЗРАБОТАННОГО КОГЕРЕНТНОГО ДЕТЕКТОРА

Структурная схема разработанного когерентного детектора [3] представлена на рис. 1.

На этом рисунке обозначено [14]: Ф – фильтры гармоник; КВ – квадратор; Д4 – делитель частоты на 4; ФВ – фазовращатель на 90°; ФНЧ – фильтры нижних частот; П – перемножители сигналов; Р – регенераторы импульсов; ЧД – частотные детекторы; ТГ – триггеры. Блоки КВ1, Ф2, КВ2, Ф4, Д4, Ф1 образуют формирователь опорного колебания (ФОК), который устраняет ФМн на 180°.

Входной сигнал $u_{\text{вх}}(t)$ с абсолютной ДФМн на 180° поступает на одни входы обоих когерентных детекторов непосредственно и параллельно на другие их входы через ФОК. Этот входной сигнал состоит из суммы двух квадратурных сигналов с абсолютной однократной ФМн на 180°. Каждый такой сигнал с однократной ФМн $u_{\text{фм}}(t)$ равен разнице амплитудно-манипулированного сигнала $u_{\text{ам}}(t)$ и его колебания несущей частоты $u_{\text{н}}(t)$, амплитуда которого в 2 раза меньше амплитуды сигнала $u_{\text{ам}}(t)$ [5], то есть:

$$\begin{aligned} u_{\text{фм}}(t) &= u_{\text{ам}}(t) - 0,5 \cdot u_{\text{н}}(t) = \\ &= U_m(t) \cdot u(t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) - 0,5 U_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) = \\ &= U_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot [u(t) - 0,5] = \\ &= 0,5 \cdot \gamma(t) \cdot U_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0), \end{aligned}$$

где манипулирующие сигналы:

$$\begin{aligned} u(t) &= \begin{cases} 1 \text{ нпу} & 0 < t < \tau_0, \\ 0 \text{ нпу} & -\tau_0 < t < 0, \end{cases} \\ \gamma(t) &= \begin{cases} +1 \text{ нпу} & 0 < t < \tau_0; \\ -1 \text{ нпу} & -\tau_0 < t < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Это значит, что сигналы с АМн и ФМн [13] равны произведению колебания несущей частоты $u_{\text{н}}(t)$ на манипулирующие сигналы соответственно $u(t)$ и $\gamma(t)$ [16]. В этом случае:

$$\begin{aligned} u_{\text{фм1}}(t) &= \gamma_1(t) \cdot U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= \pm U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = U_m \sin[\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}]; \\ u_{\text{фм2}}(t) &= \gamma_2(t) \cdot U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}) = \pm U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}) = \\ &= U_m \sin[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}] = U_m \cos[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}]. \end{aligned}$$

То есть входной сигнал с абсолютной ДФМн на 180°:

$$\begin{aligned} u_{\text{вх}}(t) &= u_{\text{фм1}}(t) + u_{\text{фм2}}(t) = \\ &= U_m \{ \sin[\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}] + \cos[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}] \}. \end{aligned}$$

Этот входной сигнал возводится в квадрат в блоке КВ 1. Обозначив первое слагаемое через $\sin \alpha$, а второе – через $\cos \beta$, имеем на выходе блока КВ сигнала:

$$\begin{aligned} u_{\text{кв1}}(t) &= u_{\text{вх1}}(t) + u_{\text{вх2}}(t) = U_m^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta) = \\ &= U_m^2 (\sin^2 \alpha + 2 \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos^2 \beta), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \sin^2 \alpha &= \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} = \\ &= \frac{1 - \cos [2\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \pi]}{2} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t; \end{aligned}$$

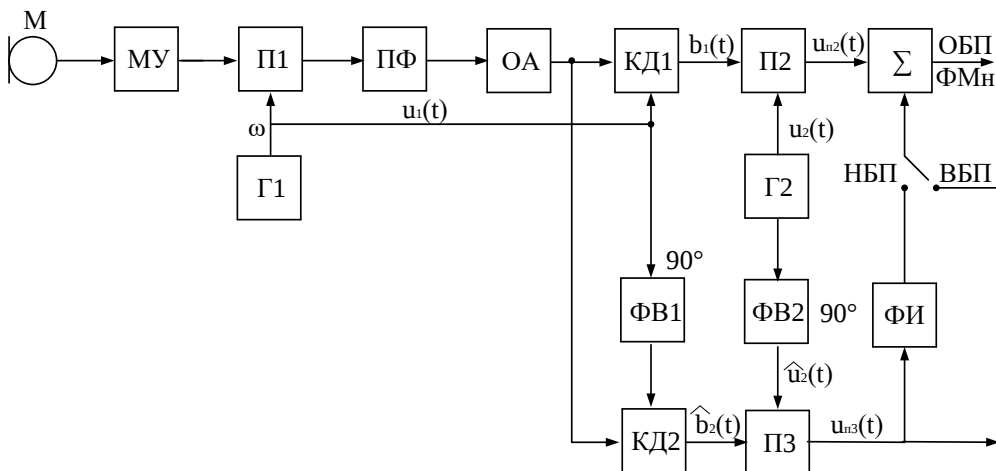


Рис. 2. Схема фальтро-фазового метода ФОС.

$$\cos^2 \beta = \frac{1 + \cos 2\beta}{2} =$$

$$= \frac{1 + \cos [2\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \pi]}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t;$$

$$2 \sin \alpha \cdot \cos \beta = \sin(\beta - \alpha) + \sin(\beta + \alpha) =$$

$$= \sin [\gamma_2(t) - \gamma_1(t)] \cdot \frac{\pi}{2} + \sin [2\omega_0 t + [\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2] \cdot \frac{\pi}{2}].$$

В результате на выходе КВ1 получаем колебание:

$$u_{\text{кв1}}(t) = U_m^2 \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t + \sin [\gamma_2(t) - \gamma_1(t)] \cdot \frac{\pi}{2} + \sin [2\omega_0 t + [\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2] \cdot \frac{\pi}{2}] \right\} =$$

$$= 1 + \sin [\gamma_2(t) - \gamma_1(t)] \cdot \frac{\pi}{2} + \sin [2\omega_0 t + [\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2] \cdot \frac{\pi}{2}].$$

Хотя $\gamma_1(t) = \pm 1$ и $\gamma_2(t) = \pm 1$, но их сумма и разность могут быть разными. Поэтому составим таблицы с учётом сумм и разностей $\gamma_1(t)$ и $\gamma_2(t)$.

Согласно табл. 1 синус разницы $(\gamma_2(t) - \gamma_1(t)) \cdot \pi/2$ равен 0, а согласно табл. 2 сумма $[\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2] \cdot \pi/2$ не устраняет ФМн на 180° (второй столбец табл. 2). Поэтому введён второй квадратор КВ2, на вход которого поступает сигнал с выхода КВ1 через конденсатор и фильтр второй гармоники Ф2. На выходе КВ2 имеет место сигнал:

$$u_{\text{кв2}}(t) = (\pm U_m^2 \sin(2\omega_0 t))^2 = U_m^4 \sin^2 2\omega_0 t =$$

$$= U_m^4 \cdot \frac{1 - \cos 4\omega_0 t}{2} = 0,5 U_m^4 - 0,5 U_m^4 \cos 4\omega_0 t.$$

Видно, что сигнал с КВ2 не содержит манипулирующих сигналов $\gamma_2(t)$ и $\gamma_1(t)$, и поэтому он подаётся на делитель частоты в 4 раза, в качестве которого выбран двойной Д-триггер с усилителем-ограничителем

амплитуды на его входе. С прямого выхода первого Д-триггера подаётся колебание $u_0(t) = U_m \cos \omega_0 t$ через резонансный контур первой гармоники с нулевой начальной фазой на второй вход умножителя П1 когерентного детектора синфазного канала, а с прямого выхода второго Д-триггера подаётся квадратурное колебание

$$u_0(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2})$$

через резонансный контур первой гармоники на второй вход умножителя П2 когерентного детектора квадратурного канала. На выходе умножителей П1 и П2 получаются колебания:

$$u_{n1}(t) = u_{\text{вх}}(t) \cdot u_0(t) = U_m \left\{ \cos \left[\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \right] + \right.$$

$$\left. + \cos \left[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \right] \right\} U_m \cos \omega_0 t =$$

$$= 0,5 U_m^2 \left\{ \cos [\gamma_1(t) - 1] \cdot \frac{\pi}{2} + \cos [(\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}] \right\} +$$

$$+ \text{в.ч.} = 0,5 U_m^2 [\pm 1 + 0] + \text{в.ч.};$$

$$u_{n2}(t) = u_{\text{вх}}(t) \cdot u_0(t) = 0,5 U_m^2 [\sin (\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} +$$

$$+ \sin (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}] = 0,5 U_m^2 [0 \pm 1] + \text{в.ч.}$$

ФНЧ на выходе П1 и П2 устраняет ВЧ колебания, оставляя только переданные цифровые сигналы $\gamma_1(t) = \pm 1$ и $\gamma_2(t) = \pm 1$.

Но для абсолютной ДФМн на 180° опорное колебание $u_0(t) = \pm \sqrt{u_{\text{вх}}^4(t)}$. Знаки $\pm$ равновероятны, и поэтому помеха или другие процессы в приёмнике могут вызывать изменение фазы сигнала на 180° у $u_0(t)$, что является источником обратной



работы когерентных детекторов, поскольку продетектированные импульсы синфазны с $u_{\phi}(t)$. Опорное колебание $u_{\phi}(t)$ проходит через резонансные контуры Ф2, Ф4, Ф1, и поэтому оказывается практически без помех, а когерентно продетектированные импульсы не содержат квадратурной составляющей помехи. Их можно регенерировать путём усиления-ограничения по амплитуде и тем самым дополнительно подавить помехи, их сопровождающие. Поскольку опорное колебание $u_{\phi}(t)$ и продетектированные импульсы синфазны, то их перемножение между собой исключает изменение фазы сигнала на 180° , как и при перемножении гармонических колебаний:

$$\begin{aligned} u_n(t) &= b(t) \cdot u_{\phi}(t) = \\ &= U_{\Omega} \cos(\Omega t + 180^\circ) U_{\omega} \cos(\omega t + 180^\circ) = \\ &= 0,5 U_{\Omega} U_{\omega} [\cos(\omega - \Omega)t + \cos(\omega + \Omega)t]. \end{aligned}$$

Перемножение знакопеременных импульсов с колебанием несущей частоты, как было показано в начале статьи, есть абсолютная однократная ФМн на 180° , которая в данном случае практически без помех и искажений. Поскольку сигналы ДФМн уже разделены между собой, то можно перемножать $\gamma_1(t)$ и $\gamma_2(t)$ только с $u_{\phi}(t)$ как показано на рис. 1. Такой сигнал можно детектировать некогерентно, не изменяя помехоустойчивости радиосвязи в виду отсутствия помех. В данном случае предложено использовать триггер и частотный детектор на выходе, так как фаза $\varphi(t)$ и круговая частота $\omega(t)$ связаны соотношением: $\omega(t) = d\varphi/dt$, а обратная работа у него не устранима в принципе.

Такой детектор уже предлагался вместо когерентного детектора Пистолькорса ещё в 1951 г. [2], однако из-за помех на его входе он не нашёл практического применения. В рассмотренном случае помехи на его входе практически отсутствуют, и поэтому его можно использовать.

2. ОДНОКРАТНАЯ ОДНОПОЛОСНАЯ АБСОЛЮТНАЯ ФМН НА 180° , ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПО ЧАСТОТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУКРАТНОЙ ФМН НА 180°

Данная однополосная однократная абсолютная ФМн (ОБП ФМн) на 180°

разработана авторами [17], её структурная схема представлена на рис. 2.

На схеме [18] обозначено: ПФ – полосовой фильтр; Σ – сумматор; П1, П2, П3 – перемножители сигналов; Г1, Г2 – генераторы; КД1, КД2 – когерентные детекторы; ФВ1, ФВ2 – фазовращатели на 90° ; ОА – ограничитель амплитуды; ФИ – фазоинвертор.

На выходе КД1 – клиппированный [12] речевой сигнал $b_1(t)$, а на выходе КД2 – квадратурный речевой сигнал $b_2(t)$. В таком случае с учётом того что сигналы периодические, имеем:

$$\begin{aligned} b_1(t) &= \frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin k \dot{U} t}{k}; \\ b_2(t) &= \frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos k \dot{U} t}{k}. \end{aligned}$$

На выходе П2 формируется функция:

$$\begin{aligned} U_{n2}(t) &= b_1(t) \cdot u_{n2}(t) = \left(\frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin k \dot{U} t}{k} \right) \cdot U_{\omega} \sin \omega t = \\ &= \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega - k \dot{U})t}{k} - \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega + k \dot{U})t}{k}. \end{aligned}$$

А на выходе П3 колебание:

$$\begin{aligned} U_{n3}(t) &= \hat{b}_2(t) \cdot \hat{u}_{n2}(t) = \left(\frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos k \dot{U} t}{k} \right) \cos \omega t = \\ &= \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega - k \dot{U})t}{k} + \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega + k \dot{U})t}{k}. \end{aligned}$$

В сумматоре Σ сигнал:

$$u_o(t) = u_{n2}(t) + u_{n3}(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega - k \dot{U})t}{k},$$

где нижняя боковая полоса (ОБП ФМн на 180°).

При вычитании (когда $b_2(t)$ проходит через блок ФИ):

$$u_o(t) = u_{n2}(t) - u_{n3}(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega + k \dot{U})t}{k},$$

где верхняя боковая полоса (ОБП ФМн на 180°).

При ОБП ФМн помех в 2 раза меньше, чем при двух боковых полосах, и поэтому при равных их амплитудах помехоустойчивость радиосвязи с ОБП ФМн на 180° будет больше, чем при двух боковых по аналогии с [7].

ВЫВОДЫ

1. Предложена [11] схема когерентного детектора сигналов, с исключением его обратной работы, позволяющего реализовывать ДФМн на 180° на практике. Новизна предложения подтверждена патентом РФ на изобретение [11].

2. Показано, что для формирования опорного колебания $u_{\phi}(t) = U_m \cos \omega_f t$ по входному сигналу с абсолютной ДФМн на 180° необходим второй квадратор КВ2 и делитель частоты не на 2, а на 4.

3. Показано [5], что источником обратной работы когерентного детектора с абсолютной ДФМн, когда $+1$ преобразуется в -1 и наоборот, являются случайные и неустраиваемые скачки фазы опорного колебания, получаемого из входного сигнала [14] с абсолютной ДФМн на 180° , которые синфазны с когерентно протектированными импульсами.

4. Предложено устранять скачки фазы на 180° у $u_{\phi}(t)$ и у протектированных знакопеременных импульсов путём их перемножения между собой, что формирует абсолютную ФМн на 180° практически без помех и искажений. Помехи отсутствуют у $u_{\phi}(t)$ за счёт его фильтрации резонансными контурами второй, четвёртой и первой гармоник и у протектированных импульсов за счёт когерентного детектирования и их регенерации путём усиления-ограничения.

5. Предложено в качестве детектора перемноженных сигналов, согласно п. 4, использовать частотный детектор с триггером (интегратором) на его выходе, поскольку фаза $\varphi(t)$ и круговая частота $\omega(t)$ связаны соотношением: $\omega(t) = d\varphi/dt$. Такой детектор уже предлагался [19] в качестве основного (вместо детектора Пистолькорса) ещё в 1951 г., но не нашёл применения из-за помех на его входе. В нашем случае помехи и искажения на его входе практически отсутствуют.

6. Для увеличения частотной эффективности в 2 раза авторами предложена однополосная абсолютная ФМн на 180° по фильтро-фазовому способу с клиппированием, которая эквивалентна по этому показателю абсолютной ДФМн на 180° .

На разработку получен патент РФ на изобретение [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрович Н. Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией. — М.: Связь, 1965. — 423 с.
2. Волков А. А., Кузюков В. А., Журавлёв О. Е. Способ восстановления огибающей у клиппированного речевого сигнала // Проектирование и техноло-

гия электронных средств. — 2013. — № 4. — С. 51—54. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22025462>. Доступ 05.03.2020.

3. Rappoport, Th. S. Wireless Communications (Principles and Practice). New York: IEEE Press, 1996, 641 p.

4. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер с англ. под ред. Д. Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 2000. — 797 с.

5. Зюко А. Г., Коробов Ю. Ф. Теория передачи сигналов — М.: Радио и Связь, 1972. — 360 с.

6. Волков А. А. Радиопередающие устройства. — М.: Маршрут, 2002. — 352 с.

7. Верзунов М. В. Однополосная модуляция в радиосвязи. — М.: Воениздат, 1972. — 295 с.

8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — М.: Изд. дом Вильямс, 2007. — 1098 с.

9. Патент РФ на ПМ № 163281 Детектор сигналов с абсолютной ФМн на 180° // А. А. Волков, М. С. Морозов. Приоритет от 18.04.2016 г. Опубл. 10.07.2016 г. в БИ № 19 за 2016 г. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/patents/doc/RU163281U1_20160710. Доступ 05.03.2020.

10. Волков А. А., Морозов М. С. Способ реализации абсолютной ФМн на 180° // Электросвязь. — 2017. — № 2. — С. 72—74. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28370759>. Доступ 05.03.2020.

11. Патент РФ на изобретение. Когерентный детектор сигналов с двукратной абсолютной фазовой манипуляцией на 180° / А. А. Волков, М. С. Морозов. Приоритет от 26.12.2018 г. Опубл. 13.02.2020 г. Бюл. № 5. [Электронный ресурс]: https://patents.s3.yandex.net/RU2714222C1_20200213.pdf. Доступ 05.03.2020.

12. Петрович Н. Т., Козленко Н. И. Передача клиппированных речевых сигналов с помощью фазовой телеграфии // Радиотехника. — 1964. — № 11. — С. 21—24.

13. Шевлюгин М. В., Данг В. Ф. Гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения метрополитена // Мир транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 6. — С. 88—101. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/553/882>. Доступ 05.03.2020.

14. Волков А. А., Волкова И. А. Когерентный детектор радиосигналов с фазовой манипуляцией на 180° Патент на изобретение RU2439830 C1, 10.01.2012 г. Заявка № 2010115998/08 от 23.04.2010 г. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/patents/doc/RU2439830C1_20120110. Доступ 05.03.2020.

15. АС СССР № 1522376. Устройство восстановления несущей частоты из однополосного модулирующего сигнала / А. А. Волков. Приоритет от 11.08.87 г. Опубл. 13.11.89 г. в БИ № 42. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/patents/doc/SU1522376A1_19891115. Доступ 05.03.2020.

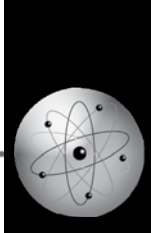
16. Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Коржик В. И., Назаров М. В. Теория электрической связи. — М.: Радио и связь, 1988. — 433 с.

17. Патент РФ на ПМ № 135464. Формирователь однополосного клиппированного сигнала с ФМн на 180° / А. А. Волков, В. А. Кузюков, К. Г. Храмов. Приоритет от 24.05.2013 г. Опубл. 10.12.2013 г. в БИ № 34. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/patents/doc/RU135464U1_20131210. Доступ 05.03.2020.

18. Волков А. А., Кузюков В. А. Повышение качества клиппированных речевых сигналов // Мир транспорта. — 2013. — Т. 11. — № 5. — С. 38—43. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/446/703>. Доступ 05.03.2020.

19. Авторское свидетельство СССР № 100138. Приём фазовой телеграфии без синхронного гетеродина / Л. И. Ярославский и др. Приоритет от 1951 г.





Improving Frequency Efficiency of Signals with Absolute Phase Shift Keying by 180°



Anatoly A. VOLKOV



Maksim S. MOROZOV



Vasily A. KUZUYKOV

Volkov, Anatoly A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Morozov, Maksim S., JSC Metrogiprottrans, Moscow, Russia.*

Kuzyukov, Vasily A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

ABSTRACT

Communication with mobile objects in railway transport is carried out only by radio, therefore, it is of interest to maximize frequency efficiency and noise immunity of radio communication. This can be achieved using a double absolute phase-shift keying (DPSK) at 180° , but in practice it is still not used due to reverse operation of both coherent detectors of its signals.

The objective of this article is to develop a coherent detector without reverse operation, which allows to use it in practice without

reducing its noise immunity. A filter-phase method of forming single-sideband with phase shift keying at 180° (SSB PSK) is proposed, which is equivalent to DPSK in frequency efficiency.

The proposed coherent detector of DPSK signals includes a reference waveform shaper (RWS) shaping the waveform from the input signal, two coherent detectors and introduced post-detector units that eliminate reverse operation of these coherent detectors. Single-lane PSK is formed using clipped speech signal and its quadrature.

Keywords: transport, communication, coherent detector, reference waveform shaper, pulse regenerator, frequency detector, trigger, noise immunity, radio communication efficiency.

*Information about the authors:

Volkov, Anatoly A. – D.Sc. (Eng), Professor of Russian University of Transport, Moscow, Russia, aavolkov2009@rambler.ru.

Morozov, Maksim S. – Engineer of the Department of Automation, Telemechanics and Communication of JSC Metrogiprottrans, Moscow, Russia, super-1990@gmail.com.

Kuzyukov, Vasily A. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Russian University of Transport, Moscow, Russia, raconteurs.mm@gmail.com.

Article received 02.03.2020, accepted 11.06.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 72.

Background.

It is known [1, p. 181–187] that a double absolute phase-shift keying (PSK) (DPSK) by 180° provides not only the maximum possible noise immunity of radio communication, but also increases the frequency efficiency by 2 times [2] compared to a single one, since two quadrature signals can be transmitted through a single channel. This is equivalent to single-lane absolute PSK at 180° . An increase in frequency efficiency reduces the main problem of radio communication: the shortage of frequency resources. Communication with mobile objects is carried out only by radio. Therefore, maximizing the immunity of radio communications contributes to improving their safety, in particular, increases train traffic safety. However, absolute DPSK at 180° is not used in practice due to the fact that positive discrete pulses are perceived as negative and vice versa. This phenomenon is called «reverse operation of coherent detectors» [2]. To eliminate it, new circuits of coherent detectors were developed that generate the carrier frequency oscillation from the input signal. The first coherent detector was A. A. Pistolkors’s detector, developed in 1933, on which its reverse operation was discovered. In 1937 the coherent detector of V. I. Siforov was invented followed in 1945 by D. V. Ageev’s detector. In 1954, the coherent detector of Costas, an American scientist in the field of radio communications,

began to be used. None of the above detectors eliminated reverse operation, which is confirmed by the corresponding research sources quoted in this article [1–8]. Therefore, it was concluded that reverse operation is unavoidable [10]. In this regard, in 1954 the Russian scientist N. T. Petrovich proposed [1] a relative PSK (RPSK) at 180° [2; 10], which practically [1; 9] eliminated reverse operation of the coherent detector [9]. However, relative phase shift keying, from the point of view of noise immunity, is inferior to the absolute one.

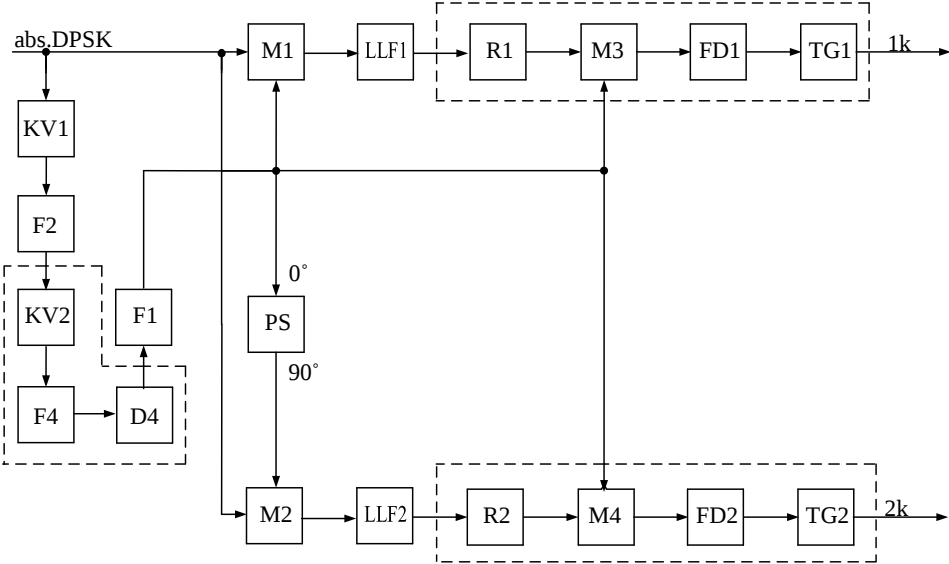
The *objective* of the study is to eliminate reverse operation using various methods.

- 1. a detector of signals without reverse operation with absolute PSK at 180° is proposed;
- 2. filter-phase method of forming single sideband with phase shift keying at 180° (SSB PSK).

1. Block diagram of the developed coherent detector

The block diagram of the developed coherent detector [3] is shown in Pic. 1.

In this picture it is indicated [14]: F – harmonic filters; KV – quadrator; D4 – frequency divider by 4; PS – phase shifter by 90° ; LFF – low frequency filters; M – signal multipliers; R – pulse regenerators; FD – frequency detectors; TG – triggers. Blocks KV1, F2, KV2, F4, D4, F1 form a reference



Pic. 1. Block diagram of a coherent detector.



Table 1

Variants of the difference of functions $\gamma(t)$

Variants $(\gamma_2(t) - \gamma_1(t)) \cdot \pi/2$	Terms $\sin [(\gamma_2(t) - \gamma_1(t)) \cdot \pi/2]$
$(+1 - (+1)) \cdot \pi/2 = 0$	$\sin 0 = 0$
$(+1 - (-1)) \cdot \pi/2 = \pi$	$\sin \pi = 0$
$(-1 + (+1)) \cdot \pi/2 = 0$	$\sin 0 = 0$
$(-1 + (-1)) \cdot \pi/2 = -\pi$	$\sin (-\pi) = 0$

Table 2

Variants of the sum of functions $\gamma(t)$

Variants $[\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2]$	Terms $\sin \{2\omega_0 t + [\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2] \cdot \pi/2\}$
$(1 + 1 - 2) \cdot \pi/2 = 0$	$\sin 2\omega_0 t$
$(1 - 1 - 2) \cdot \pi/2 = -\pi$	$-\sin 2\omega_0 t$
$(-1 + 1 - 2) \cdot \pi/2 = -\pi$	$-\sin 2\omega_0 t$
$(-1 - 1 - 2) \cdot \pi/2 = -2\pi$	$\sin 2\omega_0 t$

waveform shaper (RWS), which eliminates PSK by 180° .

The input signal $u_{in}(t)$ with an absolute DPSK at 180° is fed to some inputs of both coherent detectors directly and in parallel to their other inputs through RWS. This input signal consists of the sum of two quadrature signals with 180° absolute single PSK. Each such signal with a single PSK $u_{psk}(t)$ is equal to the difference between the amplitude-manipulated signal $u_{am}(t)$ and its oscillation of the carrier frequency $u_c(t)$, the amplitude of which is 2 times less than the amplitude of the signal $u_{am}(t)$ [5], that is:

$$\begin{aligned} u_{psk}(t) &= u_{am}(t) - 0,5 \cdot u_c(t) = \\ &= U_m(t) \cdot u(t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) - 0,5 U_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) = \\ &= U_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot [u(t) - 0,5] = \\ &= 0,5 \cdot \gamma(t) \cdot U_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0), \end{aligned}$$

where manipulating signals are:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < t < \tau_0, \\ 0 & \text{if } -\tau_0 < t < 0, \end{cases}$$

$$\gamma(t) = \begin{cases} +1 & \text{if } 0 < t < \tau_0; \\ -1 & \text{if } -\tau_0 < t < 0. \end{cases}$$

This means that the signals from ASK and PSK [13] are equal to the product of the oscillation of the carrier frequency $u_c(t)$ and of the manipulating signals, respectively, $u(t)$ and $\gamma(t)$ [16]. In this case:

$$\begin{aligned} u_{psk1}(t) &= \gamma_1(t) \cdot U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= \pm U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = U_m \sin[\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}]; \\ u_{psk2}(t) &= \gamma_2(t) \cdot U_m \sin\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) = \pm U_m \sin\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= U_m \sin[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}] = U_m \cos[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}]. \end{aligned}$$

That is, input signal with absolute DPSK at 180° is described as follows:

$$\begin{aligned} u_{in}(t) &= u_{psk1}(t) + u_{psk2}(t) = \\ &= U_m \left\{ \sin\left[\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}\right] + \cos\left[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}\right] \right\}. \end{aligned}$$

This input signal is squared in KV 1 block. Denoting the first term as $\sin \alpha$, and the second as $\cos \beta$, we have at the output of KV signal block:

$$\begin{aligned} u_{kv1}(t) &= u_{in1}(t) + u_{in2}(t) = U_m^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta) = \\ &= U_m^2 (\sin^2 \alpha + 2 \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos^2 \beta), \end{aligned}$$

where:

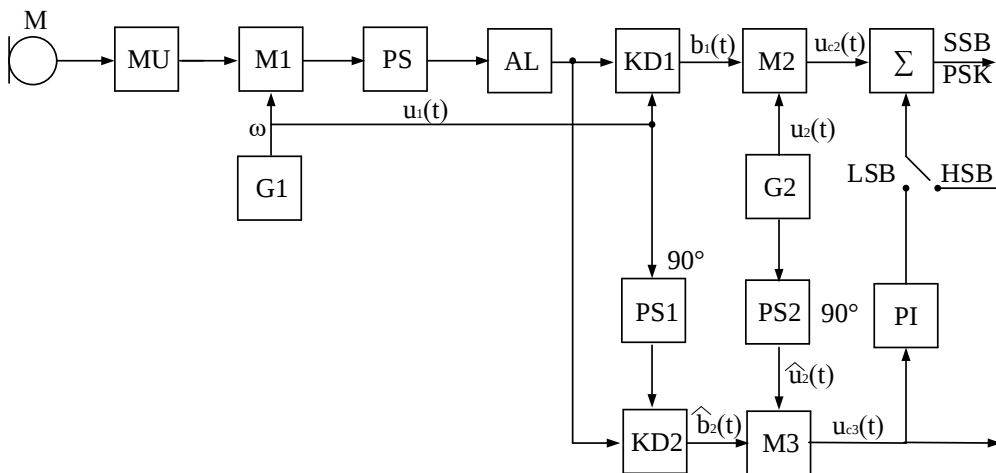
$$\begin{aligned} \sin^2 \alpha &= \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} = \\ &= \frac{1 - \cos[2\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \pi]}{2} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos^2 \beta &= \frac{1 + \cos 2\beta}{2} = \\ &= \frac{1 + \cos[2\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \pi]}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 \sin \alpha \cdot \cos \beta &= \sin(\beta - \alpha) + \sin(\beta + \alpha) = \\ &= \sin[\gamma_2(t) - \gamma_1(t)] \cdot \frac{\pi}{2} + \sin[2\omega_0 t + [\gamma_1(t) + \gamma_2(t) - 2] \cdot \frac{\pi}{2}]. \end{aligned}$$

As a result at the output KV 1 we get an oscillation:

$$\begin{aligned} u_{kv1}(t) &= U_m^2 \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t + \sin[\gamma_2(t) - \right. \\ &\quad \left. - \gamma_1(t)] \cdot \frac{\pi}{2} + \sin[2\omega_0 t + [\gamma_2(t) + \gamma_1(t) - 2] \cdot \frac{\pi}{2}] \right\} = \\ &= 1 + \sin[\gamma_2(t) - \gamma_1(t)] \cdot \frac{\pi}{2} + \sin[2\omega_0 t + [\gamma_2(t) + \gamma_1(t) - 2] \cdot \frac{\pi}{2}]. \end{aligned}$$



Pic. 2. Circuit of filter-phase method of RWS.

Although $\gamma_f(t) = \pm 1$ and $\gamma_x(t) = \pm 1$, but their sum and difference may be different. Therefore, we will compile tables considering the sums and differences $\gamma_f(t)$ and $\gamma_x(t)$.

According to Table 1 sine of the difference $(\gamma_x(t) - \gamma_f(t)) \cdot \pi/2$ is 0, and according to Table 2, the sum $[\gamma_f(t) + \gamma_x(t) - 2] \cdot \pi/2$ does not eliminate PSK by 180° (second column of Table 2). Therefore, the second quadrator KV2 is introduced, at the input of which the signal from the output of KV1 comes through a capacitor and a second harmonic filter F2. At the output of KV2 there is a signal:

$$u_{kv2}(t) = (\pm U_m^2 \sin(2\omega_0 t))^2 = U_m^4 \sin^2 2\omega_0 t = U_m^4 \cdot \frac{1 - \cos 4\omega_0 t}{2} = 0,5 U_m^4 - 0,5 U_m^4 \cos 4\omega_0 t.$$

It can be seen that the signal from KV2 does not contain the manipulating signals $\gamma_x(t)$ and $\gamma_f(t)$, and therefore it is fed to the frequency divider by a factor of 4, which is a double D-trigger with an amplitude-limiting amplifier at its input. From the direct output of the first D-trigger, an oscillation $u_{df}(t) = U_m \cos \omega_f t$ is fed through the resonant circuit of the first harmonic with a zero initial phase to the second input of the multiplier M1 of the coherent detector of the in-phase channel, and from the direct output of the second D-trigger, a quadrature oscillation

$$u_0(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2})$$

is supplied through the resonant circuit of the first harmonic to the second input of the

multiplier M2 of the coherent detector of the quadrature channel. At the output of the multipliers M1 and M2, oscillations are obtained:

$$\begin{aligned} u_{c1}(t) &= u_m(t) \cdot u_0(t) = U_m \{ \cos[\omega_0 t + (\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2}] + \\ &+ \cos[\omega_0 t + (\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}] \} U_m \cos \omega_0 t = \\ &= 0,5 U_m^2 \left\{ \cos(\gamma_1(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \cos[(\gamma_2(t) - 1) \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}] \right\} + \\ &+ \text{high frequency} = 0,5 U_m^2 [\pm 1 + 0] + \text{high frequency}; \end{aligned}$$

LFF (low frequency filter) at the output M1 and M2 eliminates high frequency oscillations, leaving only transmitted digital signals $\gamma_f(t) = \pm 1$ and $\gamma_x(t) = \pm 1$.

But for absolute DPSK by 180 we get the reference oscillation $u_0(t) = \pm \sqrt{u_m^4(t)}$. The $\pm$ signs are equally probable and, therefore, interference or other processes in the receiver can cause a change in the signal phase by 180° for $u_{df}(t)$, which is the source of the reverse operation of coherent detectors, since the detected pulses are in phase with $u_{df}(t)$. The reference oscillation $u_{df}(t)$ passes through the resonant circuits F2, F4, F1, and therefore turns out to be practically free of interference, and the coherently detected pulses do not contain the quadrature component of the interference. They can be regenerated by amplification-limiting in amplitude and thereby additionally suppress the noise accompanying them. Since the reference oscillation $u_{df}(t)$ and the detected pulses are in phase, their multiplication by each other

excludes a change in the signal phase by 180° , as in the multiplication of harmonic oscillations:

$$u_n(t) = b(t) \cdot u_c(t) = U_\Omega \cos(\Omega t + 180^\circ) U_c \cos(\omega t + 180^\circ) = 0,5 U_\Omega U_c [\cos(\omega - \Omega)t + \cos(\omega + \Omega)t].$$

The multiplication of alternating pulses with oscillation of the carrier frequency, as shown at the beginning of the article, is an absolute one-time PSK by 180° , which in this case is practically free of noise and distortion. Since DPSK signals are already separated from each other, it is possible to multiply $\gamma_1(t)$ and $\gamma_2(t)$ only with $u_0(t)$ as shown in Pic. 1. Such a signal can be detected incoherently without changing the noise immunity of radio communication due to the absence of interference. In this case, it is proposed to use a trigger and a frequency detector at the output, since the phase $\varphi(t)$ and the angular frequency $\omega(t)$ are related by the ratio: $\omega(t) = d\varphi/dt$, and its reverse operation cannot be eliminated in principle.

Such a detector had already been proposed instead of the coherent Pistolkors detector back in 1951 [2], however, due to interference at its input, it did not find practical application. In the considered case, interference at its input is practically absent and therefore it can be used.

2. One single-sideband absolute PSK at 180° , equivalent in frequency efficiency to double PSK at 180°

This single-sideband absolute PSK (SSB PSK) at 180° was developed by the authors [17], its structural diagram is shown in Pic. 2.

The indices in the diagram [18] are: BF – band-pass filter; Σ – adder; M1, M2, M3 – signal multipliers; G1, G2 – generators; KD1, KD2 – coherent detectors; PS1, PS2 – 90° phase shifters; AL – amplitude limiter; PI – phase inverter.

At the output of KD1 there is a clipped [12] speech signal $b_1(t)$, and at the output of KD2 there is a quadrature speech signal. In this case, taking into account the fact that the signals are periodic, we have:

$$b_1(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin k\omega t}{k};$$

$$b_2(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos k\omega t}{k}.$$

At the output M2 the function is formed:

$$U_{n2}(t) = b_1(t) \cdot u_{c2}(t) = \left(\frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin k\omega t}{k} \right) \cdot U_c \sin \omega t = \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega - k\omega)t}{k} - \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega + k\omega)t}{k}.$$

And at the output of M3 there is the oscillation:

$$U_{n3}(t) = \widehat{b}_2(t) \cdot \widehat{u}_{c2}(t) = \left(\frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos k\omega t}{k} \right) \cos \omega t = \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega - k\omega)t}{k} + \frac{U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega + k\omega)t}{k}.$$

The adder Σ contains the signal:

$$u_0(t) = u_{n2}(t) + u_{n3}(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega - k\omega)t}{k},$$

which lower sideband (SSB PSK at 180°).

When subtracting (when $b_2(t)$ passes through PI block):

$$u_0(t) = u_{n2}(t) - u_{n3}(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(\omega + k\omega)t}{k},$$

There is higher sideband (SSB PSK at 180°).

With SSB PSK, the interference is 2 times less than with two sidebands, and therefore, with their equal amplitudes, the noise immunity of radio communication with SSB PSK will be 180° greater than with two side bands [7].

Conclusions.

1. A circuit of a coherent signal detector was proposed [11], with the exclusion of its reverse operation, which makes it possible to implement DPSK at 180° in practice. The novelty of the proposal is confirmed by the Russian invention patent [11].

2. It is shown that for formation of the reference oscillation $u_0(t) = U_m \cos \omega_0 t$ according to the input signal with absolute DPSK at 180° , the second quadrator KV2 is required, and a frequency divider should need to divide frequency not by 2, but by 4.

3. It is shown [5] that the sources of reverse operation of a coherent detector with absolute DPSK, when +1 is converted to -1 and vice versa, are random and unremovable jumps in the phase of the reference

oscillation obtained from the input signal [14] with absolute DPSK at 180° , which are in phase with coherently detected pulses.

4. It is proposed to eliminate phase jumps by 180° for $u_0(t)$ and for detected alternating pulses by multiplying them by each other, which forms an absolute PSK by 180° practically without noise and distortion. There is no interference for $u_0(t)$ due to its filtering by resonant circuits of the second, fourth and first harmonics. There is no interference for detected pulses either due to coherent detection and their regeneration by amplification-limiting.

5. It is proposed to use a frequency detector with a trigger (integrator) at its output as a detector of multiplied signals according to clause 4, since the phase $\varphi(t)$ and the angular frequency $\omega(t)$ are related by the ratio: $\omega(t) = d\varphi/dt$. Such a detector had already been proposed [19] as the main one (instead of the Pistolcors detector) back in 1951, but did not find application due to interference at its input. In our case, there is practically no interference and distortion at its input.

6. To increase the frequency efficiency by 2 times, the authors proposed single-band absolute PSK at 180° operated with filter-phase method with clipping, which is equivalent by this indicator to absolute DPSK at 180° . The Russian invention patent was obtained [17].

REFERENCES

1. Petrovich, N. T. Transmission of discrete information through channels with phase-shift keying [*Peredacha diskretnoi informatsii v kanalakh s fazovoi manipulyatsiei*]. Moscow, Svyaz publ., 1965, 423 p.
2. Volkov, A. A., Kuzyukov, V. A., Zhuravlev, O. E. Method of restoring the envelope of a clipped speech signal [*Sposob vosstanovleniya ogibayushchei u klippirovannogo rechevogo signala*]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2013, Iss. 4, pp. 51–54. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22025462>. Last accessed 05.03.2020.
3. Rappoport, Th. S. *Wireless Communications (Principles and Practice)*. New York, IEEE Press, 1996, 641 p.
4. Prokis, J. Digital communication. Trans. from English. Ed. by D. D. Klovsky. Moscow, Radio i svyaz publ., 2000, 797 p.
5. Zyuko, A. G., Korobov, Yu. F. The theory of signal transmission [*Teoriya peredachi signalov*]. Moscow, Radio i svyaz publ., 1972, 360 p.
6. Volkov, A. A. Radio transmitting devices [*Radioperedayushchie ustroystva*]. Moscow, Marshrut publ., 2002, 352 p.
7. Verzunov, M. V. Single-band modulation in radio communications [*Odnopolosnaya modulyatsiya v radiosvyazi*]. Moscow, Voenizdat publ., 1972, 295 p.

8. Sklyar, B. Digital communication. Theoretical foundations and practical application [*Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye*]. Moscow, Williams publ., 2007, 1098 p.
9. Russian utility model patent No. 163281 Signal detector with absolute PSK at 180° [*Patent RF na PM No. 163281 Detektor signalov s absolyutnoi FMn na 180°*]. A. A. Volkov, M. S. Morozov. Priority dated 18.04.2016. Publ. 10.07.2016 in BI No. 19 for 2016 [Electronic resource]: https://yandex.ru/patents/doc/RU163281U1_20160710. Last accessed 05.03.2020.
10. Volkov, A. A., Morozov, M. S. A method for implementing an absolute PSK at 180° [*Sposob realizatsii absolyutnoi FMn na 180°*]. *Elektrosvyaz*, 2017, Iss. 2, pp. 72–74. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28370759>. Last accessed 05.03.2020.
11. Russian invention patent. Coherent signal detector with two-fold absolute phase-shift keying at 180° [*Patent RF na izobretenie. Kogerentniy detektor signalov s dvukratnoi absolyutnoi fazovoi manipulyatsiei na 180°*]. A. A. Volkov, M. S. Morozov. Priority dated 26.12.2018. Publ. 13.02.2020 Bul. No. 5. [Electronic resource]: https://patents.s3.yandex.net/RU2714222C1_20200213.pdf. Last accessed 05.03.2020.
12. Petrovich, N. T., Kozlenko, N. I. Transfer of clipped speech signals using phase telegraphy [*Peredacha klippirovannykh rechevykh signalov s pomoshchyu fazovoi telegrafii*]. *Radiotekhnika*, 1964, Iss. 11, pp. 21–24.
13. Shevlyugin, M. V., Dang, V. P. Harmonic Interference of Traction Current in Metro Power Supply System. *World of Transport and Transportation*, 2015, Vol. 13, Iss. 6, pp. 88–101. [Electronic resource]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/553/882>. Last accessed 05.03.2020.
14. Volkov, A. A., Volkova, I. A. Coherent detector of radio signals with phase shift keying at 180° Patent for invention RU2439830 C1, 10.01.2012, Application No. 2010115998/08 dated 23.04.2010 [*Kogerentniy detektor radiosignalov s fazovoi manipulyatsiei na 180° Patent na izobretenie RU2439830 C1, 10.01.2012. Zayavka № 2010115998/08 ot 23.04.2010*]. [Electronic resource]: https://yandex.ru/patents/doc/RU2439830C1_20120110. Last accessed 05.03.2020.
15. Academy of Sciences of USSR No. 1522376. Device for recovering the carrier frequency from a single-band baseband signal [*Ustroystvo vosstanovleniya nesuschei chastoty iz odnopolosnogo modulyruiushchego signala*]. A. A. Volkov. Priority dated 11.08.87, Publ. 13.11.89, in BI No. 42. [Electronic resource]: https://yandex.ru/patents/doc/SU1522376A1_19891115. Last accessed 05.03.2020.
16. Zyuko, A. G., Klovsky, D. D., Korzhik, V. I., Nazarov, M. V. Theory of electrical communication [*Teoriya elektricheskoi svyazi*]. Moscow, Radio i svyaz, 1988, 433 p.
17. Russian utility model patent No. 135464. Single-band clipped signal generator with PSK at 180° [*Formirovatel' odnopolosnogo klippirovannogo signala s FMn na 180°*]. A. A. Volkov, V. A. Kuzyukov, K. G. Khranov. Priority dated 24.05.2013 Publ. 10.12.2013 in BI No. 34]. [Electronic resource]: https://yandex.ru/patents/doc/RU135464U1_20131210. Last accessed 05.03.2020.
18. Volkov, A. A., Kuzukov, V. A. Improving of clipped speech signals. *World of Transport and Transportation*, 2013, Vol. 11, Iss. 5, pp. 38–43. [Electronic resource]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/446/703>. Last accessed 05.03.2020.
19. USSR author's certificate No. 100138. Reception of phase telegraphy without a synchronous heterodyne [*Priem fazovoi telegrafii bez sinkhronnogo geterodina*]. L. I. Yaroslavsky [et al]. Priority dated 1951. ●





Оценка потерь бункерного СПГ от испарения



Олег ТАРОВИК



Александр РЕУЦКИЙ



Александр ТОПАЖ

Таровик Олег Владимирович – Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия.
Реуцкий Александр Сергеевич – Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия.
Топаж Александр Григорьевич – Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия*.

Анализ эффективности транспортных систем, использующих сжиженный природный газ (СПГ) в качестве топлива, невозможен без комплексного понимания объёмов потерь топливного СПГ от испарения в ходе основных технологических операций: перевозки (хранения), бункеровки и захлаживания топливных ёмкостей. Несмотря на активное развитие водного и наземного газомоторного транспорта, практические подходы для получения соответствующих оценок в широком диапазоне характеристик грузовых ёмкостей ранее не публиковались.

Целью настоящей работы является анализ потерь СПГ в автомобильных, железнодорожных и судовых цистернах (ёмкостью до 5600 м³), а также в танк-контейнерах при условии хранения СПГ с избыточным давлением около 5–7 атмосфер.

В работе в качестве метода использовано численное моделирование. Процесс испарения СПГ описывается с помощью моделей теплообмена между жидкой фазой СПГ, его парами, а также грузовым танком и внешней

средой. Это позволяет моделировать поведение и фазовые превращения СПГ при его хранении в ёмкости, а также в ходе основных технологических операций. Численное моделирование термодинамических процессов при хранении СПГ производится с помощью компьютерной имитационной модели, реализованной в среде AnyLogic. Количественные оценки потерь СПГ при бункеровке и захлаживании топливных танков получены на основе аналитических расчётов.

Анализ чувствительности созданных моделей к различным параметрам, а также массовые численные расчёты позволили построить регрессионные зависимости для определения потерь СПГ в ходе рассматриваемых операций. Полученные зависимости могут быть использованы для поиска наиболее эффективных конфигураций системы малотоннажной перевозки СПГ, а также для выполнения экономических оценок целесообразности использования СПГ в качестве топлива на водном и наземном транспорте.

Ключевые слова: морской транспорт, сжиженный природный газ (СПГ), потери СПГ от испарения, судно-бункеровщик СПГ, бункеровка СПГ, захлаживание топливного танка, имитационная термодинамическая модель, регрессионный анализ.

*Информация об авторах:

Таровик Олег Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник самостоятельного сектора проектирования морских систем освоения шельфа ФГУП «КГНЦ» Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия, tarovik_oleg@mail.ru.

Реуцкий Александр Сергеевич – инженер I категории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия, reuckii_aleksandr@mail.ru.

Топаж Александр Григорьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия, alex.topaj@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 16.01.2020, принята к публикации 29.05.2020.

For the English text of the article please see p. 96.

ВВЕДЕНИЕ

Сжиженный природный газ (СПГ) всё чаще используется в качестве топлива на различных видах транспорта. Однако ряд аспектов использования этого нетипичного вида топлива в настоящее время является слабо изученным. В частности, актуальной практической задачей является исследование вопросов потерь СПГ в ходе его транспортировки и выполнения ряда технологических операций, таких, как захлаживание (снижение температуры грузовой ёмкости до -130°C перед непосредственной подачей в неё СПГ) и бункеровка грузовых танков (перемещение СПГ из ёмкости-источника в ёмкость-получатель с захлаживанием остатков СПГ в ёмкости-получателе).

Для решения задач технико-экономического обоснования и оптимизации систем транспортировки СПГ необходимо иметь достаточно простые расчётные зависимости, позволяющие оценивать объёмы потерь груза при транспортировке в виде функций от длительности рейса, характеристик изоляции, температуры окружающей среды и других факторов, которые оказывают влияние на интенсивность испарения. Аналогичные зависимости необходимы для определения потерь СПГ при захлаживании и бункеровке грузовых ёмкостей. Наличие таких зависимостей позволит обоснованно подходить как к вопросу проектирования транспортных средств по доставке СПГ (выбор проектной скорости доставки, соотношение стоимость/эффективность применяемого изоляционного материала и т.п.), так и к прогнозу потерь СПГ при решении задач оперативного планирования работы транспортных средств (составление расписаний движения, прогноз параметров груза в точке доставки и другие). Разработка таких зависимостей является целью настоящего исследования.

Необходимо отметить, что авторам не удалось найти подобных исследований ни в отечественной, ни в зарубежной печати, что, очевидно, обусловлено новизной этой тематики в целом. Множество зарубежных исследований сосредоточены на термодинамическом моделировании процесса хранения СПГ при атмосферном давлении [1; 2]. Этот способ

хранения и транспортировки СПГ является преобладающим с точки зрения объёмов перевозок, поэтому вопрос анализа и прогнозирования потерь от испарения по всей цепочке поставок [3] является достаточно важным. Однако при этом, как правило, используются самые простые способы определения суточных потерь СПГ, основанные на статистических данных. Например, потери СПГ при транспортировке морскими судами-газовозами составляют $0,10\text{--}0,15\%$ от вместимости судна при движении в грузу и $0,06\text{--}0,10\%$ при движении в балласте [4]. Те немногие исследования, которые затрагивают вопрос потерь СПГ при его хранении в условиях избыточного давления $5\text{--}7$ атмосфер, сосредоточены в основном на операционном аспекте, например, на работе судов-бункеровщиков [5]. Таким образом, выполнение настоящего исследования является актуальным.

1. РАСЧЁТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ СПГ

Для решения поставленной задачи были созданы специализированные термодинамические модели, позволяющие описывать процессы хранения СПГ, бункеровки и захлаживания ёмкостей, а также разработана стохастическая модель динамики температур воздуха в течение рейса. Детальное описание расчётных соотношений термодинамических моделей, а также функциональные зависимости параметров природного газа от температуры и давления приведены в монографии [6]. Здесь же отметим только базовые расчётные соотношения и принятые допущения.

1.1. Термодинамическая модель для оценки потерь СПГ при хранении

Теплообмен между содержащейся в танке двухфазной средой в состоянии насыщения с температурой T и окружающей средой с температурой T_0 описывается уравнением теплопередачи:

$$dQ/dt = k \cdot (T_0 - T) \cdot F, \quad (1)$$

где Q — поступающая теплота, Дж;

t — время, с;

k — коэффициент теплопередачи $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;

F — площадь поверхности теплообмена, м^2 .



При использовании формулы (1) отдельно учитываются тепловые потоки Q_1 и Q_2 от внешней среды в жидкую и газообразную фазы соответственно. Эти потоки определяются площадями теплообмена между жидкостью и внешней средой F_1 и между паром и внешней средой F_2 . Температура окружающей среды T_0 рассматривается как внешний динамический параметр. Коэффициент теплопередачи k для стенки, состоящей из слоёв стали и теплоизоляции, определяется по стандартным зависимостям [6, с. 69].

Теплообмен между находящимися при разной температуре жидкостью и газом через границу раздела подчиняется уравнению Ньютона–Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3, \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, Вт;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;

T_1 и T_2 – температуры жидкой и газовой фаз соответственно;

F_3 – площадь поверхности раздела фаз, м².

Фазовые переходы между агрегатными состояниями (испарение жидкости и конденсация газа) приводят к изменению давления газовой подушки над жидкой поверхностью и, соответственно, к изменению термодинамических показателей (температура кипения, теплоёмкость и другие). При поступлении теплоты к жидкой фазе для перехода в новое состояние насыщения происходит испарение жидкости, у неё отбирается теплота. Этот процесс испарения в модели описывается соотношением:

$$dM = dQ/r, \quad (3)$$

где dM – приращение массы (кг) паровой фазы при поступлении теплоты dQ (Дж) к жидкой фазе в состоянии насыщения;

r – теплота парообразования СПГ, которая является функцией температуры насыщения (и, тем самым, – давления насыщения), Дж/кг.

При поступлении теплоты к паровой фазе или наличии недогретой жидкости для достижения состояния насыщения происходит конденсация паров – жидкость воспринимает теплоту газовой фазы. Этот процесс описывается уравнением теплового баланса между переданной от пара и воспринятой жидкостью теплотой:

$$\alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3 \cdot dt = G \cdot di, \quad (4)$$

где G – масса выпавшего конденсата, кг;

di – разность энтальпий перегретого пара и жидкости в состоянии насыщения, Дж/кг.

Использование приведённых зависимостей позволяет реализовать алгоритм последовательного пересчёта характеристик состояния жидкости и газа внутри ёмкости. В настоящей работе такой алгоритм был реализован с помощью модификации разработанной ранее в среде *AnyLogic* компьютерной имитационной модели системной динамики [7], в которую также интегрирован стохастический генератор температуры окружающей среды. Отметим несколько аспектов реализации имитационной модели.

Давление паров внутри резервуара не может превышать некоего максимального давления, допускаемого конструкцией ёмкости, и давлением регулировочного клапана. Поэтому при повышении давления выше максимального производится сброс некоторой малой массы паров СПГ, который трактуется как безвозвратная потеря. При численной реализации модели полагается единовременный сброс 5 кг пара, что на 3–4 порядка меньше массы СПГ в ёмкости и позволяет считать стравливание избытков паров практически равномерным. Указанная потеря массы паров позволяет сохранить равновесное состояние системы «жидкость–пар» внутри грузового резервуара, но при этом происходит скачкообразное изменение температуры и массы паровой и жидкой фаз. Моделирование такого события производится на основе допущения о динамической жёсткости системы. Согласно этому допущению, время протекания переходных процессов выравнивания температур в слоях жидкой фазы и возвращения системы к равновесному насыщенному состоянию при скачкообразном изменении условий полагается малым по сравнению с динамической фоновой процессом теплообмена с окружающей средой.

Практические расчёты базировались на конкретных типах криогенных ёмкостей: автоцистерна GT7 ППЦТ-60, вагонцистерна 15–5106 и танк-контейнер СПГ типа КЦМ 40/0,7. Также были рассмотрены судовые танки СПГ типа С цилиндрической формы вместимостью 1700 м³, 2800 м³



Рис. 1. Определение основных характеристик криогенных ёмкостей в среде SolidWorks.

Таблица 1

Основные характеристики рассматриваемых ёмкостей, полученные на основе анализа открытых материалов

Тип ёмкости	Геометрический объём, м ³	Максимально допустимое давление внутри ёмкости, бар	Начальный объём СПГ, м ³	Начальная масса СПГ, т	Тип изоляции (ЭВ – экранно-вакуумная, ВВ – волокнисто-вакуумная, П – пенополиуретан)	Коэффициент теплопроводности, изоляции Вт/м ²	Толщина слоя изоляции, м	Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·К
Автоцистерна GT7 СПГ ППЦТ-60	60,0	7	54,0	23,2	ЭВ	0,00145	0,12	0,012
Вагон-цистерна 15-5106	65,4	5	58,2	25,0	ВВ	0,002	0,14	0,014
Контейнер КЦМ-40	39,2	7	34,9	15,0	ЭВ	0,00145	0,10	0,015
Судовой танк 1700 м ³	1685	5	1500	645	П	0,024	0,60	0,040
Судовой танк 2800 м ³	2809	5	2500	1075	П	0,024	0,60	0,040
Судовой танк 5600 м ³	5618	5	5000	2150	П	0,024	0,60	0,040

и 5600 м³. Поскольку в открытом доступе имеются не все необходимые технические параметры этих ёмкостей, в среде *SolidWorks* были созданы их трёхмерные модели (рис. 1), которые позволили получить все необходимые геометрические и массовые параметры (табл. 1).

Помимо этого, на основе 3D-моделей ёмкостей были также построены зависимости безразмерных значений характерных площадей F_1 , F_2 и F_3 в виде функции от уровня наполнения. Эти зависимости далее использовались при выполнении расчётов.

1.2. Термодинамические модели для оценки потерь СПГ при захлаживании и бункеровке топливных резервуаров

Захлаживание топливного танка предполагает его охлаждение от некоторой

температуры $T_0 \geq 143 \text{ K}$ ($\approx -130^\circ\text{C}$) до температуры $T_{30} = 143 \text{ K}$ путём подачи малых порций СПГ. Равномерность захлаживания обеспечивается работой распылительных форсунок внутри танка. Получаемые в результате распыления капли СПГ испаряются, забирая теплоту у металлоконструкций и изоляции танка, поэтому захлаживание сопровождается интенсивным парообразованием.

Для снижения температуры танка необходимо испарить СПГ массой:

$$M_{3,1} = (\sum M_i \cdot c_i) \cdot \Delta T / r, \quad (5)$$

где M_i – массы жидкой и газообразной фаз СПГ в танке в начале процесса захлаживания, а также массы стенок и тепловой изоляции криогенного танка, кг;

c_i – теплоёмкости охлаждаемых масс, Дж/кг·К;

$\Delta T = (T_{30} - T_0)$ – градиент температур, представляющий собой разность между температурой ёмкости в начале T_0 и в конце T_{30} захлаживания, К.

Темп захлаживания ν_3 определяется допустимыми термическими напряжениями конструкций грузового резервуара и составляет, как правило, 5...10 К/час [8]. Время захлаживания t_3 можно определить по соотношению:

$$t_3 = \Delta T / \nu_3, \quad (6)$$

За это время в резервуар через изоляцию поступает теплота, которую также надо компенсировать впрыскиванием жидкого СПГ массой $M_{3,2}$. Определение количества СПГ, необходимого для компенсации тепла, поступившего за время t_3 , выполняется на основании формул (1)–(4).

Таким образом, масса СПГ, расходуемого на захлаживание ёмкости, определяется по соотношению:

$$M_3 = M_{3,1} + M_{3,2}, \quad (7)$$

Потери СПГ при бункеровке резервуара, предварительно охлаждённого до температуры $T_3 \leq T_{30}$ сжиженным природным газом, подаём при температуре $T_{\text{СПГ}} = 110$ К, могут быть рассчитаны аналогично, то есть как сумма потерь, обусловленных двумя процессами:

- охлаждение металлоконструкций, жидкости и пара внутри грузового танка от температуры T_3 до температуры $T_{\text{СПГ}}$;
- поступление теплоты через изоляцию грузового танка.

Описание соответствующего дифференциального уравнения, позволяющего определить температуру грузового танка и его содержимого в каждый момент операции бункеровки, приведено в [6, с. 84]. Анализ этой расчётной модели показал, что составляющей потерь СПГ, обусловленной поступлением теплоты извне грузового танка, можно пренебречь, поскольку для характерных значений теплопроводности изоляции ($k = 0,01...0,04$ Вт/м² · К) и длительности бункеровки (2...4 часа) её доля в общих потерях не превышает 1 %. Отметим, что в случае захлаживания грузового резервуара, этой составляющей пренебрегать нежелательно, т.к. длительность операции может достигать 30 часов, а относительная доля потерь из-за теплообмена с внешней средой при этом составляет 7...10 %.

Итак, с достаточной для решения практических задач точностью можно определять потери СПГ при бункеровке по соотношению (5), в котором значение градиента температур принимается равным $\Delta T = T_3 - T_{\text{СПГ}}$.

1.3. Стохастический генератор динамики забортовой температуры

Моделирование условного рейса транспортного средства, перевозящего СПГ, производится в предположении о стохастически изменяющейся температуре окружающей среды. При этом применяется подход, позволяющий смоделировать динамику колебаний температуры как случайный процесс с заданными автокорреляционными свойствами. Для этого в условных точках отправления и назначения в каждый такт модельного времени рассчитывается текущее значение температуры воздуха, которое определяется как величина детерминированного временного тренда плюс случайная добавка, моделируемая с помощью скалярного формирующего фильтра первого порядка (одномерный стохастический генератор погоды) [9]. Временной тренд температуры в обеих точках описывается как суперпозиция двух гармонических функций, представляющих собой годовой ход среднесуточной температуры и суточный ход температуры.

Таким образом, текущее значение температуры воздуха T в точках отправления (T_{dep}) и назначения (T_{des}) рассчитывается для каждого часа модельного времени t по соотношению:

$$T = T_d + 0,5 \cdot R_d \cdot \cos(2\pi/24 \cdot (h - 14)) + D \cdot x_h, \quad (8)$$

где R_d – заданная амплитуда суточного хода температуры;

h – текущее время суток в часах (0...24);

D – среднеквадратичное отклонение текущей температуры от среднего тренда, учитывающего годовой и суточный ход;

T_d – среднесуточное значение температуры в данной географической точке для данного дня календарного года;

x_h – случайная центрированная нормированная добавка к температуре (стохастическое возмущение среднего тренда).

Изменение среднесуточных температур T_d в точке отправления или назначения моделируется соотношением:

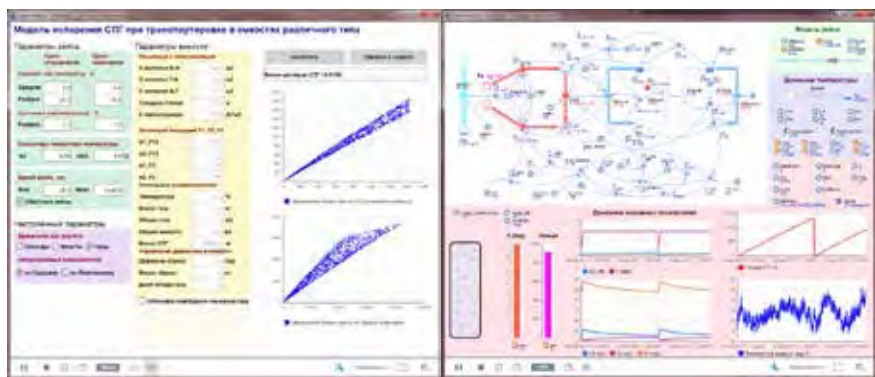


Рис. 2. Основное окно имитационного эксперимента (слева) и термодинамическая модель испарения СПГ (справа) в среде AnyLogic.

$T_d = T_{ave} + 0,5 \cdot R_y \cdot \cos(2\pi/365 \cdot (d - 200))$, (9)
где R_y – амплитуда годового хода среднесуточной температуры;

T_{ave} – среднегодовая температура;

d – номер текущего дня в году, отсчитываемый от 1 января.

Величина x_h вычисляется с помощью скалярного формирующего фильтра первого порядка, что позволяет отразить автокорреляционные свойства динамики аномалий температуры как случайного процесса:

$$x_h = \rho \cdot x_{(h-1)} + \sqrt{(1 - \rho^2)} \cdot \varepsilon;$$

$$x_h = \rho \cdot x_{h-1} + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \varepsilon, \quad (10)$$

где ε – случайная стандартизированная нормальная величина.

Величины T_{ave} , R_y и R_d задаются отдельно для географических точек отправления и назначения, а ρ и D считаются общими параметрами генератора погоды.

Температура T_0 за бортом транспортного средства определяется с помощью линейной аппроксимации между моделируемыми значениями температур между точками отправления T_{dep} и назначения T_{des} , исходя из известной длительности рейса.

$$T_0 = T_{dep} \cdot (1 - t/t_v) + T_{des} \cdot (t/t_v), \quad (11)$$

где t – время, прошедшее от начала рейса;

t_v – общее время рейса.

Для идентификации параметров генератора температур воздуха использовались данные многолетних исторических наблюдений на территории России [10]. Рассматривался некоторый условный рейс транспортного средства между городами Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Волгоград, Казань. В результате было

принято: $T_{ave} = 4...8 \approx 6^\circ\text{C}$, $R_y = 24...28 \approx 26^\circ\text{C}$, $R_d = 5...12 \approx 7^\circ\text{C}$. Параметры ρ и D были определены по результатам обработки многолетних данных фактических измерений температуры для опорных метеостанций Белогорка (Ленинградская область) и Саратов. В целом, можно заключить, что характерные значения этих параметров на территории центральной России оказываются достаточно стабильными: $\rho \approx 0,98$ (при часовом шаге генератора), $D = 3,1...7,8 \approx 5^\circ\text{C}$.

2. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЁТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Модель термодинамических процессов, происходящих при хранении СПГ, имеет динамический характер, поэтому она была реализована в среде AnyLogic совместно со стохастической моделью заборной температуры. Модели же для определения потерь СПГ при бункеровке и захлаживании статичны, поэтому они были выполнены в виде стандартных программных приложений, поддерживающих функции разового или множественного расчёта на основе набора входных параметров.

В графическом интерфейсе имитационного эксперимента (рис. 2) задаются параметры текущего варианта расчёта (длительность рейса, характеристики грузового танка, динамика изменения температур в рейсе), отслеживаются основные результаты, а также отображается ход исполнения [11].

Программные приложения для выполнения расчётов потерь СПГ при захлаживании и бункеровке топливного танка



Таблица 2

Расчёты потерь СПГ для автоцистерны типа GT7 ППЦТ-60

№	Дата начала рейса	Длительность, сут	Сумма градусо-дней, °С (отсчёт от -40°С)	Средняя температура в рейсе, °С	Потерянный СПГ, кг
Постоянная длительность рейса, постоянные градусо-дни					
1	11 янв	4,17	156,0	-2,55	320,2
2	22 мар	4,17	156,2	-2,52	320,4
3	2 апр	4,17	156,8	-2,36	320,6
4	1 ноя	4,17	156,5	-2,43	320,5
5	19 ноя	4,17	156,4	-2,45	320,4
Переменная длительность рейса, постоянные градусо-дни					
6	10 янв	4,83	156,3	-7,61	356,5
7	26 янв	5,03	156,2	-8,94	367,7
8	4 фев	5,37	156,6	-10,83	386,1
9	9 фев	5,09	156,1	-9,34	370,8
10	8 сен	2,83	156,4	15,21	247,8

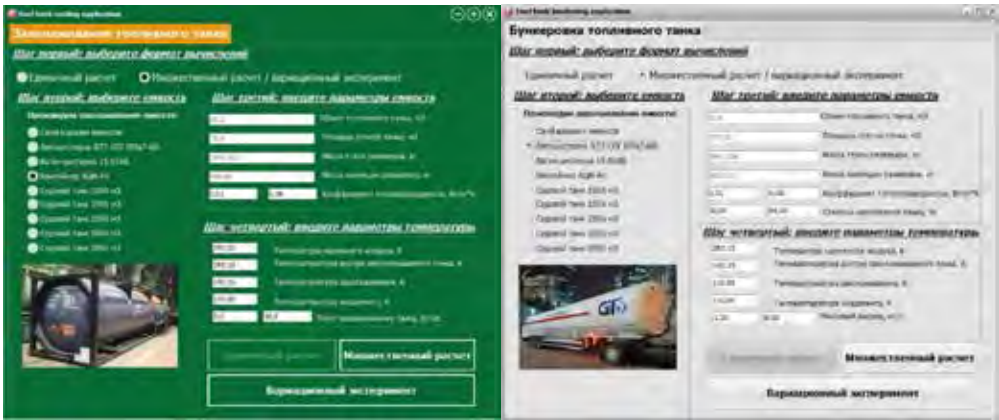


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программных приложений для расчётов захолаживания (слева) и бункеровки (справа) ёмкостей СПГ.

схожи между собой по функционалу и представляют собой расчётные модели, реализованные средствами *Embarcadero Delphi* (рис. 3). Графический интерфейс позволяет конфигурировать тип ёмкостей и начальные условия для выполнения расчётов.

3. РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ СПГ ПРИ
ХРАНЕНИИ

Для получения искомых регрессионных зависимостей, позволяющих определять потери СПГ от испарения в ходе рейса газотопливных транспортных средств, была выполнена серия массовых численных экспериментов. Начальная

температура грузового танка и его содержимого полагалась равной $T = 110\text{ K}$, а давление в танке в начале имитационного эксперимента принималось равным атмосферному.

В ходе серии имитационных экспериментов на основе приведённого в табл. 1 типоразмерного ряда топливных ёмкостей анализировалось влияние на конечные потери СПГ таких факторов, как объём танка, коэффициент теплопередачи изоляции, длительность рейса, среднерейсовая температура окружающей среды и другие. Всего было рассмотрено более 50 расчётных случаев, для каждого из которых выполнялось не менее 3000 условных рейсов транспортных средств,

что позволило добиться статистической репрезентативности результатов моделирования.

В первую очередь был выполнен анализ влияния динамики изменения температуры в ходе рейсов различной длительности на результирующие потери СПГ. Примеры таких расчётов приведены в табл. 2, где отображена выборка из результатов моделирования рейсов автоцистерны типа GT7 ППЦТ-60 при близком значении суммы градусо-дней (при расчёте суммы градусо-дней за точку отсчёта принимается температура -40°C).

В первом блоке расчётов постоянно время рейса и приблизительно одинакова сумма градусо-дней (или средняя температура в течение рейса), изменяется только дата начала рейса и связанный с нею характер изменения температур. Несмотря на разные даты и на очевидно различную динамику температур в течение рейса, масса потеряннного СПГ практически одинакова и колеблется в пределах $320,2...320,6$ кг. Второй блок расчётов представляет собой выборку результатов расчётов для той же автоцистерны, но при переменной длительности рейса. Из этих данных видна практически абсолютная корреляция потерь СПГ с длительностью рейса при условии приблизительно одинаковых значений суммы градусо-дней. Чем продолжительнее рейс, тем выше потери, при этом средняя температура в рейсе варьируется от -11°C до $+15^{\circ}\text{C}$. Эти результаты говорят о том, что динамика температур в рейсе оказывает пренебрежимо малое влияние на величины результирующих потерь СПГ, а определяющую роль играет именно сумма градусо-дней и длительность перевозок. Другими словами, при прогнозировании количества потерь СПГ достаточно знать длительность рейса и осреднённую температуру воздуха. Это обусловлено линейным и аддитивным характером рассматриваемого термодинамического процесса испарения СПГ.

На основании этих выводов, а также в результате обработки данных массовых расчётов была предложена регрессионная зависимость для определения массы сжиженного природного газа M_x , теряемого в ходе рейса (или при стационарном хра-

нении), как функции от четырёх параметров: длительности рейса, температуры в рейсе, коэффициента теплопередачи и массы перевозимого СПГ. Зависимость имеет следующий вид:

$$M_x = A \cdot k \cdot T_x^{0.884} \cdot t_{\text{cp}}^B, \text{ кг}, \quad (12)$$

где k — коэффициент теплопередачи тепла в СПГ от окружающей среды, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$;

T_x — длительность хранения СПГ, час;

t_{cp} — средняя температура воздуха, рассчитываемая путём усреднения температур в ходе рейса, K ;

$A = A(M_{\text{СПГ}})$ — регрессионный коэффициент, зависящий от начальной массы СПГ в грузовом танке;

$B = B(k)$ — регрессионный коэффициент, зависящий от характеристик теплоизоляции танка.

Оказалось, что для ёмкостей разного типа характерно одно значение регрессионного коэффициента, стоящего в качестве показателя степени параметра T_x . Это, вероятно, обусловлено одинаковым характером физических процессов, протекающих при испарении СПГ в различных ёмкостях. Также было установлено, что значение коэффициента A может быть связано с количеством перевозимого СПГ. В качестве показателя, характеризующего количество СПГ, можно принимать либо объём ёмкости, либо массу перевозимого в ней СПГ. Последний параметр является предпочтительным, поскольку позволяет учесть ограничения по уровню наполнения танка. Зависимость для определения коэффициента A имеет вид:

$$A = 2,76 \cdot 10^{-6} \cdot M_{\text{СПГ}}^{0.66}, R^2 = 0,999, \quad (13)$$

где $M_{\text{СПГ}}$ — масса хранящихся в ёмкости жидкой и газообразной фаз СПГ, кг;

R^2 — коэффициент детерминации.

Следует иметь в виду, что значение $M_{\text{СПГ}}$ соответствует максимальному уровню наполнения танка, составляющего около 90 % от геометрического объёма. Применение зависимости (12) при меньших уровнях наполнения приведет к недооценке объёмов потерь СПГ. Степень этой недооценки увеличивается по мере уменьшения уровня наполнения.

Зависимость $B = B(k)$ была найдена путём выполнения численных экспериментов с ёмкостью типа КЦМ-40/0,7 при изменении k в диапазоне от 0,002 до $0,150 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$. Полученная зависимость оказалась спра-



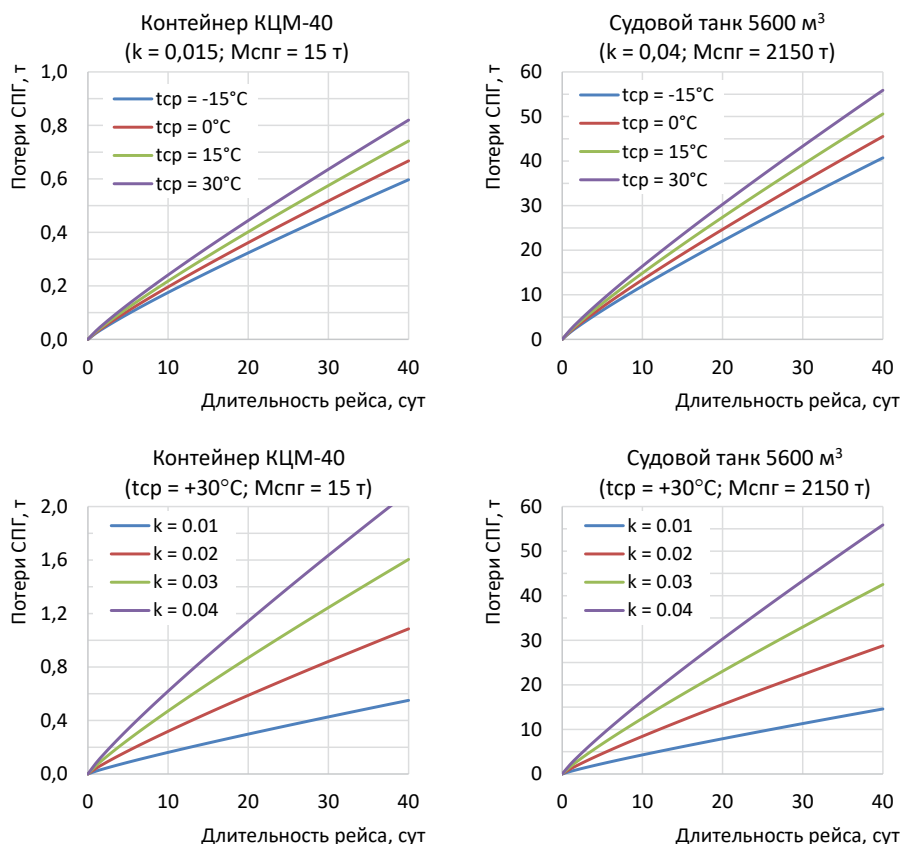


Рис. 4. Расчёты потерь СПГ для различных ёмкостей в зависимости от длительности рейса, средней температуры в рейсе и коэффициента теплопередачи.

ведливой и для ёмкостей других типов:

$$B = 1,98 - 0,253 \cdot k, R^2 = 0,9. \quad (14)$$

Точность аппроксимации результатов модельных расчётов зависимостью (12) оказалась весьма высокой, среднеквадратическое отклонение потерь СПГ составило 0,007 %...0,018 % от начальной массы для ёмкостей всех рассмотренных типов. Наибольшие относительные погрешности наблюдаются при малой длительности рейса. Иллюстрация значений потерь СПГ, получаемых на основе зависимости (12) при различных значениях среднерейсовых температур и коэффициента k , показана на рис. 4.

Для подтверждения точности полученных оценок было выполнено сопоставление расчётных потерь СПГ со спецификационными данными танк-контейнера КЦМ-40, согласно которым наибольшая возможная суточная потеря от испарения при стационарном хранении составляет 0,28 % при температуре наружного воздуха

306 К (33°C) и давлении внутри ёмкости 0,1 МПа. Расчётное значение коэффициента теплопроводности для цистерны этого типа составляет $k = 0,015$ Вт/м²·К (получено авторами на основании косвенных данных). Согласно зависимости (12) за первые сутки хранения СПГ при температуре 33°C испарится 32,1 кг СПГ, что составляет 0,21 % от общего количества СПГ. Полученный результат неплохо согласуется с натурными данными, особенно если учесть, что спецификационные данные обычно указываются с некоторым запасом, а также то, что фактическое значение коэффициента теплопроводности для цистерн этого типа может отличаться от принятого в расчётах.

4. РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ СПГ ПРИ ЗАХОЛАЖИВАНИИ

При исследовании процесса захлаживания топливной ёмкости учитывались

Таблица 3

Расчёты потерь СПГ при захлаживании контейнера КЦМ-40

№	Температура ёмкости в начале захлаживания, T_0 , К	Темп захлаживания, К/час	Коэффициент передачи тепла, Вт/м ² · К	Потерянный СПГ, кг
Постоянный коэффициент передачи тепла				
1	293,15	5,0	0,01	516
2	293,15	7,0	0,01	509
3	293,15	9,0	0,01	505
Постоянный темп захлаживания				
4	293,15	5,0	0,01	516
5	293,15	5,0	0,03	566
6	293,15	5,0	0,05	617

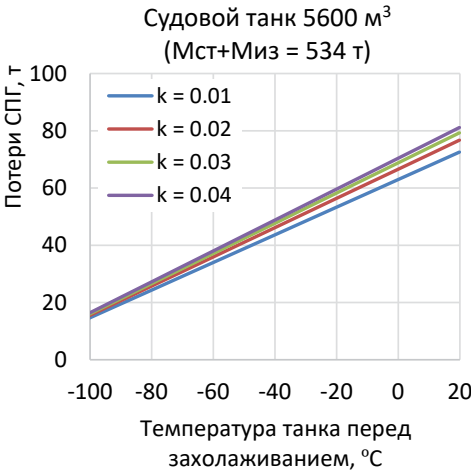
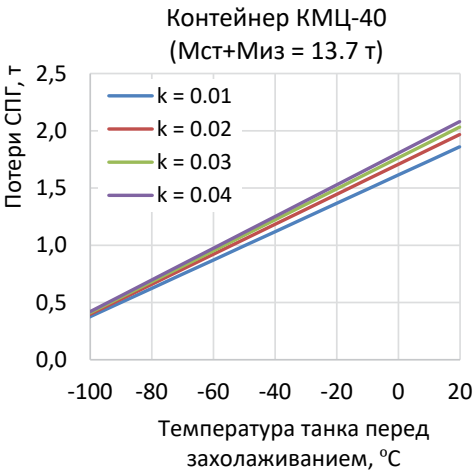


Рис. 5. Расчётные значения потерь СПГ при захлаживании.

такие факторы, как первоначальная температура внутри ёмкости T_0 , его собственная масса, теплопроводность изоляции и темп захлаживания. Результаты расчётов свидетельствуют о том, что последний параметр достаточно слабо влияет на количество теряемого СПГ. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты расчётов захлаживания контейнер-цистерны КЦМ-40 при постоянном значении температур топливного резервуара в начале и в конце этого процесса. Видно, что несмотря на изменение темпа захлаживания в диапазоне от 5 до 9 К/час, масса потерянного СПГ при постоянном k изменяется лишь на 2 %. Также в табл. 3 приведены результаты расчётов при переменном коэффициенте передачи тепла и постоянном темпе захлаживания. В этом случае существует сильная корреляция потерь СПГ с коэффициентом передачи тепла.

В результате была предложена следующая регрессионная зависимость для определения массы сжиженного газа M_3 , теряемой при захлаживании ёмкости до температуры $T_{30} = 143$ К:

$$M_3 = C \cdot k^D \cdot (M_{ст} + M_{из}), \text{ кг}, \tag{15}$$
 где $M_{ст}$ — масса стали криогенной ёмкости, кг;

$M_{из}$ — масса изоляции ёмкости, кг;

$C = C(T_0)$ — регрессионный коэффициент, зависящий от температуры T_0 ёмкости в начале захлаживания;

$D = D(M_{ст} + M_{из})$ — регрессионный коэффициент, зависящий от массы ёмкости.

В ходе численных экспериментов были получены следующие зависимости для определения коэффициентов C и D :

$$C = 0,00131 \cdot T_0 - 0,187, R^2 = 0,999; \tag{16}$$

$$D = 0,0046 \cdot \ln(M_{ст} + M_{из}) + 0,02, R^2 = 0,978. \tag{17}$$

Для приближенных оценок суммы масс $M_{ст}$ и $M_{из}$ судовых цилиндрических танков



Таблица 4

Расчёты потерь СПГ при бункеровке судового танка объёмом 1000 м³

№	Температура ёмкости в начале бункеровки, Т, К	Производительность насосов, кг/час	Коэффициент передачи тепла, Вт/м² • К	Потери СПГ, кг
Постоянный коэффициент передачи тепла				
1	143,15	20,0	0,01	13065
2	143,15	75,5	0,01	13055
3	143,15	130,0	0,01	13053
Постоянная производительность насоса				
4	143,15	20,0	0,01	13065
5	143,15	20,0	0,03	13091
6	143,15	20,0	0,05	13118

при известном геометрическом объёме V (м³) была получена следующая приближенная зависимость, справедливая при отношении длины танка к диаметру в диапазоне 4,2...5,0, расчётном избыточном давлении 4,5 атм. и изоляции танка из пенополиуретана толщиной 0,6 м.

$$(M_{ст}) + (M_{из}) = (60 \cdot V + 2900) + (620 \cdot V^{0.66}), \text{ кг.} \tag{18}$$

Примеры результатов расчётов по этой зависимости показаны на рис. 5. Масса КЦМ-40 принята согласно спецификационным данным равной 13,7 т. Из рисунка видно, что значение коэффициента теплопроводности k слабо влияет на результат, т.к. доля потерь СПГ, обусловленных поступлением тепла извне, невелика.

Среднеквадратическое отклонение величины потерь СПГ, рассчитанной по формуле (15), от результатов расчётов на основании точных алгоритмов составляет около 3 % ... 4 % от суммарных потерь на охлаждение ёмкости, что говорит о достаточной точности приближенной формулы.

5. РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ СПГ ПРИ БУНКЕРОВКЕ

При моделировании процесса бункеровки резервуара, предварительно охлаждённого до температуры $T_3 \leq T_{30}$, принималось несколько допущений, соответствующих наиболее вероятному эксплуатационному сценарию. Считалось, что в начале бункеровки топливный танк заполнен до минимально допустимого уровня (от 10 % до 50 % по объёму), а температура подаваемого бункерного СПГ

равна $T_{спг} = -161^{\circ}\text{C}$, причём в конце процесса бункеровки содержимое танка имеет температуру $T_{спг}$. Кроме того, полагалось, что работа насосного оборудования не влияет на нагрев СПГ и не оказывает значимого влияния на парообразование.

При анализе результатов расчётов было установлено, что длительность выполнения бункеровочных операций (т.е. производительность грузовых насосов) практически не влияет на количество образующегося отпарного газа. Характеристики тепловой изоляции и масса ёмкости также слабо сказываются на потерях газа. Для иллюстрации этих выводов в табл. 4 приведены результаты расчётов бункеровки судового танка объёмом 1000 м³ при постоянном значении температуры топливного резервуара в начале бункеровки.

Основное влияние на массу теряемого газа оказывают первоначальная температура внутри топливного танка и масса содержащихся в нём остатков СПГ. Чем ниже температура остатков СПГ, тем меньше потери при бункеровке. Аналогично, чем больше объём остаточного СПГ, требующего охлаждения до температуры $T_{спг}$, тем выше потери.

Эти результаты позволили сформировать следующую формулу для определения потерь СПГ в ходе бункеровки:

$$M_{\delta} = E \cdot M_{ост0}^F, \text{ кг,} \tag{19}$$

где $M_{ост0}$ – масса остатков СПГ, содержащихся в ёмкости в начале бункеровки (от 10 % до 50 % заполнения), кг;

$T_3 \leq 143 \text{ К}$ – температура предварительно захлажденной ёмкости, К;

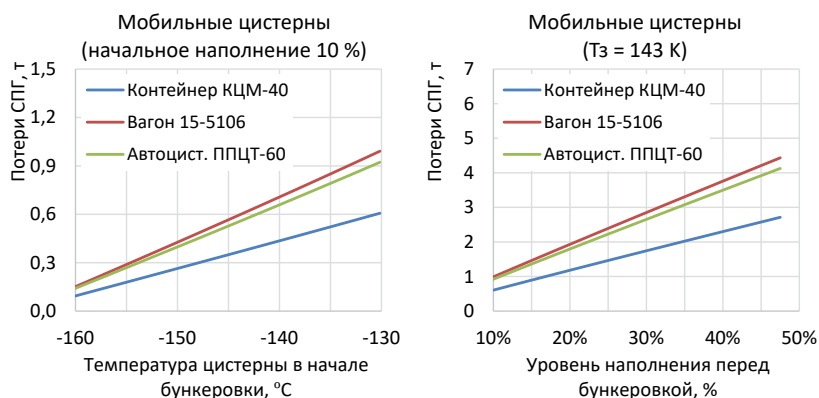


Рис. 6. Расчётные значения потерь СПГ при бункеровке мобильных цистерн.

$E = E(T_3)$, $F = F(T_3)$ – коэффициенты, зависящие от температуры ёмкости в начале бункеровки, полученные в ходе численных экспериментов.

$$E = 0,0116 \cdot T_3 - 1,248, R^2 = 0,999; \quad (20)$$

$$F = 1,895 \cdot 10^{-5} \cdot T_3^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \cdot T_3 + 1,133, R^2 = 0,999. \quad (21)$$

Среднеквадратическое отклонение регрессионных значений от модельных расчётов составляет 0,2 %...0,94 % от количества бункерного СПГ. Иллюстрация расчётных потерь СПГ, получаемых на основе расчётов по формуле (19), приведена на рис. 6.

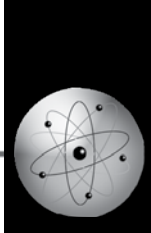
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предложены простые регрессионные зависимости для оценки потерь СПГ в ходе перевозки (хранения), бункеровки и захлаживания топливных танков различного типа. Зависимости получены путём обработки результатов серии компьютерных экспериментов с имитационной моделью и аналитических расчётов. Они применимы для ёмкостей с максимальным допустимым давлением до 7 атмосфер при произвольных значениях вместимости. Несмотря на то, что изначально в рамках исследования рассматривались конкретные типы грузовых танков, анализ результатов расчётов позволил предложить универсальные формулы для оценки потерь СПГ, которые могут быть использованы для выполнения оценочных расчётов для всех типов криогенных ёмкостей. Полученные результаты могут применяться при оптимизации систем малотоннажной перевозки СПГ, проектировании соответствующих транспортных средств, а также при выполнении различных технико-экономических оценок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adom, E., Islam, S.Z., Ji, X. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study. International Journal of Engineering and Technology, 2010, Vol. 2 (4), pp. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/15/S06.051>.
2. Wlodek, T. Prediction of boil off rate in liquefied natural gas storage processes. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, pp. 27–29. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/15>.
3. Dobrota, D., Lalic, B., Komar, I. Problem of Boil-off in LNG supply chain. Transactions on Maritime Sciences, 2013, Vol. 2, pp. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v02.n02.001>.
4. Glomski, P., Michalski, R. Problems with Determination of Evaporation Rate and Properties of Boil-off Gas on Board LNG Carriers. Journal of Polish CIMAC, 2011, Vol. 6 (1), pp. 133–140. [Электронный ресурс]: <http://www.polishcimeac.pl/Papers1/2011/014.pdf>. Доступ 16.01.2020.
5. Kim, K., Park, K., Roh, G., Chun, K. Case Study on Boil-Off Gas (BOG) Minimization for LNG Bunkering Vessel Using Energy Storage System (ESS). Journal of Marine Science and Engineering, 2019, Vol. 7 (5), 18 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7050130>.
6. Павловский В. А., Реуцкий А. С. Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа. – СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2019. – 170 с.
7. Топаж А. Г., Павловский В. А., Скуднєв С. А. Динамическая модель транспортировки сжиженного природного газа в судовых танках // Сб. трудов VII всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – 2015. – С. 275–279.
8. Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities. DNV GL Recommended practice (DNVGL-RP-0006:2014-01). [Электронный ресурс]: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2014-01/DNVGL-RP-0006.pdf>. Доступ 16.01.2020.
9. Май Р. И., Таровик О. В., Топаж А. Г. Моделирование морской погоды как входного сигнала имитационных моделей транспортных и экологических систем в арктическом регионе // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. 29. – № 3. – С. 20–38.
10. Новости погоды. [Электронный ресурс]: www.meteonovosti.ru. Доступ 16.01.2020.
11. Топаж А. Г., Реуцкий А. С., Таровик О. В. Программа для термодинамического моделирования испарения газа в топливных танках судов и танк-контейнерах // Св-во программы ЭВМ RU № 2018664683. Дата регистрации 20.11.2018.





Estimation of Evaporation Losses of Bunker LNG



Oleg V. TAROVIK



Alexander S. REUTSKY



Alexander G. TOPAZH

*Tarovik, Oleg V., Krylov State Scientific Center, St. Petersburg, Russia.
Reutsky, Alexander S., Krylov State Scientific Center, St. Petersburg, Russia.
Topazh, Alexander G., Krylov State Scientific Center, St. Petersburg, Russia*.*

ABSTRACT

Analysis of efficiency of transport systems using liquefied natural gas (LNG) as fuel is impossible without a comprehensive understanding of the volumes of fuel LNG losses from evaporation during main technological operations: transportation (storage), bunkering, and cool-down of fuel tanks. Despite active development of water and land natural gas vehicles, practical approaches for obtaining appropriate estimates in a wide range of characteristics of cargo tanks have not been previously published.

The objective of this work is to analyze LNG losses in road, rail and ship tanks (with a capacity of up to 5600 m³), as well as in tank containers, provided that LNG is stored with an overpressure of about 5–7 atmospheres.

In the work, numerical modelling was used as a method. The evaporation process of LNG is described using models of heat exchange between the liquid phase of LNG, its vapours,

as well as a cargo tank and the external environment. This makes it possible to simulate the behaviour and phase transformations of LNG during its storage in a tank, as well as during main technological operations. Numerical modelling of thermodynamic processes during storage of LNG is performed using a computer simulation model implemented in AnyLogic environment. Quantitative estimates of LNG losses during bunkering and cool-down of fuel tanks were obtained based on analytical calculations.

An analysis of sensitivity of the created models to various parameters, as well as massive numerical calculations, made it possible to construct regression relationships to determine LNG losses during operations under consideration. The obtained dependencies can be used to search for the most effective configurations of the system for low-tonnage LNG transportation, as well as to perform economic assessments of feasibility of using LNG as fuel for water and land transport.

Keywords: sea transportation, liquefied natural gas (LNG), evaporation losses of LNG, LNG bunkering vessel, LNG bunkering, fuel tank cooling, simulation thermodynamic model, regression analysis.

*Information about the authors:

Tarovik, Oleg V. – Ph.D. (Eng), Senior Researcher of the Independent Sector for Designing Marine Systems for Offshore Development of Krylov State Scientific Center Federal State Unitary Enterprise, St. Petersburg, Russia, tarovik_oleg@mail.ru.

Reutsky, Alexander S. – Engineer of I category of Krylov State Scientific Center Federal State Unitary Enterprise, St. Petersburg, Russia, reuckii_aleksandr@mail.ru.

Topazh, Alexander G. – D.Sc. (Eng), Leading Researcher of Krylov State Scientific Center Federal State Unitary Enterprise, St. Petersburg, Russia, alex.topaj@gmail.com.

Article received 16.01.2020, accepted 29.05.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 84.

Background.

Liquefied natural gas (LNG) is increasingly being used as fuel for vehicles of various modes of transport. However, a number of aspects of use of this atypical type of fuel are currently poorly studied. In particular, an urgent practical task is to study the issues of LNG losses during its transportation and performing a number of technological operations, such as cooling down (lowering the temperature of the cargo tank to -130°C before direct supply of LNG to it) and bunkering of cargo tanks (moving LNG from the tank-source into the tank-recipient with cool-down of LNG residues in the receiving tank).

To solve the tasks of a feasibility study and optimization of LNG transportation systems, it is necessary to get fairly simple calculated dependencies that allow one to estimate the volume of cargo losses during transportation in the form of functions of trip's duration, insulation characteristics, ambient temperature and other factors that affect the evaporation rate. Similar dependencies are required to determine LNG losses during cool-down and bunkering of cargo tanks. The presence of such dependencies will make it possible to reasonably approach both the issue of designing vehicles for delivery of LNG (the choice of design delivery speed, cost/efficiency ratio of the used insulation material, etc.), and for forecasting LNG losses when solving planning problems of operation of vehicles (scheduling of movement, forecast of cargo parameters at the point of delivery, and others). The development of such dependencies is the *objective* of this study.

It should be noted that the authors were unable to find such studies either among the domestic or foreign publications, which is obviously due to novelty of this topic as a whole. Many foreign studies are focused on thermodynamic modelling of LNG storage process at atmospheric pressure [1; 2]. This method of storing and transporting LNG is predominant in terms of traffic volumes, therefore the issue of analyzing and predicting losses from evaporation along the entire supply chain [3] is quite important. However, in this case, as a rule, the simplest methods of determining daily LNG losses, based on statistical data, are used. For example, LNG losses during transportation by sea-going gas carriers amount to 0,10–0,15 % of the vessel's capacity when moving in cargo, and 0,06–0,10 % when moving in ballast [4]. The few studies that address the issue of LNG losses during

storage under conditions of an excess pressure of 5–7 atmospheres are mainly focused on the operational aspect, for example, on operation of bunkering vessels [5]. Thus, implementation of this study is relevant.

1. Design models for determining LNG losses

To solve the problem, special thermodynamic models were created that allow describing the processes of LNG storage, bunkering and cooling of tanks, and a stochastic model of the dynamics of air temperatures during the voyage was developed as well. A detailed description of the calculated relationships of thermodynamic models, as well as functional dependences of natural gas parameters on temperature and pressure are given in the monograph [6]. Here, we note only the basic design ratios and the accepted assumptions.

1.1. Thermodynamic model for estimating LNG storage losses

The heat exchange between the two-phase medium contained in the tank in a state of saturation with temperature T and the environment with temperature T_0 is described by the heat transfer equation:

$$dQ/dt = k \cdot (T_0 - T) \cdot F, \quad (1)$$

where Q is incoming heat, J;

t is time, s;

k is heat transfer coefficient $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$;

F is heat exchange surface area, m^2 .

When using formula (1), heat flows Q_1 and Q_2 from the external environment to the liquid and gaseous phases, respectively, are considered. These flows are determined by the areas of heat exchange between liquid and the external environment F_1 , and between vapour and the external environment F_2 . The ambient temperature T_0 is considered as an external dynamic parameter. The heat transfer coefficient k for a wall consisting of layers of steel and thermal insulation is determined by standard dependencies [6, p. 69].

Heat transfer between liquid and gas at different temperatures across the interface obeys the Newton–Richmann equation:

$$Q = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3, \quad (2)$$

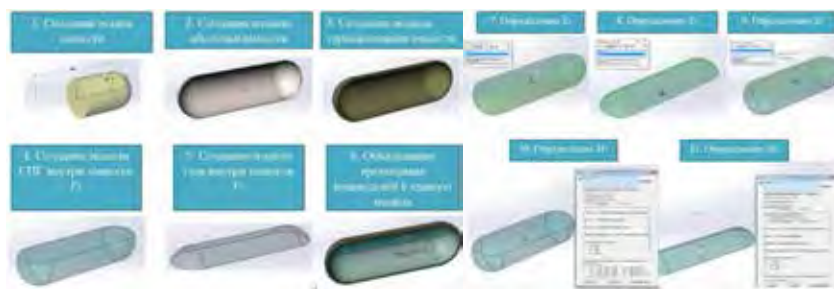
where Q is amount of heat, W;

α is heat transfer coefficient, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$;

T_1 and T_2 are temperatures of liquid and gas phases, respectively;

F_3 is surface area of the interface, m^2 .





Pic: 1. Determination of the main characteristics of cryogenic containers in SolidWorks environment. View of the screen when implementing SolidWorks software.

Phase transitions between states of aggregation (liquid evaporation and gas condensation) lead to a change in the pressure of the gas cushion above the liquid surface and, accordingly, to a change in thermodynamic parameters (boiling point, heat capacity, and others). When heat is supplied to the liquid phase for transition to a new saturation state, the liquid evaporates, and heat is taken from it. This evaporation process in the model is described by the ratio:

$$dM = dQ/r, \quad (3)$$

where dM is increment in mass (kg) of the vapour phase when heat dQ (J) is supplied to the liquid phase in a state of saturation;

r is heat of vaporization of LNG, which is a function of saturation temperature (and, thus, saturation pressure), J/kg.

When heat is supplied to the vapour phase or in the presence of a subcooled liquid and to reach the saturation state, vapour condensation occurs: the liquid perceives heat of the gas phase. This process is described by the heat balance equation describing the balance between the heat transferred from vapour and received by the liquid:

$$\alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3 \cdot dt = G \cdot di, \quad (4)$$

where G is mass of the precipitated condensate, kg;

di is difference between the enthalpies of superheated vapour and liquid in a state of saturation, J/kg.

The use of the given dependences makes it possible to implement an algorithm for sequential recalculation of the characteristics of the state of liquid and gas inside the tank. In this work, such an algorithm was implemented using a modification of the computer simulation model of system dynamics developed earlier in *AnyLogic* environment [7], which also integrates a stochastic generator of ambient temperature.

Let us note several aspects of implementation of the simulation model.

The vapour pressure inside the tank cannot exceed a certain maximum pressure allowed by design of the tank and the pressure of the control valve. Therefore, when the pressure rises above the maximum, some small mass of LNG vapour is released, which is interpreted as an irrecoverable loss. In numerical implementation of the model, a one-time discharge of 5 kg of vapour is assumed, which is by 3–4 orders of magnitude less than the mass of LNG in the tank and allows us to consider release of excess vapours almost uniform. The indicated vapour mass loss allows maintaining the equilibrium state of the «liquid–vapour» system inside the cargo tank, but at the same time there is an abrupt change in temperature and mass of the vapour and liquid phases. Modelling of such an event is based on the assumption of dynamic rigidity of the system. According to this assumption, time of transient processes of temperature equalization in the layers of the liquid phase and return of the system to the equilibrium saturated state with an abrupt change in conditions is assumed to be small in comparison with the dynamics of the background process of heat exchange with the environment.

Practical calculations were based on specific types of cryogenic containers: tank truck GT7 PPCT-60, tank car 15-5106 and LNG tank container of type KCM 40/0.7. Cylindrical type C LNG ships with a capacity of 1700 m³, 2800 m³ and 5600 m³ were also considered. Since not all the necessary technical parameters of these containers are available in the public domain, their three-dimensional models were created in *SolidWorks* environment (Pic. 1), which made it possible to obtain all the necessary geometric and mass parameters (Table 1).

In addition, on the basis of 3D models of tanks, the dependences of the dimensionless

Table 1

Main characteristics of the containers under consideration, obtained based on the analysis of open access materials

Tank type	Geometric volume, m ³	Maximum permissible pressure inside the tank, bar	Initial LNG volume, m ³	Initial LNG mass, t	Type of insulation (SV – screen-vacuum, FV – fiber-vacuum, P – polyurethane foam)	Coefficient of thermal conductivity W/m ²	Insulation layer thickness, m	Heat transfer coefficient, W/m ² • K
Tank truck GT7 LNG PPCT-60	60,0	7	54,0	23,2	SV	0,00145	0,12	0,012
Tank car 15-5106	65,4	5	58,2	25,0	FV	0,002	0,14	0,014
Container KCM-40	39,2	7	34,9	15,0	SV	0,00145	0,10	0,015
Ship tank 1700 m ³	1685	5	1500	645	P	0,024	0,60	0,040
Ship tank 2800 m ³	2809	5	2500	1075	P	0,024	0,60	0,040
Ship tank 5600 m ³	5618	5	5000	2150	P	0,024	0,60	0,040

values of the characteristic areas F_1 , F_2 and F_3 were also plotted as a function of the filling level. These dependencies were further used when performing calculations.

1.2. Thermodynamic models for assessing LNG losses during cooling and bunkering of fuel tanks

Cooling down a fuel tank assumes its cooling from a certain temperature $T_0 \geq 143$ K ($\approx -130^\circ\text{C}$) to a temperature $T_{z0} = 143$ K by supplying small portions of LNG. The uniformity of cooling is ensured by operation of spray nozzles inside the tank. The LNG droplets obtained as a result of spraying evaporate, taking heat away from the metal structures and insulation of the tank; therefore, cooling is accompanied by intense vaporization.

To reduce the tank temperature, it is necessary to evaporate LNG mass:

$$M_{z-1} = (\Sigma M_i \cdot c_i) \cdot \Delta T / r, \tag{5}$$

where M_i is mass of the liquid and gas phases of LNG in the tank at the beginning of the cooling process, as well as mass of walls and thermal insulation of the cryogenic tank, kg;

c_i is heat capacity of cooled masses, J/kg • K;
 $\Delta T = (T_{z0} - T_0)$ is temperature gradient, which is the difference between the tank temperature at the beginning of T_0 and at the end of T_{z0} of cooling down, K.

The cool-down rate v_3 is determined by the permissible thermal stresses of the cargo tank structures and is, as a rule, 5 ... 10 K/h [8]. The

cool-down time t_z can be determined by the ratio:

$$T_z = \Delta T / v_z. \tag{6}$$

During this time, heat enters the tank through the insulation, which must also be compensated for by injecting liquid LNG with a mass of M_{z-2} . Determining the amount of LNG required to compensate for the heat supplied during time t_3 is performed on the basis of formulas (1)–(4).

Thus, the mass of LNG consumed for cooling the tank is determined by the ratio:

$$M_z = M_{z-1} + M_{z-2}, \tag{7}$$

LNG losses during bunkering of a tank, pre-cooled to a temperature $T_z \leq T_{z0}$, with liquefied natural gas supplied at a temperature of $T_{LNG} = 110$ K, can be calculated in a similar way, that is, as the sum of losses caused by two processes:

- cooling of metal structures, liquid and vapour inside the cargo tank from the temperature T_z to the temperature T_{LNG}
- heat input through the cargo tank insulation.

The description of the corresponding differential equation, which makes it possible to determine temperature of the cargo tank and its contents at each moment of the bunkering operation, is given in [6, p. 84]. The analysis of this calculation model showed that the component of LNG losses due to heat input from outside the cargo tank can be neglected, since for the characteristic values



of thermal conductivity of insulation ($k = 0,01 \dots 0,04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) and bunkering duration (2 ... 4 hours), its share in total losses does not exceed 1 %. Note that in case of a cargo tank cooling, it is undesirable to neglect this component, because duration of the operation can reach 30 hours, and the relative share of losses due to heat exchange with the external environment is 7 ... 10 %.

So, with an accuracy sufficient for solving practical problems, it is possible to determine LNG losses during bunkering by relation (5), in which the value of the temperature gradient is taken equal to $\Delta T = T_z - T_{LNG}$.

1.3. Stochastic outboard temperature dynamics generator

Simulation of a fictitious voyage of a vehicle carrying LNG is carried out on the assumption of a stochastically varying ambient temperature. In this case, an approach is used that allows one to simulate the dynamics of temperature fluctuations as a random process with given autocorrelation properties. To do this, at the conditional points of departure and destination, at each step of model time, the current value of air temperature is calculated, which is determined as the value of the deterministic time trend plus a random addition, modeled using a scalar shaping filter of the first order (one-dimensional stochastic weather generator) [9]. The time trend of temperature at both points is described as a superposition of two harmonic functions, which represent the annual variation of average daily temperature and daily variation of temperature.

Thus, the current ambient temperature T at the points of departure (T_{dep}) and destination (T_{des}) is calculated for each hour of model time t by the ratio:

$$T = T_d + 0,5 \cdot R_d \cdot \cos(2\pi/24 \cdot (h - 14)) + D \cdot x_h, \quad (8)$$

where R_d is given amplitude of the daily temperature variation;

h is current time of day in hours (0 ... 24);

D is standard deviation of the current temperature from the average trend, taking into account the annual and daily variations;

T_d is average daily temperature at a given geographic point for a given day of the calendar year;

x_h is random centered normalized addition to temperature (stochastic disturbance of the mean trend).

The change in average daily temperatures T_d at the point of departure or destination is modeled by the ratio:

$$T_d = T_{ave} + 0,5 \cdot R_y \cdot \cos(2\pi/365 \cdot (d - 200)), \quad (9)$$

where R_y is the amplitude of the annual variation of the average daily temperature;

T_{ave} is averaged annual temperature;

d is number of the current day in the year, counted from January 1.

The value x_h is calculated using a first-order scalar shaping filter, which makes it possible to reflect the autocorrelation properties of the dynamics of temperature anomalies as a random process:

$$x_h = \rho \cdot x_{(h-1)} + \sqrt{(1 - \rho^2)} \cdot \varepsilon;$$

$$x_h = \rho \cdot x_{h-1} + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \varepsilon, \quad (10)$$

where ε is random standardized normal value.

The values T_{ave} , R_y and R_d are set separately for the geographic points of departure and destination, while ρ and D are considered common parameters of the weather generator.

The temperature T_0 outside the vehicle is determined by a linear approximation between the simulated temperatures between departure T_{dep} and destination T_{des} , based on the known voyage time.

$$T_0 = T_{dep} \cdot (1 - t/t_v) + T_{des} \cdot (t/t_v), \quad (11)$$

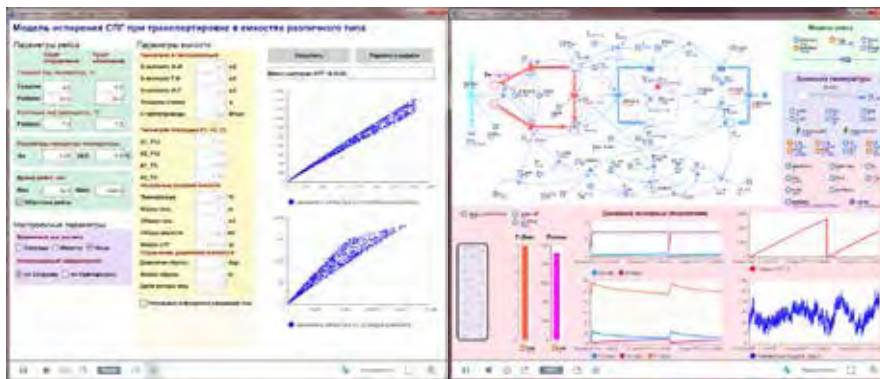
where t is time from the start of the voyage;

t_v is total voyage time.

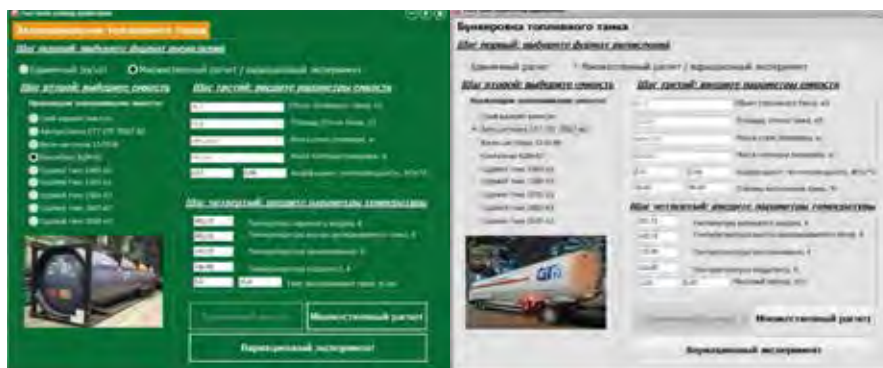
To identify the parameters of the air temperature generator, we used data of long-term historical observations in the territory of Russia [10]. A certain conditional voyage of a vehicle between the cities of Moscow, St. Petersburg, Rostov-on-Don, Volgograd, Kazan was considered. As a result, it was accepted that $T_{ave} = 4 \dots 8 \approx 6^\circ\text{C}$, $R_y = 24 \dots 28 \approx 26^\circ\text{C}$, $R_d = 5 \dots 12 \approx 7^\circ\text{C}$. The parameters ρ and D were determined from the results of processing long-term data of actual temperature measurements for the reference meteorological stations Belogorka (Leningrad region) and Saratov. In general, we can conclude that the characteristic values of these parameters in the territory of central Russia are quite stable: $\rho \approx 0,98$ (at the hourly step of the generator), $D = 3,1 \dots 7,8 \approx 5^\circ\text{C}$.

2. Program implementation of computational models

The model of thermodynamic processes occurring during LNG storage has a dynamic character, so it was implemented in *AnyLogic*



Pic. 2. Main window of the simulation experiment (left) and thermodynamic model of LNG evaporation (right) in AnyLogic environment. View of the screen of AnyLogic program.



Pic. 3. User interface of software applications for calculating cooling (left) and bunkering (right) of LNG tanks. View of the screen of Embarcadero Delphi program.

environment together with a stochastic outboard temperature model. The models for determining LNG losses during bunkering and cooling are static, therefore they were implemented in the form of standard software applications that support the functions of a single or multiple calculation based on a set of input parameters.

In the graphical interface of the simulation experiment (Pic. 2), the parameters of the current calculation option are set (duration of the voyage, characteristics of the cargo tank, dynamics of temperature changes during the voyage), the main results are tracked, and the progress of execution is displayed [11].

Software applications for calculating LNG losses during cooling and bunkering of a fuel tank are similar in functionality and represent computational models implemented by *Embarcadero Delphi* tools (Pic. 3). The graphical interface allows us to configure the type of containers and the initial conditions for performing calculations.

3. Regression model for estimating LNG storage losses

A series of massive numerical experiments was performed to obtain the desired regression dependences that allow determining the evaporation losses of LNG during the voyage of gas-fuel vehicles. The initial temperature of the cargo tank and its contents was set equal to $T = 110$ K, and pressure in the tank at the beginning of the simulation experiment was assumed to be equal to atmospheric.

In the course of a series of simulation experiments based on Table 1 of the standard-size range of fuel tanks, the influence on final LNG losses of such factors as tank volume, heat transfer coefficient of insulation, voyage duration, average-trip ambient temperature and others was analyzed. In total, more than 50 design cases were considered, for each of which at least 3000 conditional vehicle voyages were performed, which made it possible to achieve statistical representativeness of modelling results.



Table 2

Calculations of LNG losses for the tanker type GT7 PPCT-60 vehicle

No.	Voyage start date	Duration, days	Sum of degree-days, °C (counting from -40°C)	Average temperature per voyage, °C	Lost LNG, kg
Constant voyage duration, constant degree-days					
1	Jan 11	4,17	156,0	-2,55	320,2
2	March 22	4,17	156,2	-2,52	320,4
3	Apr 2	4,17	156,8	-2,36	320,6
4	Nov 1	4,17	156,5	-2,43	320,5
5	Nov 19	4,17	156,4	-2,45	320,4
Variable voyage duration, constant degree-days					
6	Jan 10	4,83	156,3	-7,61	356,5
7	Jan 26	5,03	156,2	-8,94	367,7
8	Feb 4	5,37	156,6	-10,83	386,1
9	Feb 9	5,09	156,1	-9,34	370,8
10	Feb 8	2,83	156,4	15,21	247,8

First of all, an analysis was made of influence of dynamics of temperature changes during voyages of different duration on the resulting LNG losses. Examples of such calculations are given in Table 2, which displays a sample from the simulation results of the runs of the tanker type vehicle of GT7 PPCT-60 type with a close value of the sum of degree-days (when calculating the sum of degree-days, a temperature of -40°C is taken as the reference point).

In the first block of calculations, voyage time is constant and the sum of degree-days (or the average temperature during the voyage) is approximately the same, only the voyage start date and the associated temperature pattern changes. Despite different dates and obviously different temperature dynamics during the voyage, the mass of the lost LNG is practically the same and ranges from 320,2 to 320,6 kg. The second block of calculations is a sample of the results of calculations for the same tank truck, but with a variable duration of the voyage. From these data, an almost absolute correlation of LNG losses with duration of the voyage is visible, provided that the sum of degree-days is approximately the same. The longer is the voyage, the higher are the losses, with the average voyage temperature varying from -11°C to +15°C. These results indicate that the dynamics of temperatures during the voyage has a negligible effect on the values of resulting LNG losses, and it is the sum of degree days and duration of transportation that play a decisive role. In other words, when predicting the amount of LNG losses, it is sufficient to

know voyage duration and average air temperature. This is due to the linear and additive nature of the considered thermodynamic process of LNG evaporation.

Based on these conclusions, as well as on the result of processing data of mass calculations, a regression dependence was proposed to determine mass of liquefied natural gas M_x lost during the voyage (or during stationary storage) as a function of four parameters: voyage duration, temperature during the voyage, heat transfer coefficient and mass of transported LNG. The dependence is as follows:

$$M_x = A \cdot k \cdot T_x^{0.884} \cdot t_{av}^B, \text{ kg}, \quad (12)$$

where k is heat transfer coefficient of heat in LNG from the environment, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$;

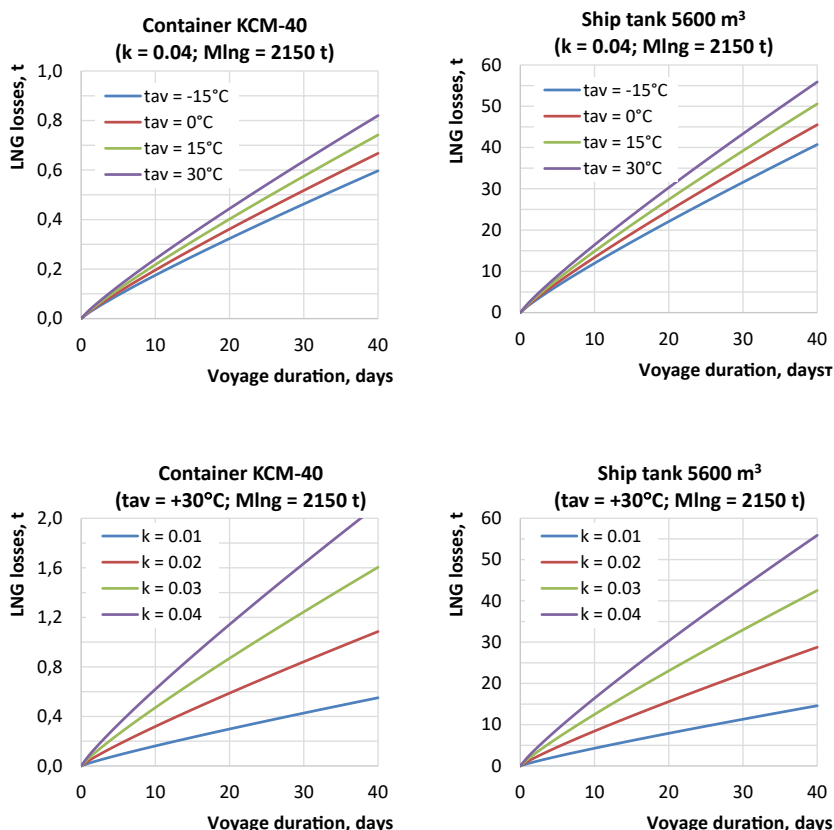
T_x is duration of LNG storage, hour;

t_{av} is average ambient air temperature, calculated by averaging temperatures during the voyage, K;

$A = A(M_{LNG})$ is regression coefficient depending on the initial mass of LNG in the cargo tank;

$B = B(k)$ is regression coefficient depending on the features of the tank thermal insulation.

It turned out that containers of different types are characterized by the same value of the regression coefficient, which stands as an exponent of the parameter T_x . This is probably due to the identical nature of physical processes occurring during evaporation of LNG in different containers. It was also found that the value of the coefficient A may be related to the amount of LNG transported. Either the volume of the container or mass of LNG transported in it can be taken as an indicator characterizing



Pic. 4. Calculation of LNG losses for various containers depending on voyage duration, average temperature during voyage and heat transfer coefficient.

the amount of LNG. The latter parameter is preferable because it allows to consider the constraints regarding the level of filling of the tank. The dependence for determining the coefficient A has the form:

$$A = 2,76 \cdot 10^{-6} \cdot M_{LNG}^{0,66}, R^2 = 0,999, \quad (13)$$

where M_{LNG} is mass of LNG liquid and gas phases stored in the tank, kg;

R^2 is determination coefficient.

It should be borne in mind that the value M_{LNG} corresponds to the maximum filling level of the tank, which is about 90 % of the geometric volume. Application of dependence (12) at lower filling levels will lead to underestimation of the volume of LNG losses. The degree of this underestimation increases as the filling level decreases.

The dependence $B = B(k)$ was found by performing numerical experiments with a KCM-40/0,7 capacity with a change in k in the range from 0,002 to 0,150 W/m² · K. The resulting dependence turned out to be true for containers of other types:

$$B = 1,98 - 0,253 \cdot k, R^2 = 0,9. \quad (14)$$

The accuracy of approximation of the results of model calculations by dependence (12) turned out to be very high, the standard deviation of LNG losses was 0,007... 0,018 % of the initial mass for containers of all types considered. The largest relative errors are observed with a short voyage duration. An illustration of the values of LNG losses obtained on the basis of dependence (12) at various values of average trip temperatures and coefficient k is shown in Pic. 4.

To confirm accuracy of the estimates obtained, the calculated LNG losses were compared with the specification data of the KCM-40 tank container, according to which the maximum possible daily evaporation loss during stationary storage is 0,28 % at an outside temperature of 306 K (33°C) and with internal pressure of 0,1 MPa. The calculated value of the thermal conductivity coefficient for a tank of this type is $k = 0,015$ W/m² · K (obtained by the authors based on indirect data). According



Table 3

Calculations of LNG losses during cooling of KCM-40 container

No.	Tank temperature at the beginning of cooling down, T_0 , K	Cooling rate, K/h	Heat transfer coefficient, $W/m^2 \cdot K$	Lost LNG, kg
Constant heat transfer coefficient				
1	293,15	5,0	0,01	516
2	293,15	7,0	0,01	509
3	293,15	9,0	0,01	505
Constant cooling rate				
4	293,15	5,0	0,01	516
5	293,15	5,0	0,03	566
6	293,15	5,0	0,05	617

to dependence (12), during the first day of LNG storage at a temperature of 33°C, 32,1 kg of LNG will evaporate, which makes 0,21 % of the total amount of LNG. The result obtained is in good agreement with field data, especially if we take into account that specification data are usually indicated with a certain margin, and also that the actual value of the thermal conductivity coefficient for tanks of this type may differ from that accepted in the calculations.

4. Regression model for estimating LNG losses during cooling

When studying the process of cooling down the fuel tank, we took into account such factors as initial temperature inside the tank T_0 , its own weight, thermal conductivity of insulation and the rate of cooling. The results of calculations indicate that the last parameter has a rather weak effect on the amount of LNG lost. As an example, Table 3 shows the results of calculating cooling of KCM-40 tank container at a constant temperature of the fuel tank at the beginning and at the end of this process. It can be seen that despite the change in the cooling rate in the range from 5 to 9 K/h, the mass of the lost LNG at constant k changes by only 2 %. Also, Table 3 shows the results of calculations for a variable heat transfer coefficient and a constant cool-down rate. In this case, there is a strong correlation between LNG losses and heat transfer coefficient.

As a result, the following regression dependence was proposed to determine the mass of liquefied gas M_z , lost when the tank cools down to a temperature of $T_{z0} = 143$ K:

$$M_z = C \cdot k^D \cdot (M_{st} + M_{is}), \text{ kg}, \quad (15)$$

where M_{st} is mass of the cryogenic container steel, kg;

M_{is} is mass of container insulation, kg;

$C = C(T_0)$ is regression coefficient depending on the temperature T_0 of the tank at the beginning of cooling;

$D = D(M_{st} + M_{is})$ is regression coefficient depending on mass of the container.

In the course of numerical experiments, the following dependences were obtained to determine the coefficients C and D :

$$C = 0,00131 \cdot T_0 - 0,187, R^2 = 0,999; \quad (16)$$

$$D = 0,0046 \cdot \ln(M_{st} + M_{is}) + 0,02, R^2 = 0,978. \quad (17)$$

For approximate estimates of the sum of masses M_{st} and M_{is} of ship cylindrical tanks with a known geometric volume $V(m^3)$, the following approximate dependence was obtained, valid for the ratio of the length of the tank to the diameter in the range of 4,2 ... 5,0, the calculated overpressure of 4,5 atm and tank insulation made of 0,6 m thick polyurethane foam.

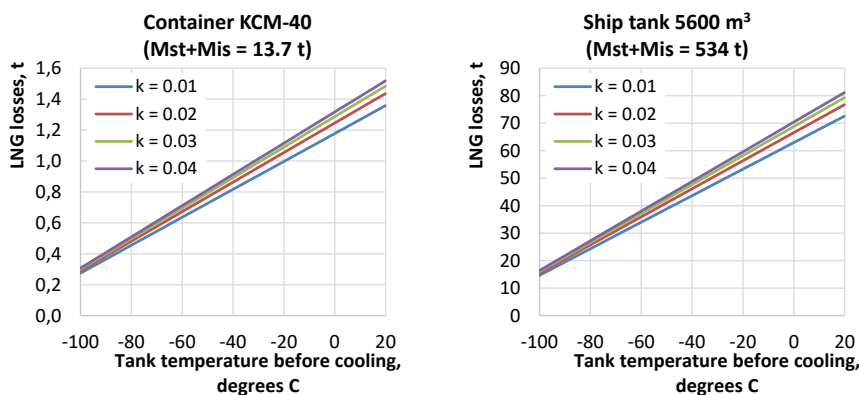
$$(M_{st}) + (M_{is}) = (60 \cdot V + 2900) + (620 \cdot V^{0.66}), \text{ kg}. \quad (18)$$

Examples of calculation results for this dependence are shown in Pic. 5. The mass of KCM-40 is taken according to the specification data equal to 13,7 tons. It can be seen from the picture that the value of the thermal conductivity coefficient k has little effect on the result, since the proportion of LNG losses due to external heat input is small.

The standard deviation of LNG loss calculated by formula (15) from the results of calculations based on exact algorithms is about 3 % ... 4 % of the total losses for cooling the tank, which indicates the sufficient accuracy of the approximate formula.

5. Regression model for estimating LNG losses during bunkering

When simulating the bunkering process of a tank precooled to a temperature $T_z \leq T_{z0}$



Pic. 5. Estimated values of LNG losses during cooling.

Table 4

Calculations of LNG losses during bunkering of a 1000 m³ ship tank

No.	Tank temperature at the beginning of bunkering, T, K	Performance of pumps, kg/h	Heat transfer coefficient, W/m ² · K	LNG losses, kg
Constant heat transfer coefficient				
1	143,15	20,0	0,01	13065
2	143,15	75,5	0,01	13055
3	143,15	130,0	0,01	13053
Constant performance of pumps				
4	143,15	20,0	0,01	13065
5	143,15	20,0	0,03	13091
6	143,15	20,0	0,05	13118

several assumptions were made that correspond to the most probable operational scenario. It was believed that at the beginning of bunkering the fuel tank was filled to the minimum permissible level (from 10 to 50 % by volume), and temperature of the supplied bunker LNG was equal to $T_{LNG} = -161^{\circ}\text{C}$, and at the end of the bunkering process the contents of the tank had a temperature T_{LNG} . In addition, it was assumed that operation of the pumping equipment does not affect heating of LNG and does not significantly affect vaporization.

When analyzing the results of the calculations, it was found that duration of bunkering operations (i.e. performance of cargo pumps) practically does not affect the amount of the generated boil-off gas. The characteristics of thermal insulation and weight of the container also have little effect on gas losses. To illustrate these findings Table 4 shows the results of bunkering calculations for a ship's tank with a

volume of 1000 m³ at a constant temperature of the fuel tank at the beginning of bunkering.

The main influence on mass of lost gas is exerted by initial temperature inside the fuel tank and the mass of LNG residues contained in it. The lower is temperature of LNG residue, the lower are bunkering losses. Likewise, the larger is the amount of residual LNG that needs to be cooled down to temperature T_{LNG} , the higher are losses.

These results allowed us to form the following formula for determining LNG losses during bunkering:

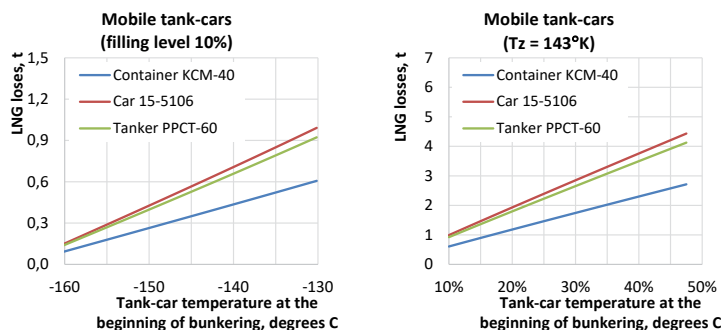
$$M_b = E \cdot M_{LNG0}^F, \text{ kg}, \quad (19)$$

where M_{LNG0} is mass of LNG residues contained in the tank at the beginning of bunkering (from 10 to 50 % of filling), kg;

$T_z \leq 143 \text{ K}$ is temperature of the previously cooled tank, K;

$E = E(T_z)$, $F = F(T_z)$ are coefficients, depending on tank temperature at the beginning





Pic. 6. Estimated values of LNG losses during bunkering of mobile tank-cars.

of bunkering, obtained in the course of numerical experiments:

$$E = 0,0116 \cdot T_z - 1,248, R^2 = 0,999; \quad (20)$$

$$F = 1,895 \cdot 10^{-5} \cdot T_z^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \cdot T_z + 1,133, R^2 = 0,999. \quad (21)$$

The root-mean-square deviation of regression values from model calculations is 0,2... 0,94 % of the amount of bunker LNG. An illustration of the calculated LNG losses obtained on the basis of calculations using formula (19) is shown in Pic. 6.

Conclusion. This article proposes simple regression relationships to estimate LNG losses during transportation (storage), bunkering, and cooling of various types of fuel tanks. The dependences were obtained by processing the results of a series of computer experiments with a simulation model and analytical calculations. They are applicable for containers with a maximum allowable pressure of up to 7 atmospheres at arbitrary values of the capacity. Despite the fact that initially, within the framework of the study, specific types of cargo tanks were considered, the analysis of the calculation results made it possible to propose universal formulas for estimating LNG losses, which can be used to perform estimated calculations for all types of cryogenic tanks. The results obtained can be used to optimize systems for low-tonnage LNG transportation, to design appropriate vehicles, as well as to perform various technical and economic assessments.

REFERENCES

- Adom, E., Islam, S.Z., Ji, X. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*, 2010, Vol. 2 (4), pp. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/15/S06.051>.
- Wlodek, T. Prediction of boil off rate in liquefied natural gas storage processes. 17th International

Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, pp. 27–29. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/15>.

3. Dobrota, D., Lalic, B., Komar, I. Problem of Boil-off in LNG supply chain. *Transactions on Maritime Sciences*, 2013, Vol. 2, pp. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v02.n02.001>.

4. Glomski, P., Michalski, R. Problems with Determination of Evaporation Rate and Properties of Boil-off Gas on Board LNG Carriers. *Journal of Polish CIMAC*, 2011, Vol. 6 (1), pp. 133–140. [Electronic resource]: <http://www.polishcimac.pl/Papers1/2011/014.pdf>. Last accessed 16.01.2020.

5. Kim, K., Park, K., Roh, G., Chun, K. Case Study on Boil-Off Gas (BOG) Minimization for LNG Bunkering Vessel Using Energy Storage System (ESS). *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, Vol. 7 (5), 18 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7050130>.

6. Pavlovsky, V. A., Reutsky, A. S. Thermophysical foundations of sea transportation and bunkering of liquefied natural gas [Термofizicheskie osnovy morskoi transportirovki i bunkerovki szhizhennogo prirodnogo gaza]. St. Petersburg, Krylov State Scientific Center, 2019, 170 p.

7. Topazh, A. G., Pavlovsky, V. A., Skudnev, S. A. Dynamic model of transportation of liquefied natural gas in ship tanks [Dinamicheskaya model transportirovki szhizhennogo prirodnogo gaza v sudovykh tankakh]. *Proceedings of VII All-Russian Scientific and Practical Conference «Simulation Modelling. Theory and practice»*. Institute for Management Problems n.a. V. A. Trapeznikov RAS, 2015, pp. 275–279.

8. Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities. DNV GL Recommended practice (DNVGL-RP-0006:2014-01). [Electronic resource]: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2014-01/DNVGL-RP-0006.pdf>. Last accessed 16.01.2020.

9. May, R. I., Tarovik, O. V., Topazh, A. G. Modelling of sea weather as an input signal for simulation models of transport and ecological systems in the Arctic region [Modelirovanie morskoi pogody kak vkhodnogo signala imitatsionnykh modelei transportnykh i ekologicheskikh sistem v arkticheskom regione]. *Problems of ecological monitoring and modelling of ecosystems*, 2018, Vol. 29, Iss. 3, pp. 20–38.

10. Weather news [Novosti pogody]. [Electronic resource]: www.meteonovosti.ru. Last accessed 16.01.2020.

11. Topazh, A. G., Reutsky, A. S., Tarovik, O. V. Program for thermodynamic modelling of gas evaporation in fuel tanks of ships and tank-containers [Programma dlya termodinamicheskogo modelirovaniya ispareniya gaza v toplivnykh tankakh sudov i tank-konteynerov]. Certificate of computer program RU No. 2018664683. Registration date 20.11.2018.



КОНКУРС «ТРАНСПОРТ БУДУЩЕГО» – 2020

29 мая 2020 года состоялся финальный этап Пятого Всероссийского конкурса исследовательских и проектных работ «Транспорт будущего».

Финалу предшествовали региональные этапы, которые проводились в Российском университете транспорта, Иркутском и Уральском государственных университетах путей сообщения, Государственном университете морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Морском государственном университете им. адмирала Г. И. Невельского.

К участию в финале было отобрано 120 работ, представленных почти 180 участниками в возрасте до 19 лет из 12 российских регионов. В этом году проекты также представили студенты Белорусского государственного университета транспорта.

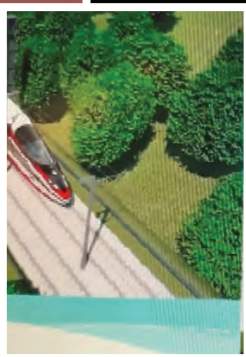
Финальный этап конкурса проводился в этом году в формате конференций на платформе «Zoom». Дистанционный формат конференций, организованных с площадки Гимназии РУТ (МИИТ), не стал помехой активному обсуждению проектов, была полная возможность не только рассказать о своих наработках, но и познакомиться с проектами других участников, выслушать полезные советы, а иногда и вступить в дискуссию с экспертами, оценивавшими работы.

По результатам финала определены лучшие работы в 11 номинациях. Победителями в них с учётом двух возрастных категорий стали 35 проектов, вторые места заняли 28 работ, а третьи — 27. Были отмечены также 9 работ, представленных младшими школьниками.



ПРОЕКТ РЕКОНСТРУКЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ БАКУНИНСКОГО ПУТЕПРОВОДА И МОСТА ЧЕРЕЗ Р. ЯУЗУ УЧАСТКА МОСКВА – РЯЗАНЬ

Привлечь частные инвестиции

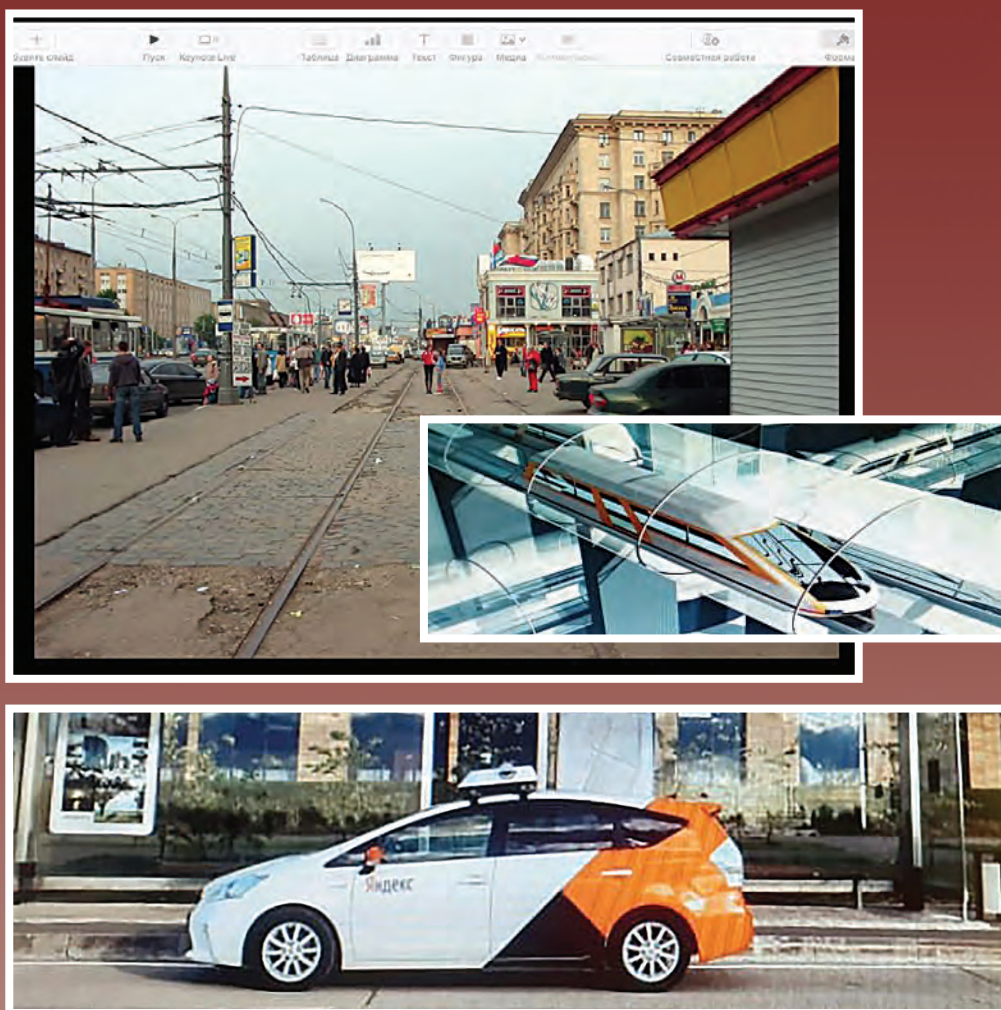


В число победителей и призёров вошли представители различных городов из 10 российских регионов и участники из Беларуси.

Среди организаций, представлявших работы своих учащихся: РУТ (МИИТ), УрГУПС, детские железные дороги – структурные подразделения Московской, Приволжской, Свердловской, Северной, Восточно-Сибирской железных дорог – филиалов ОАО «РЖД», Кванториум ОАО «РЖД» Восточно-Сибирской детской железной дороги. Широко были представлены школы и школы-интернаты ОАО «РЖД».

Все участники конкурса без исключения представили актуальные, инновационные темы. В их числе такие, как создание трёхмерной мо-

дели станций с помощью BIM-технологий, пролётные строения из углепластика, фидеры контактной сети, цифровой локомотив будущего, схемы управления стрелочными электроприводами, сигнализации для защиты опасных зон на платформах, на неохраемых переездах, борьба с «зацепингом», выявление дефектов в боковых рамах тележек грузовых вагонов. Очень многие работы были посвящены применению альтернативных источников энергии на транспорте, использованию электронных технологий для популяризации деятельности железных дорог и городского транспорта (QR-атлас железных дорог России, квест «Вокзалы Москвы»), повышению комфортности перевозок пассажиров. ●



TRANSPORT OF THE FUTURE 2020 CONTEST

The final competition of the Fifth Transport of the Future Contest of youth research and projects took place on May 29, 2020.

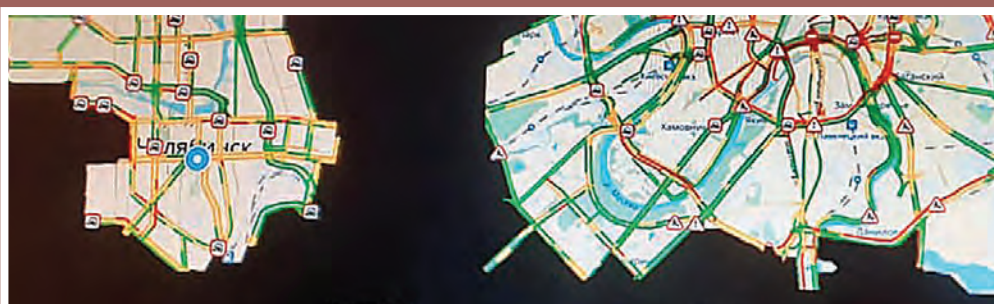
The final was preceded by regional stage, the projects were reviewed at Russian University of Transport (Moscow), Irkutsk and Ural State Universities of Railway Engineering (Ekaterinburg), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (St. Petersburg), and Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy (Vladivostok).

120 works submitted by almost 180 participants under 19 years from 12 Russian regions were accepted for the final.

The projects were also presented by the students at the Belarusian State University of Transport.

The final contest was held this year in the format of video ZOOM conference organized by Russian University of Transport. The remote format of the contest was not an obstacle to active discussion of projects, the contestants enjoyed opportunity not only to present their developments, but also to get acquainted with the projects of other teams, to listen to useful advice, and sometimes to enter into a discussion with experts who evaluated the projects.

Based on the results of the final contest, the best works in 11 nominations have been



selected. Considering two separate age groups and sharing of awards, 35 projects were declared winners, the second place was awarded to 28 works, and the third to 27. Best nine works submitted by junior schoolchildren were also noted.

Winners and prize-winners comprise students from various cities and settlements of 10 Russian regions and from Belarus.

Several projects were supported by organizations, namely by Russian University of Transport, Ural State University of Railway Engineering, children's railways, which are structural units of the Moscow, Volga, Sverdlovsk, Northern, East Siberian Railways, branches of the Russian Railways, the Kvantorium of the East Siberian children's railway, Russian Railways schools and boarding schools.

All the participants to the contest, with no exception, presented topical, innovative projects, particularly, regarding three-dimensional model of stations developed with the help of BIM-technology, bridge span structures from carbon fibre, feeders of the contact network, digital locomotive of the future, circuits of control of switch electric drives, alarming systems to make safer dangerous zones on platforms and at unguarded crossings, identifying defects in the side frame of wagons. A lot of works were dedicated to alternative energy sources for transport, to the use of digital technology to popularize the activities of the railways and of urban transport (QR-map of national railways, the «Moscow Stations» quest, etc.), to improve the comfort of passenger transportation.



ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ 108

Типичные ошибки при разработке документов в сфере развития городских транспортных систем и как их избежать.

КОМПЛЕКСНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СХЕМЫ 120

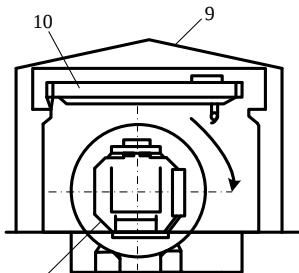
Вернуться к почти утраченному опыту или проложить новую дорогу: можно ли найти комплексное решение?

КОРПОРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ 134

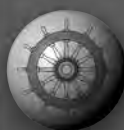
Опыт «Российских железных дорог».

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ 148

Транспортный и технологический процессы должны жёстко синхронизироваться.



ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ • ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL



TRANSPORT PLANNING 114

Typical errors while preparing documents in the field of urban transport planning, and how to avoid them.

INTEGRATED TRANSPORT SCHEMES 127

Return to almost lost practices or to lay new path: is there an integrated solution?

CORPORATE GOVERNANCE 141

The Russian Railways' experience.



INDUSTRY'S TRANSPORT 156

Transportation and technological processes should be synchronised.



Ключевые ошибки при разработке документов транспортного планирования



Козельский Иван Юрьевич — Российский дорожный научно-исследовательский институт, Москва, Россия.*

Иван КОЗЕЛЬСКИЙ

Устойчивое развитие любой из систем невозможно без долгосрочного планирования. Механизмом реализации долгосрочного планирования в части транспортного обслуживания населения является разработка соответствующих документов транспортного планирования, а именно: программ комплексного развития транспортной инфраструктуры, комплексных схем организации дорожного движения, комплексных схем организации транспортного обслуживания населения общественным транспортом.

Настоящая статья посвящена рассмотрению характерных ошибок, которые могут быть допущены разработчиками соответствующих документов. Целью статьи является освещение ключевых ошибок, направленное на снижение их количества, и, соответственно, повышение качества разрабатываемых документов.

При подготовке статьи использовался сравнительный анализ разработанных и утверждённых органами власти крупных и крупнейших городов документов транспортного планирования и требований к их содержанию, установленных нормативными документами.

В статье, на основе использования российского опыта, приведена разбивка по ключевым обязательным разделам документов транспортного планирования, и для каждого из них выделены характерные ошибки при подготовке. В конце статьи приведены ключевые направления снижения рисков при разработке и утверждении документов транспортного планирования. Общие подходы, выявленные в результате исследования, носят в значительной мере универсальный характер и могут быть применены не только в отношении проанализированного свода документов, а также и в других странах.

Ключевые слова: документы транспортного планирования, ошибки при разработке, программа комплексного развития транспортной инфраструктуры, комплексная схема организации дорожного движения, комплексная схема организации транспортного обслуживания населения общественным транспортом.

*Информация об авторе:

Козельский Иван Юрьевич – заместитель начальника отдела методического обеспечения транспортного планирования управления транспортного планирования Российского дорожного научно-исследовательского института (ФАУ «РОСДОРИИ»), Москва, Россия, KozelskyIY@rosdornii.ru.

Статья поступила в редакцию 07.04.2020, принята к публикации 21.06.2020.

For the English text of the article please see p. 114.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сфере транспортного планирования отечественными и зарубежными авторами выпущен значительный объём литературы, посвящённый развитию транспортных систем городов. К таким авторам можно отнести Е. М. Лобанова [1], Г. И. Кликовштейна, М. Б. Афанасьева [2], В. Вучика [3] и других. Данные труды подчёркивают важность системного подхода при выполнении транспортных проектов, функцию которых исполняют документы транспортного планирования. При их разработке требуется умение работать с большим объёмом информации и обладать разносторонними познаниями как в сфере проектирования автомобильных дорог, организации дорожного движения и пассажирских перевозок, так и в отдельных областях социологии и экономики. При этом в процессе данной работы неизбежно возникают ошибки, ставящие под сомнения корректность результатов работ. В настоящей статье будут рассмотрены ключевые ошибки, допускаемые заказчиками и исполнителями при разработке документов транспортного планирования, влекущие за собой снижение качества разработанной документации.

При подготовке статьи использовался сравнительный анализ разработанных и утверждённых органами власти крупных и крупнейших городов России документов транспортного планирования и требований к их содержанию, установленных нормативными документами, в частности: Постановлением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2020 года № 1440, Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 26 декабря 2018 года № 480, методическими рекомендациями по разработке документов транспортного планирования субъектов Российской Федерации.

Целью статьи является сбор и систематизация характерных ошибок, допускаемых разработчиками при подготовке документов транспортного планирования. Именно знание характерных ошибок способствует повышению качества выполняемых работ и способствует соблюдению принципов устойчивого развития.

Подготовка материалов производилась путём сравнительного анализа действующих

и нормативных правовых документов и методической базы, определяющей состав документов, и непосредственно самих документов. Вместе с тем проводился анализ содержания рассматриваемых документов на предмет соответствия действующим нормативно-техническим документам, глубины проработки, использования передового отечественного и зарубежного опыта. Выявленные в ходе анализа ошибки собирались и систематизировались, согласно определённым нормативным правовым и методическим документам, разделам работ.

Важно отметить, что учтённые для статьи документы разработаны различными юридическими лицами, соответственно неверно утверждать о наличии в каждом из документов полного перечня указанных в статье ошибок. Тем не менее, каждая из ошибок снижает качество разработанных документов, а также может привести к ухудшению условий движения. И, напротив, возможность выявления и устранения наиболее характерных ошибок, отражённых в статье, поспособствует сокращению рисков при разработке и утверждении, а применительно к России — также достижению целей национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги».

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках настоящей статьи рассматриваются следующие документы транспортного планирования:

1. Программа комплексного развития транспортной инфраструктуры (ПКРТИ).
2. Комплексная схема организации дорожного движения (КСОДД).
3. Комплексная схема организации транспортного обслуживания населения общественным транспортом (КСОТ).

Важно отметить, что возникновение ошибок при разработке документов зависит как от заказчика, так и от исполнителя.

Зависящие от заказчика:

1. *Установление сжатых сроков разработки.*

В настоящее время ответственные органы власти субъектов разыгрывают конкурсы на разработку документов транспортного планирования на основании требований национального проекта «Без-



опасные и качественные автомобильные дороги» [4].

Национальным проектом контрольные точки были обозначены летом 2019 года, вместе с тем большой объём работ, необходимый для проведения конкурсных процедур, привёл к значительному сокращению сроков разработки самих документов. В свою очередь, сжатые сроки являются существенной причиной снижения качества документов транспортного планирования, что проявляется в недостаточной глубине проработки имеющихся данных и ошибках при выполнении работ.

2. Частичное отсутствие исходной информации у заказчика.

Неполнота предоставленной информации может следовать как из отсутствия мониторинга дорожных условий, так и из недостаточного внимания к нему. Тем не менее, недостаточность официальной информации значительно увеличивает трудозатраты исполнителя и вынуждает его либо игнорировать соответствующие части разделов документов, либо использовать информацию из открытых источников. При этом информация, полученная таким образом, может являться недостоверной и противоречить друг другу, что неминуемо приведёт к ошибкам при выполнении работ.

Для удобства оценки возможных ошибок со стороны исполнителя предлагается выделить в документах общие разделы. Так, в документах транспортного планирования, вне зависимости от направления, можно выделить следующие общие разделы [5–7]:

- анализ существующего положения;
- проведение транспортных и социологических исследований;
- прогноз социально-экономического развития;
- разработка транспортной модели;
- выбор и обоснование варианта проектирования;
- разработка перечня мероприятий соответствующего направления;
- укрупнённая оценка стоимости предлагаемых мероприятий;
- оценка социально-экономической эффективности предложенных мероприятий.

При анализе существующего положения ключевой задачей исполнителя является сбор и обработка исходной информации, в том числе полученной в ходе обследований, и формирование корректных выводов. Вместе с тем, исполнитель в большинстве проектов не обладает исчерпывающим объёмом сведений. Причиной этого могут являться как запрос неполного перечня данных, так и частичное отсутствие необходимой информации у заказчика. Тем не менее, результатами отсутствия необходимого перечня исходных данных становятся некорректные выводы по итогам анализа, неполный объём необходимых выводов, частичное отсутствие материалов в тексте документа транспортного планирования, излишние укрупнения и обобщения.

На данном этапе наиболее важными исходными данными предлагается считать социально-экономическую статистику рассматриваемой территории, информацию о маршрутной сети пассажирского транспорта общего пользования (включая информацию о пассажиропотоках в разрезе маршрутов), информацию об организации дорожного движения (включая информацию об обустройстве техническими средствами организации дорожного движения), информацию об аварийности, информацию о запланированных ответственным органом исполнительной власти мероприятиях.

Наиболее частыми ошибками являются: использование некорректных данных, которые впоследствии применяются при анализе и разработке транспортной модели; формирование в ходе оценки нередко противоречащих друг другу документов стратегического планирования; неверная оценка развития системы и вектора развития города, вокруг которых строятся мероприятия; отсутствие или неполный учёт исполнителем состояния аварийности, снижение которой является ключевым направлением национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», анализ характеристик работы с применением недостоверных открытых источников; использование практик анализа транспортной системы без приведения подробного обоснования методологии; отсут-

ствие анализа бюджетной обеспеченности рассматриваемой территории.

Также важно отметить, что этап анализа существующих условий является фундаментом, на котором базируется дальнейшая работа, и взаимодействие исполнителя и заказчика на нём является критически важным.

Для этапа транспортного и социологического исследований как составляющих анализа существующего положения наиболее важным является обеспечение достаточной выборки при проведении социологического исследования, а также определение достаточного количества и правильного расположения точек обследования.

Ключевыми ошибками на данном этапе являются неверное определение расположения точек обследований или их недостаточное количество; игнорирование пересечений на периферийных частях рассматриваемой территории; уменьшение периодов или времени обследования в целях сокращения стоимости соответствующих работ; игнорирование пешеходных и пассажирских потоков; некорректная постановка вопросов социологического исследования; некорректное проведение самих опросов (наводящие вопросы, интонации на определённых вариантах ответов); отсутствие распределения исполнителем потенциальных респондентов по территории; недостаточное количество вопросов; неверная интерпретация результатов соответствующих исследований.

Отдельно стоит добавить, что нередко часть указанных ошибок вызвана попыткой экономии средств как заказчиком при установке низкой стоимости государственного контракта, так и исполнителем при попытке сокращения издержек при выполнении работ.

Вместе с тем, важно отметить, что транспортные и социологические исследования являются частью исходной информации, необходимой для описания существующего состояния. Таким образом, исполнитель должен согласовывать с заказчиком методики проведения исследований и приводить в документах транспортного планирования их результаты.

Прогноз социально-экономического развития должен учитывать не только численность населения, но и прочую статистику, учёт которой обязателен как в транспортной модели, так и при определении развития территории, например, количество рабочих мест, мест в учебных заведениях, численность населения в трудоспособном возрасте и численность учеников. Корректность этих показателей является принципиально важной при учёте перспективного развития территории, а также при последующей оценке эффективности мероприятий.

Ключевыми ошибками при построении прогноза являются: неполный учёт документов стратегического и территориального планирования, игнорирование информации о перспективных инвестиционных проектах. Так, без проведения анализа приведённых данных невозможно построить корректный прогноз социально-экономического развития, что приведёт к неверной оценке эффективности предложенных мероприятий и является недопустимым при стратегическом планировании транспортной системы.

Мультимодальная транспортная модель является одним из ключевых инструментов при разработке документов транспортного планирования, и обеспечение её качества является неотъемлемым условием успешной подготовки документов.

Наиболее частыми ошибками при разработке транспортной модели можно считать: некорректную проработку графа улично-дорожной сети и организации дорожного движения, ошибки при вводе маршрутной сети пассажирского транспорта общего пользования, ошибки при вводе социально-экономической статистики, ошибки при калибровке транспортной модели. Важно отметить, что ошибки при разработке транспортной модели можно свести к минимуму при предоставлении заказчиком полного перечня исходной информации.

Также отмечено, что в отдельных случаях транспортная модель не разрабатывается или разрабатывается в программном комплексе, не предусматривающем расчёт по классической четырёхшаговой модели.



Вместе с тем, заказчик в подавляющем большинстве случаев не обладает необходимым программным комплексом и не способен проверить качество разработанных транспортных моделей, чем иногда пользуются исполнители.

Выбор и обоснование варианта проектирования также является одним из ключевых разделов документов транспортного планирования. Одним из слабых мест данного раздела является отсутствие в нормативных документах закреплённых критериев, определяющих требования к вариантам проектирования. Следствием отсутствия утверждённых критериев вариантов проектирования является отсутствие единого подхода в их формировании.

В настоящее время наиболее распространёнными подходами к формированию вариантов проектирования являются: формирование принципиально разных, не связанных друг с другом, вариантов проектирования и формирование кумулятивных вариантов, т.е. формирование минимального, оптимального и максимального варианта путём наращивания мероприятий.

По результатам этих работ исполнителями допускаются следующие ключевые ошибки: отсутствие описания вариантов проектирования, отсутствие обоснования вариантов приведения, обоснование результатов моделирования на основании абсолютных показателей (например, объёмов ввода транспортной инфраструктуры), оценка и обоснование вариантов проектирования без использования прогнозной транспортной модели, формирование мероприятий вокруг заранее определённого сценария.

На этапе разработки мероприятий исполнитель обязан учитывать как результаты анализа существующих условий движения, так и запланированные заказчиком мероприятия.

Так, ключевыми ошибками на этапе разработки мероприятий являются: ошибки при анализе существующего положения, что влечёт за собой неверное определение вектора развития транспортной системы и определение некорректного перечня необходимых мероприятий; предложение нецелесообразных мероприятий, предложение мероприятий, реализация которых невозможна финансово и физически.

На данном этапе, как и на этапе анализа существующего положения, крайне важным является взаимодействие исполнителя и заказчика. Нужно понимать, что утверждение документов транспортного планирования накладывает на заказчика обязательства по их реализации, следовательно, некорректные мероприятия могут привести к ухудшению условий движения на рассматриваемой территории.

Принимая во внимание тот факт, что утверждение документов транспортного планирования накладывает на заказчика расходные обязательства, этап оценки стоимости мероприятий также имеет важное значение в составе документов транспортного планирования. В настоящее время, наиболее распространёнными практиками оценки стоимости мероприятий являются: оценка методом сопоставимых цен и оценка мероприятий с помощью нормативных сборников цен. Важно отметить, что ошибки, допущенные на этапе оценки стоимости мероприятий, преимущественно не оцениваются как критические ни исполнителем, ни в подавляющем большинстве заказчиком.

Тем не менее, ключевыми ошибками является завышение или занижение стоимости по следующим причинам: неверно подобран проект-аналог, стоимость проекта аналога значительно ниже за счёт более раннего срока реализации, отсутствие учёта отдельных особенностей проектов аналогов, отсутствие учёта инфляции при оценке долгосрочных мероприятий.

Оценка социально-экономической эффективности является отражением всех выполненных ранее работ. Данный раздел аккумулирует в себе все полученные выводы и результаты всех проведённых анализов. Раздел оценки социально-экономической эффективности также, как и раздел с выбором и обоснованием варианта проектирования, не имеет чётких критериев оценки, в связи с чем оценка выполняется с помощью таких способов, как оценка абсолютных показателей ввода транспортной инфраструктуры, оценка чистого дисконтированного дохода, оценка показателей, оценка показателей транспортной модели.

Критическими ошибками при оценке социально-экономической эффективности являются: неиспользование результатов

транспортного моделирования, а также искусственное «подкручивание» результатов моделирования или объёма капитальных затрат с целью получения положительного эффекта. Такие ошибки являются критическими, так как изначально отражают неэффективность предложенных мероприятий, о которой умалчивают исполнители.

Стоит отметить, что в статье сформирован перечень наиболее распространённых ошибок исполнителей и заказчиков при разработке документов транспортного планирования. Число возможных ошибок и «подводных камней» значительно больше и не исчерпывается приведённым перечнем, а зависит от внимательности и опыта разработчика, при этом допуск любой из них приводит к несостоятельности разработанного документа.

При этом для снижения рисков разработки и утверждения некачественных документов транспортного планирования можно отметить несколько ключевых направлений:

- более детальная проверка документов на всех этапах их разработки;
- увеличение периодичности проведения мониторинга дорожного движения [8], как способ дополнительной проверки результатов и сбор информации в качестве предоставляемых исходных данных;
- постоянное взаимодействие заказчика и исполнителя;
- применительно к КСОДД, согласование мероприятий с ответственными органами власти граничащих территорий на завершающем этапе работ [9];
- проведение независимой экспертизы результатов работ;
- переподготовка или повышение квалификации сотрудников [10];
- установка более жёстких критериев при проведении конкурсной процедуры и отказ от аукциона, как способа определения поставщика [11];
- формирование реальной стоимости работ, при которой исполнитель не будет вынужден снижать качество работ в целях сокращения издержек.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

В завершение следует отметить, что разработка качественных документов транспортного планирования является

основой устойчивого развития транспортной системы.

В России качество их разработки будет проходить проверку как один из необходимых аспектов достижения целей национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги».

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобанов Е. М. Транспортная планировка городов: Учебник для студентов вузов. — М.: Транспорт, 1990. — 240 с.
2. Клиновштейн Г. И., Афанасьев М. Б. Организация дорожного движения: Учебник для вузов. — М.: Транспорт, 2001. — 247 с.
3. Вучик В. Транспорт в городах, удобных для жизни. — М.: Территория будущего, 2011. — 413 с.
4. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», утверждённый президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 года № 15). [Электронный ресурс]: <http://government.ru/info/35558/>. Доступ 21.06.2020.
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2015 года «Об утверждении требований к программам комплексного развития транспортной инфраструктуры поселений, городских округов». [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71196074/>. Доступ 21.06.2020.
6. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 26 декабря 2018 года № 480 «Об утверждении Правил подготовки документации по организации дорожного движения». [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72155302/>. Доступ 21.06.2020.
7. Методические рекомендации по разработке документов транспортного планирования субъектов Российской Федерации, утверждённые протоколом заседания рабочей группы проектного комитета по национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (протокол от 12 августа 2019 года № ИА-63). [Электронный ресурс]: <https://mintrans.gov.ru/documents/10/10128/>. Доступ 21.06.2020.
8. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 18 апреля 2019 года № 114 «Об утверждении Порядка мониторинга дорожного движения». [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72171658/>. Доступ 21.06.2020.
9. Федеральный закон «Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 29 декабря 2017 года № 443-ФЗ. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286793/. Доступ 21.06.2020.
10. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 29 декабря 2018 года № 487 «Об утверждении перечня профессий и должностей, связанных с организацией дорожного движения, и квалификационных требований к ним». [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72088492/>. Доступ 21.06.2020.
11. Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 05 апреля 2013 года № 44-ФЗ. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/. Доступ 21.06.2020.





Key Mistakes in Development of Transport Planning Documents



Ivan Yu. KOZELSKY

Kozelsky, Ivan Yu., Russian Road Research Institute, Moscow, Russia.*

ABSTRACT

Sustainable development of any of the systems is impossible without long-term planning. The mechanism for implementing long-term planning in terms of providing transportation services to the population is development of relevant transport planning documents, namely: programs for integrated development of transport infrastructure, integrated traffic management schemes, integrated schemes for organizing public transportation services for the population.

This article is devoted to the analysis of typical mistakes that can be made by developers of relevant documents. The objective of the article is to highlight key errors, to reduce their number, and to improve, accordingly, quality of the documents being developed.

In preparing the article, the author used the comparative analysis of transport

planning documents developed and approved by the authorities of large and largest cities, as well as the requirements regarding their content established by regulatory documents.

The article, referring to Russian practices, provides a breakdown of transport planning documents by key mandatory sections. Typical mistakes in development of each of them are highlighted. The article ends with description of key areas capable to reduce risks in development and further approval of transport planning documents.

General approaches revealed in the research are to great extent of universal nature, so the results can be applied to development of other transport documents besides those mentioned in the article, as well as in other countries.

Keywords: transport planning documents, errors in development, program for integrated development of transport infrastructure, comprehensive traffic management scheme, comprehensive scheme for organizing public transportation services for the population.

*Information about the author:

Kozelsky, Ivan Yu. – Deputy Head of the Unit of Methodological Support for Transport Planning of the Transport Planning Department of the Russian Road Research Institute (FAU ROSDORNII), Moscow, Russia, KozelskyIY@rosdornii.ru.

Article received 07.04.2020, accepted 21.06.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 108.

Background.

Recently, domestic and foreign authors have published a significant amount of works on development of urban transport systems, particularly, in the field of transport planning (E. M. Lobanov [1], G. I. Klinkovshtein, M. B. Afanasyev [2], V. Vuchik [3], and others). These works emphasize the importance of a systematic approach in implementation of transport projects, that are implemented through transport planning documents. So, their developers should possess the ability to work with a large amount of information and versatile knowledge, both in the field of road design, traffic management and passenger transportation, and in certain areas of sociology and economics. At the same time, in the process of this work, errors inevitably arise that cast doubt on correctness of the work results. The article considers key mistakes made by the customers and contractors in development of transport planning documents, which entail a decrease in quality of the developed documentation.

In preparing the article, the author used the comparative analysis of transport planning documents developed and approved by the authorities of large and largest cities, as well as the requirements regarding their content established by regulatory documents in Russia, in particular by the Decree of the Government of the Russian Federation of December 25, 2020 No. 1440, Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 26, 2018 No. 480, guidelines for development of transport planning documents for the constituent entities of the Russian Federation.

The *objective* of the article is to collect and systematize typical mistakes made by developers when preparing transport planning documents. It is the knowledge of typical mistakes that improves quality of work performed and contributes to respect of the principles of sustainable development.

The materials were prepared using a comparative analysis of the current regulatory legal documents and the methodological base that determines the composition of the

documents and of the documents themselves. At the same time, the content of the documents under consideration was analyzed regarding their compliance with the current regulatory and technical documents, the depth of elaboration, and the use of advanced domestic and foreign experience. The errors revealed during the analysis were collected and systematized according to certain normative legal and methodological documents of the work sections.

It is important to note that the documents taken into account for the article were developed by various legal entities; accordingly, it is incorrect to assert that each of the documents contains a complete list of errors indicated in the article. However, each of the errors reduces the quality of the developed documents and can also lead to a deterioration in traffic conditions. And, on the contrary, the possibility of identifying and eliminating the most typical errors reflected in the article will help reduce risks in development and approval, as well as achieve, referring to Russian practices, the goals of the national project in the field of safe and high-quality highways.

Results.

Within the framework of the article, the following transport planning documents are considered:

1. Program for comprehensive development of transport infrastructure (PCDTI).
2. Comprehensive traffic management scheme (CTMS).
3. Comprehensive scheme for organizing public transportation services for the population (CSOT).

It is important to note that the occurrence of errors in development of documents depends on both the customer and the contractor.

Errors depending on the customer:

1. *Setting tight deadlines for development.*

At present, the responsible authorities of the constituent entities participate in tenders for development of transport planning documents based on the requirements of the national Safe and high-quality highways project [4].



The summer of 2019 was identified by the national project as the deadline for development of most documents, nevertheless, the large amount of work required to conduct competitive procedures led to a significant reduction in time required for development of the documents themselves. In turn, tight deadlines are a significant reason for the decrease in quality of transport planning documents, which manifests itself in an insufficiently deep study of the available data and errors in performance of work.

2. Partial lack of initial information from behalf of the customer.

The incompleteness of the information provided may result from both the lack of monitoring of road conditions, and from insufficient attention to it. Nevertheless, the lack of official information significantly increases labour costs of the contractor and forces him to either ignore relevant parts of sections of documents or use information from open sources. Moreover, the information obtained in this way may be unreliable and data may be contradictory, which will inevitably lead to errors in performance of work.

For the convenience of assessing possible errors on the part of the contractor, it is proposed to highlight general sections in the documents. So, in transport planning documents named above, regardless of their specific purpose, the following general sections can be distinguished [5–7]:

- analysis of the current situation;
- conducting transport and sociological research;
- forecast of socio-economic development;
- development of a transport model;
- selection and justification of the design option;
- development of a list of relevant activities;
- an integrated cost estimate of the proposed activities;
- assessment of the socio-economic efficiency of the proposed measures.

When analyzing the current situation, the key task of the contractor is to collect and

process initial information, including that obtained during surveys, and to formulate correct conclusions. At the same time, the contractor in most projects does not have an exhaustive amount of information. The reasons for this may be both a request for an incomplete list of data, and a partial lack of necessary information within the data provided by the customer. Nevertheless, the lack of the necessary list of initial data results in incorrect conclusions based on the results of the analysis, incomplete amount of necessary conclusions, partial absence of annexed materials in the text of the transport planning document, unnecessary consolidation and generalization.

At this stage, it is proposed to consider the most important initial data: socio-economic statistics of the territory under consideration, information on the route network of public passenger transport (including information on passenger traffic in the context of routes), information on organization of traffic (including information on arrangement of technical means of organizing road traffic), information on accidents, information on the events planned by the responsible executive authority.

The most common mistakes are: using incorrect data, which are subsequently used in the analysis and development of the transport model; development in the course of assessment of contradictory strategic planning documents; incorrect assessment of development of the system and of the vector of city development (planning documents should focus on it); the absence or incomplete accounting by the contractor of the road accidents (the reduction of which is a key focus area of the national Safe and High-Quality Highways project), analysis of performance characteristics using unreliable open sources; using the practices of analyzing the transport system without presenting a detailed justification of the methodology; lack of analysis of the budgetary capacity of the territory under consideration.

It is also important to note that the stage of analysis of existing conditions is the foundation on which further work is based, and so, the interaction of the contractor and

the customer is critically important at this phase.

For the stage of transport and sociological research, as components of the analysis of the current situation, the most important thing is to ensure a sufficient sample during the sociological survey, as well as to identify a sufficient number and correct location of survey points.

The key mistakes at this stage are associated with incorrect placement of survey points or their insufficient number; ignoring intersections in the peripheral parts of the territory under consideration; reduction of number of inspection periods or reduction in time in order to reduce the cost of related work; ignoring pedestrian and passenger flows; incorrect formulation of sociological research questions; incorrect conduct of the polls themselves (leading questions or intonation for certain answer options); lack of distribution by the contractor of potential respondents across the territory; insufficient number of questions; misinterpretation of the results of relevant studies.

It should be added particularly that often some of these errors are caused by an attempt to save money both by the customer when setting a low cost of a public contract, and by the contractor when trying to reduce costs when performing work.

However, it is important to note that transport and social studies are part of the background information needed to describe the status quo. Thus, the contractor must agree with the customer on research methods and quote in full their results in transport planning documents.

The forecast of socio-economic development should consider not only the population statistics, but also other statistics, which must be taken into account both in the transport model and in determining development of the territory, for example, the number of jobs, the number of university students, the number of the working-age population and the number of school students. The correctness of these indicators is fundamentally important when considering future development of the territory, as well

as for subsequent assessment of effectiveness of measures.

The key mistakes when building a forecast are linked to incomplete accounting of strategic and territorial planning documents, ignoring information about promising investment projects. So, without analyzing the data provided, it is impossible to build a correct forecast of socio-economic development, which will in turn result in incorrect assessment of effectiveness of the proposed measures and thus is unacceptable in strategic planning of the transport system.

A multimodal transport model is one of the key tools in development of transport planning documents, and ensuring its quality is an essential condition for successful development of documents.

The most frequent mistakes in development of a transport model can be associated with incorrect study of the road network graph and traffic organization, errors in entering the route network of public passenger transport, errors in entering socio-economic statistics, errors in calibrating the transport model. It is important to note that errors in development of a transport model can be minimized if the customer provides a complete list of initial information.

It was also noted that in some cases, the transport model is not developed or is being developed in a software package that does not provide for the calculation according to the classical four-step model. At the same time, the customer, in the overwhelming majority of cases, does not have the necessary software package, and is not able to check the quality of the developed transport models, and what is sometimes being abused by the contractors.

The selection and justification of a design option is also a key sections of transport planning documents. A weak point of this section is the lack of fixed criteria in the regulatory documents that determine the requirements for design options. The lack of approved design options criteria results in the lack of a single approach to their development.

Currently, the most common approaches to development of design options comprise development of fundamentally different, not



related to each other, design options and development of cumulative options, i.e. development of the minimum, optimal and maximum options by adding enlisted activities.

Based on the results of these works, the contractors made the following key mistakes: lack of a description of design options, lack of justification for assembling options, justification of modelling results based on absolute indicators (for example, the volume of transport infrastructure commissioning), assessment and justification of design options without using a predictive transport model, development of activities following pre-defined scenario.

At the stage of developing activities (measures), the contractor must consider both the results of the analysis of existing traffic conditions and the measures planned by the customer.

Thus, the key mistakes at the stage of developing measures comprise mistakes in the analysis of the current situation, which entails an incorrect definition of the vector of development of the transport system and the identification of an incorrect list of necessary measures; proposal of inexpedient measures, proposal of measures, the implementation of which is impossible financially and physically.

At this stage, as well as at the stage of analyzing the current situation, interaction between the contractor and the customer is of extreme importance. It is necessary to completely understand that approval of transport planning documents imposes obligations on the customer to implement them, therefore, incorrect measures can lead to a deterioration in traffic conditions in the territory under consideration.

Since the approval of transport planning documents imposes expenditure obligations on the customer, the stage of assessing the cost of activities is also important as integral part of transport planning documents. Currently, the most common practices for assessing the cost of activities include assessment by the method of comparable prices and assessment of activities using standard price collections. It is important to note that mistakes made at

the stage of assessing the cost of activities are in most cases assessed as critical neither by the contractor or, in the vast majority, by the customer.

Nevertheless, the key mistakes are overestimation or underestimation of the cost for the following reasons: the analogue project was chosen incorrectly, the cost of the analogue project is much lower due to the earlier implementation period, the lack of consideration of certain features of the analogue projects, the lack of inflation accounting when evaluating long-term measures.

Assessment of socio-economic efficiency is a reflection of all previously completed work. This section accumulates all the findings and the results of all the analyses carried out. The section for assessing socio-economic efficiency, as well as the section with the choice and justification of the design option, does not have clear assessment criteria, and therefore assessment is carried out using such methods as assessment of absolute indicators of transport infrastructure commissioning, assessment of net discounted income, assessment indicators, assessment of indicators of the transport model.

Critical mistakes in assessing socio-economic efficiency comprise non-use of the results of transport modelling, as well as artificial «inflating» of the modelling results or of the volume of capital costs to obtain a positive effect. Such errors are critical, since they initially reflect ineffectiveness of the proposed measures, while the contractors are silent about it.

It should be noted that the article contains a list of the most common mistakes made by contractors and customers when developing transport planning documents. The number of possible errors and «pitfalls» is much greater and is not limited to the above list, but depends on care and experience of the developer, while the tolerance of any of them results in inconsistency of the developed document.

At the same time, to reduce the risks of developing and approving low-quality transport planning documents, several key areas can be noted:

- more detailed checking and verification of documents at all stages of their development;
- increasing frequency of traffic monitoring [8], as a way of additional verification of the results and collecting information to be provided as the initial data;
- constant interaction between the customer and the contractor;
- in relation to CTMS, coordination of activities with the responsible authorities of the bordering territories at the final stage of work is needed [9];
- carrying out an independent examination of the work results;
- retraining or advanced training of employees [10];
- setting more stringent criteria for the tender procedure and refusal of the auction as a way to determine the contractor [11];
- real costing of the work, providing that the contractor will not be forced to reduce the quality of work to reduce costs.

Brief conclusions. In conclusion, it should be noted that development of high-quality transport planning documents is the basis for sustainable development of the transport system.

In Russia the quality of their development will be checked as one of the necessary aspects of achieving the objectives of the national Safe and high-quality highways project.

REFERENCES

1. Lobanov, E. M. Transport planning of cities: Textbook for university students [*Transportnaya planirovka gorodov: Uchebnik dlya studentov vuzov*]. Moscow, Transport publ., 1990, 240 p.
2. Klinkovshtein, G. I., Afanasyev, M. B. Organization of road traffic: Textbook for universities [*Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya: Uchebnik dlya vuzov*]. Moscow, Transport publ., 2001, 247 p.
3. Vuchik, V. Transport in cities convenient for life [*Transport v gorodakh, udobnykh dlya zhizni*]. In Russian. Moscow, Territoriya buduschego publ., 2011, 413 p.
4. Passport of the national Safe and High-Quality Highways project, approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects (Minutes No. 15 dated December 24, 2018) [*Pasport natsionalnogo proekta «Bezopasnie i kachestvennie avtomobilnie dorogi», utverzhdeniy prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossiiskoi Federatsii po strategicheskomu razvitiyu i natsionalnym proektam (protocol ot 24 dekabrya 2018 goda No. 15)*]. [Electronic resource]: <http://government.ru/info/35558/>. Last accessed 21.06.2020.
5. Decree of the Government of the Russian Federation dated December 25, 2015 «On approval of requirements for programs for integrated development of transport infrastructure of settlements, urban districts» [*Postanovlenie Pravitelstva Rossiiskoi Federatsii ot 25 dekabrya 2015 goda «Ob utverzhdenii trebovaniy k programmam kompleksnogo razvitiya transportnoi infrastruktury poseleniy, gorodskikh okrugov*»]. [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71196074/>. Last accessed 21.06.2020.
6. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 26, 2018 No. 480 «On approval of the Rules for preparation of documentation on organization of road traffic» [*Prikaz Ministerstva transporta Rossiiskoi Federatsii ot 26 dekabrya 2018 goda No. 480 «Ob utverzhdenii Pravil podgotovki dokumentatsii po organizatsii dorozhnogo dvizheniya*»]. [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72155302/>. Last accessed 21.06.2020.
7. Guidelines for development of transport planning documents for the constituent entities of the Russian Federation, approved by the minutes of the meeting of the Working group of the project committee for the national Safe and high-quality highways project (minutes of August 12, 2019 No. IA-63) [*Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke dokumentov transportnogo planirovaniya sub'ektov Rossiiskoi Federatsii, utverzhdenie protokolom zasedaniya rabochei gruppy proektnogo komiteta po natsionalnomu proektu «Bezopasnie i kachestvennie avtomobilnie dorogi» (protokol ot 12 avgusta 2019 goda No. IA-63)*]. [Electronic resource]: <https://mintrans.gov.ru/documents/10/10128/>. Last accessed 21.06.2020.
8. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated April 18, 2019 No. 114 «On approval of the Road traffic monitoring procedure» [*Prikaz Ministerstva transporta Rossiiskoi Federatsii ot 18 aprelya 2019 goda No. 114 «Ob utverzhdenii Poryadka monitoring dorozhnogo dvizheniya*»]. [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72171658/>. Last accessed 21.06.2020.
9. Federal Law «On organization of road traffic in the Russian Federation and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation» dated December 29, 2017 No. 443-FZ [*Federalnyi zakon «Ob organizatsii dorozhnogo dvizheniya v Rossiiskoi Federatsii i o vnesenii izmenenii v otdelnie zakonodatelnye akty Rossiiskoi Federatsii» ot 29 dekabrya 2017 goda No. 443-FZ*]. [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286793/. Last accessed 21.06.2020.
10. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 29, 2018 No. 487 «On approval of the list of professions and positions related to organization of road traffic, and qualification requirements addressed to them» [*Prikaz Ministerstva transporta Rossiiskoi Federatsii ot 29 dekabrya 2018 goda No. 487 «Ob utverzhdenii perechnya professii i dolzhnostei, svyazannykh s organizatsiei dorozhnogo dvizheniya, i kvalifikatsionnykh trebovaniy k nim*»]. [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72088492/>. Last accessed 21.06.2020.
11. Federal Law «On the contract system in the procurement of goods, works, services to meet state and municipal needs» dated April 05, 2013 No. 44-FZ [*Federalnyi zakon «O kontraktnoi sisteme v sfere zakupok tovarov, rabot i uslug dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipalnykh nuzhd» ot 05 aprelya 2013 goda No. 44-FZ*]. [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/. Last accessed 21.06.2020.





Тенденции развития комплексных транспортных схем городов



Михаил НЕМЧИНОВ



Александр ХОЛИН

*Немчинов Михаил Васильевич – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия.
Холин Александр Сергеевич – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия*.*

В статье рассматривается процесс планирования работы городского транспорта в форме комплексной транспортной схемы (КТС), являющейся транспортной частью генерального плана развития города и рассматривающей вопросы организации городского транспорта. Цель статьи – сформулировать основные направления разработок в сфере транспортного планирования на основе современного отечественного и зарубежного опыта и знаний, в том числе с использованием ретроспективного анализа изменений в сфере планирования городского транспорта.

Анализ представлен для условий Российской Федерации, особенностями которых

являются относительно поздняя (по сравнению со странами Европы и США), но быстро протекающая автомобилизация страны, изменение квалификационного состава специалистов, работающих в сфере планирования городского транспорта, определённая потеря опыта и умения разработки КТС за последние годы.

Предложенные выводы представляют собой краткое описание концепта общего инструментария, схем и наиболее перспективных методов разработки подходов к развитию комплексных транспортных схем и требуют дальнейших углублённых исследований по каждому направлению.

Ключевые слова: городской транспорт, генеральный план, комплексная транспортная схема, транспортные корреспонденции, моделирование, организация движения, автомобильёмкость, парковка, экстренная эвакуация.

*Информация об авторах:

Немчинов Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительства и эксплуатации дорог Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, dekanat@da.madi.ru.

Холин Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры изыскания и проектирования дорог Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, holin-as@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 13.04.2020, принята к публикации 20.06.2020.

For the English text of the article please see p. 127.

ВВЕДЕНИЕ. РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ

Проблемы обеспечения движения городского транспорта всегда были и являются в настоящее время следствием несоответствия городских путей сообщения уровню развития и потребностям городского транспорта. Жители всегда перемещались внутри населённых пунктов (с личными и производственными целями). По мере пространственного развития затраты времени на передвижение возрастали, увеличивались количества перемещаемых грузов, что вызвало возникновение и развитие транспорта — личного конного, конных повозок и т.д. Возникший транспорт сразу же потребовал более совершенных путей сообщения. Постепенно возникла сеть улиц, по которым осуществлялось движение транспортных средств и пешеходов. Рост числа и техническое совершенство транспортных средств сопровождалось развитием путей сообщения — сети дорог и улиц, их техническим улучшением.

Весь период развития городов (мировой процесс) отечественные специалисты-транспортники [1–6] делят на несколько этапов:

1. Городской транспорт представлен повозками. Улицы с узкой проезжей частью, для транспорта — с деревянной или булыжной мостовой, остальные — без укрепления проезжей части.

2. Появление рельсовых путей (вначале с конной тягой (1853–1854 гг.), затем электрической (1881 г.). Улицы узкие, старой постройки. Первые признаки транспортного кризиса.

3. Возникновение внеуличного транспорта и внеуличных путей сообщения (метрополитен: 1863 г. — Лондон, 1885 г. — Нью-Йорк, 1892 г. — Чикаго, 1935 г. — Москва).

4. Решительная реконструкция улично-дорожной и внеуличной транспортной сети: реконструкция улиц с изменением их геометрических параметров, транспортная специализация улиц, массовое строительство транспортных пересечений в разных уровнях, объединение городских и пригородных транспортных коммуникаций в единую транспортную систему (настоящее время).

Во всех случаях причиной перехода от предшествующего этапа состояния городской среды к последующему являлось перенасыщение населённых пунктов транспортными средствами и возникновение затруднений в их движении. Одновременно развивалась и усложнялась система обеспечения движения наземного (уличного) транспорта (включая пешеходные потоки, как вид городского движения). Развитие путей сообщения и системы организации движения по ним идёт с постоянным отставанием от развития городского транспорта, что требует периодического приведения их в соответствие друг другу.

В России вопросы организации городского транспорта решаются посредством разработки комплексной транспортной схемы (КТС) города, традиционно ориентированной на общественный пассажирский транспорт (уличный, а в городах с метрополитеном — и подземный).

В России изначально комплексная транспортная схема являлась составной частью генерального плана развития городов. Правда, она разрабатывалась после разработки генерального плана, и городской транспорт фактически не влиял на городскую планировку. В промежутки времени между разработкой новых генеральных планов (достаточно длительные) в связи с прогрессом на городском транспорте, трудностями прогнозирования на длительный срок приходится рассматривать перспективы транспортного развития на более короткие промежутки времени. Поэтому разработка комплексных транспортных схем по своей сути является важнейшей постоянной градостроительной задачей. В конце 90-х годов XX века (в известный для России переходный период) на короткое время комплексная транспортная схема была исключена из состава генерального плана развития городов, что совпало с началом бурной автомобилизации страны. Очень скоро, особенно в крупных городах, заявили о себе острые транспортные проблемы, что потребовало возобновления разработки комплексных транспортных схем. В настоящее время такие схемы массово разрабатываются не только в городах, но и в районах сельского проживания.



Однако «период перестройки» не прошёл бесследно для городского строительства. Опыт и знания разработки таких схем во многом утрачен, причём на фоне резкого (взрывного типа) роста городского транспорта, его количественного роста и технического совершенствования, возрастания транспортной подвижности населения, замедления работ по реконструкции улично-дорожной сети, возникновения целого ряда социально-экономических изменений, квалификационных изменений заказчиков и разработчиков комплексных транспортных схем, массовой «цифровизации» технологических методов городского и транспортного проектирования.

Начиная с 1992 года по настоящее время кардинально изменилась «среда транспортного обитания» в России: в городах, городских агломерациях и, коренным образом, в сельской местности. Изменились (выросли, «укрупнились») населённые пункты, сформировались городские агломерации. Автомобилизация населения привела к формированию в городах огромных автомобильных парков (в городах и городских агломерациях — до многих миллионов и сотен тысяч автомобилей). В результате на городских улицах и дорогах появились интенсивные транспортные потоки (до десятков и сотен тысяч автомобилей в сутки). Соответственно изменились условия движения городского транспорта. Преимущественное место на улицах и городских дорогах занял автомобильный транспорт, потеснив общественный. Снизились скорости и затруднился процесс движения. Одновременно ввиду большого числа частных легковых автомобилей, роста территории городов, перемещения и деления производственных предприятий и организаций выросла дальность поездок жителей. Автомобили, помимо мест для движения, потребовали мест для стоянок (кратковременных) и хранения (длительного). В городах возникла острая проблема автомобильных парковок. В результате произошло переполнение улиц, дорог, внутридворовых территорий стоящим и движущимся автотранспортом, часто препятствующим движению другого транспорта. В этом аспекте следует

вспомнить, что любой объём имеет пределы вместимости. В литровую бутылку не залить более одного литра жидкости. Земной шар также представляет собой специфическую ёмкость. Уже давно определено, что ресурсы («вместимость») земного шара достаточно ограничены, и он может прокормить (и тем самым поддержать существование) лишь определённое количество людей (где-то не более 12 миллиардов) [7]. Также и города — их территория постоянно расширяется в связи с увеличением числа жителей. Но сейчас увеличить территорию города довольно сложно. Нет пустующих земель. Города России в основном растут вверх. В 1968 г. площадь территории г. Москвы составляла всего 875 км² при населении порядка 7 млн человек, в 2019 году — 2562 км² при населении 12,62 млн человек. Плотность населения составила в 1968 г. 8000 чел./км² [8], в 2020 г. — 4980 чел./км² [9]. Но это осреднённая по городу плотность. В центре Москвы плотность осталась не меньшей, чем в 1968 г. Увеличение площади привело не к снижению плотности заселения традиционной территории города, а к образованию специфической огромной агломерации. Специфической потому, что обычно городские агломерации образуются стихийно вокруг всего города, путём образования, развития и постепенного слияния пригородных городов и городков. Её геометрическую форму обычно формируют местные природные условия (реки, озёра, горы и т.п.). Современная московская городская агломерация искусственная, мало связанная с развитием московских пригородов.

Простой расчёт показывает, что в настоящее время в Москве практически каждая семья имеет один—два автомобиля (округлённо: население — 12,5 млн человек; число людей в семье — 3—4, значит число семей — 4,17—3,12 млн число зарегистрированных в городе автомобилей — более 4,5 млн) [9; 10]. И их число ежегодно растёт на несколько сотен тысяч. Возникла проблема — где их хранить? Подавляющая часть «активного» автопарка работает только в часы «пик». Автомобили, стоящие и движущиеся, уже сейчас занимают проезжую часть настолько, что

по многим улицам становится невозможно проехать. Это говорит о переполнении города автомобилями. В этой связи своевременно ставить вопрос об оценке автомобильёмкости города и его улично-дорожной сети. Автомобили необходимы, то есть, должны быть, они должны ездить, обеспечивать потребности горожан, обеспечивать удобства жизни. Однако, чтобы это обеспечивалось и в будущем, пора оценить допустимые пределы заполнения городских территорий — улиц, дорог, площадей, дворовых территорий — автомобилями с учётом экологического ущерба. Уровень загрязнения воздуха автомобильным транспортом хорошо известен (он чрезвычайно велик). Высоко воздействие автотранспорта на уровень шума в городе. Есть и загрязнение почвы топливом, маслами, продуктами износа деталей автомобилей. Но всему есть предел. Пришло время его оценить и рекомендовать администрациям населённых пунктов определённые направления и способы (методы) управления процессом автомобилизации. Практика жизни показала, что, как и рыночные отношения, так и процесс накопления автомобилей в городах требуют регулирования для обеспечения благоприятных условий жизни жителей населённого пункта.

В последние десятилетия резко выросли техногенные угрозы жителям населённых пунктов (всех размеров) в виде высокой транспортной аварийности, роста загрязнения среды обитания отходами городского транспорта (отработавшими газами, продуктами износа транспортных средств и т.п.). Более серьёзными и масштабными стали угрозы природно-техногенного характера: природные и техногенные пожары и загрязнения воздуха, затопления территории населённых пунктов (в результате подтопления атмосферными осадками, при наводнениях) и другие стихийные бедствия (пыльные бури, смерчи и т.п.). Катастрофические ситуации требуют спасения жителей посредством быстрой эвакуации (как это, например, делают в США и ряде других стран).

Изменились и административно-технические условия разработки комплексных транспортных схем. Изменился

квалификационный состав заказчиков таких схем и корпуса их разработчиков: в обоих случаях резко сократилось (вплоть до исчезновения) количество квалифицированных специалистов в области градостроительства и городского транспорта как в составе администраций городов — заказчиков комплексных транспортных схем, так и в составе исполнительных организаций — разработчиков схем. В России до периода перестройки работала сеть проектно-исследовательских организаций градостроительного профиля, включавшая проектные институты (ЦНИИП Градостроительства и Гипрогор в Москве, Ленгипрогор в Ленинграде), градостроительные кафедры в вузах Москвы (МИСИ, МАРХИ), Ленинграда (ЛИСИ), Омска, Ростова на Дону и других городов, обладавшая огромным потенциалом высокопрофессиональных специалистов градостроительно-транспортного профиля. В годы «перестройки» произошла смена организаций-исполнителей и потеря, если не всей, то подавляющей части корпуса специалистов-транспортников градостроительного профиля. «Цифровизация» проектного процесса (совершенно необходимая по техническим причинам) привела к массовому появлению в составе новых предприятий большого количества достаточно грамотных программистов, которые, однако, не владеют градостроительно-транспортными знаниями. Следствием является переориентация транспортных решений в сторону их «цифровизации» с ущербом для практических градостроительно-транспортных решений.

Развитие и совершенствование юридической базы в России имеет одним из следствий запрет на сбор некоторых видов необходимой и важнейшей для разработки комплексных транспортных схем информации — сведений о транспортных корреспонденциях. Если ранее можно было получать данные о местах проживания работников предприятий и учреждений (то есть, местах расположения пунктов отправления пассажиров общественного транспорта) и по этим данным надёжно формировать трудовые транспортные корреспонденции, то в настоящее время закон о сохранности сведений личного характера (персональных данных)



запрещает это. К сожалению, новая система сбора данных о транспортных и пешеходных передвижениях жителей городов в России не создана. К тому же появилась масса очень мелких предприятий, которые в сумме формируют значительные пассажиропотоки (пешеходные, на общественном и личном автомобильном транспорте). В США каждые десять лет проводятся обезличенные демографические обследования населения в виде переписей, участие в которых для граждан страны является обязательным. В перечень собираемой информации включены вопросы о транспортных и пешеходных передвижениях. Собранной и обработанной обезличенной информацией можно свободно пользоваться при разработке схем транспортного обслуживания [11].

СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ

Несмотря на все произошедшие в России изменения, цель и задачи разработки комплексных транспортных схем не только сохранились полностью, но расширились. Целью, в свете создания городов, удобных для жизни, является повышение уровня транспортной благоприятности жизни (комфортных условий перемещений): трудовой деятельности и отдыха жителей населённых пунктов, обеспечения техногенной безопасности населения, создания благоприятных условий развития всех видов хозяйств населённых пунктов.

Задачи в целом сохранились, но расширились: установление графа транспортных корреспонденций на легковом и грузовом автомобильном транспорте; на этой основе разработка вариантов распределения пассажирских, автомобильных и пешеходных потоков по улично-дорожной сети и выбор оптимального из них; разработка принципов оптимальной организации движения транспорта и пешеходов на важнейших транспортных узлах; разработка комплекса инженерных мер по приведению улично-дорожной сети в соответствие требованиям удобства и безопасности транспортного и пешеходного движения.

Формирование транспортных и пешеходных корреспонденций допускает широкое математическое моделирование

в масштабе города (макромоделирование) и в масштабе отдельных транспортных узлов (микромоделирование), программирование при сборе и обработке исходной информации.

Произошедшие в России изменения обусловили необходимость включения в комплексную транспортную схему новых транспортных решений, частичную переориентацию традиционных разработок в направлении оценки автомобильёмкости города, требования оценки возможности обеспечения аварийной эвакуации населения в условиях техногенных и иных катастроф. Этому вопросу — вопросу экстренной эвакуации жителей населённых пунктов на автомобильном транспорте — ранее фактически не уделялось внимания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изложенное позволяет сформулировать основные тенденции развития и совершенствования комплексных транспортных схем городов в интересах формирования городов, удобных для жизни, сформировать содержание КТС ОДД, интегрирующее классический российский опыт и современные требования, способы и методы планирования.

Сохранение традиционных вопросов:

- анализ улично-дорожной сети рассматриваемого городского образования;
- анализ существующей схемы и маршрутной системы городского общественного транспорта по видам;
- анализ существующих автомобильных потоков и системы парковки автомобилей (используя математическое [12–28] и физическое [29–35] моделирование);
- приведение транспортной схемы городского наземного общественного транспорта и его маршрутной системы в соответствие с графом трудовых транспортных корреспонденций населения;
- анализ пешеходных путей и пешеходных потоков;
- анализ системы парковки автомобилей.

Разработка новых вопросов:

- использование математического моделирования для оптимального распределения трудовых корреспонденций

на общественном и личном автомобильном транспорте, грузовых перевозок по существующей улично-дорожной сети города;

- разработка принципов оптимальной организации движения транспорта и пешеходов на транспортных узлах и городских улицах;

- оценка автомобилеёмкости города, исходя из условий обеспечения безопасного дорожного движения, кратковременного и длительного хранения автомобилей, оценка приемлемой по этим условиям допустимой численности городского автомобильного парка;

- оценка автомобилеёмкости территорий хранения: гаражей, дворовых и уличных стоянок, площадок хранения автомобилей;

- выбор оптимального режима движения автомобилей по сети городских улиц (с разных позиций — скорости передвижения, объёмов вредных выбросов);

- оценка уровня экологического воздействия автомобильного транспорта по принятому варианту организации его движения на экологическую ситуацию в городе;

- оценка, организация и инженерное оборудование пешеходных путей (тротуары и дорожки, наземные и подземные переходы улиц, освещение, ограждения безопасности, дорожные покрытия пешеходных путей, остановки общественного транспорта);

- оценка возможности срочной (за короткий период времени) эвакуации населения в случаях природных и техногенных катастроф, формирование маршрутов срочной эвакуации, разработка принципов оптимальной организации движения в период эвакуации (оптимальная скорость движения, организация одностороннего движения, максимальное использование ширины проезжей части, организация возможности встречного движения автомобилей МЧС, ГИБДД, скорой помощи и других аварийных средств, регулирование движения на маршрутах эвакуации), определение видов транспорта для эвакуации (общественный и личный, пункты сбора жителей к местам стоянок общественного транспорта).

Сложившиеся для городской среды обитания социально-экономические обстоятельства (юридические, экономические) делают практически невозможным использование при разработке комплексных транспортных схем, оценки состояния сети и маршрутной системы общественного транспорта, пешеходного движения, учёта автомобильного транспорта, формирования графов пассажирских и грузовых (исключая мелкий развозной транспорт) старых методов и способов.

Требуется разработать новые методы, соответствующие новой окружающей среде. Необходимо в максимальной мере использовать опыт сбора информации о передвижениях жителей, накопленный в зарубежных странах, где считается, что вопросы транспорта во многом определяют уровень благоприятности жизни, бизнеса. Такая практика получает всё большее распространение и в Москве.

КРАТКИЙ ВЫВОД

Изложенные выше результаты анализа представляют собой краткое описание концепта общего инструментария, схем и наиболее перспективных методов разработки подходов к развитию комплексных транспортных схем в России в ближайшей перспективе и требуют дальнейших углубленных исследований по каждому направлению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутягин В. А. Планировка и благоустройство городов: Учебник. — М.: Стройиздат, 1974. — 381 с.
2. Фишельсон М. С. Городские пути сообщения. — М.: Высшая школа, 1967. — 360 с.
3. Овечников Е. В., Фишельсон М. С. Городской транспорт: Учебник. — М.: Высшая школа, 1976. — 352 с.
4. Дубровин Е. Н., Ланцберг Ю. С., Лялин И. М., Турчихин Э. Я., Шафран В. Л., Старостин Ю. В., Мандриков А. П. Пересечения в разных уровнях на городских магистралях. — М.: Высшая школа, 1977. — 431 с.
5. Самойлов Д. С. Социология в городском и региональном планировании: Учеб. пособие. — М.: МГСУ, 1998. — 97 с.
6. Сафронов Э. А. Транспортные системы городов и регионов: Учеб. пособие. — М.: Издательство АСВ, 2005. — 272 с.
7. Предел терпения планеты. Сколько людей способна вынести Земля? [Электронный ресурс]: https://aif.ru/society/science/predel_terpeniya_planety_skolko_lyudey_sposobna_vynesti_zemlya. Доступ 17.06.2020.
8. Динамика численности населения Москвы за 140 лет. [Электронный ресурс]: <http://www.demoscope.ru/weekly/2016/0689/analit03.php>. Доступ 17.06.2020.



9. Население Москвы. [Электронный ресурс]: https://ru.wikipedia.org/wiki/Население_Москвы. Доступ 17.06.2020.
10. Сколько машин в Москве. Данные 2018–2019 гг. [Электронный ресурс]: <https://yandex.ru/turbo/universeofcars.ru/s/skolko-mashin-v-moskve-v-2018-godu/>. Доступ 17.06.2020.
11. Зарубежный опыт проведения переписей населения. [Электронный ресурс]: <https://pandia.ru/text/78/306/7128.php>. Доступ 17.06.2020.
12. Шевцов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 11. — С. 3–46.
13. Якимов М. Р., Попов Ю. А. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программных комплексах PNV Vision RVISUM: Монография. — М.: Логос, 2014. — 200 с.
14. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: Монография. — М.: Логос, 2013. — 187 с.
15. Методические рекомендации по использованию программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения. — М.: Минтранс, 2017. — 72 с.
16. Руководство по применению транспортных моделей в транспортном планировании и оценке проектов. — СПб.: Изд-во КОСТА, 2016. — 126 с.
17. Основы транспортного моделирования. — СПб.: Изд-во КОСТА, 2015. — 168 с.
18. Rodrigue, J.-P. Urban and Use and Transportation. [Электронный ресурс]: https://transportgeography.org/?page_id=4613. Доступ 17.06.2020.
19. Duthie, J., Kockelman, K., Valsary, V., Bin Zhou, B. Applications of Integrated Models of Land Use and Transport: A Comparison of ITLUP and UrbanSim Land Use Models. Presented at the 54th Annual North American Meetings of the Regional Science Association. International, held November 2007 in Savannah, Georgia. [Электронный ресурс]: https://www.cae.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/RSIA107TELUMUrbanSim.pdf. Доступ 17.06.2020.
20. Rode, Ph. Urban planning and transport policy integration: The role of governance hierarchies and networks in London and Berlin. *Journal of Urban Affairs*, 2019, Vol. 41, Iss. 1, pp. 39–63. [Электронный ресурс]: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07352166.2016.1271663>. Доступ 17.06.2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/07352166.2016.1271663>.
21. Waddell, P. Integrated Land Use and Transportation Planning and Modelling: Addressing Challenges in Research and Practice. *Transport Reviews*, 2011, Vol. 31, Iss. 3, pp. 209–229. DOI: [10.1080/01441647.2010.525671](https://doi.org/10.1080/01441647.2010.525671).
22. Lu, Kai; Han, Baoming; Zhou, Xuesong Simon. Smart Urban Transit Systems: From Integrated Framework to Interdisciplinary Perspective. *Urban Rail Transit*, 2018, Vol. 4, pp. 49–67. [Электронный ресурс]: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40864-018-0080-x>. Доступ 17.06.2020. DOI: [10.1007/s40864-018-0080-x](https://doi.org/10.1007/s40864-018-0080-x).
23. Fierek, S., Zak, J. Planning of an integrated urban transportation system based on macro – simulation and MCDM/A methods. 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2012, Vol. 54, pp. 567–579. [Электронный ресурс]: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40864-018-0080-x>. Доступ 17.06.2020. DOI: [10.1016/j.sbspro.2012.09.774](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.774).
24. Yang, L.; van Dam, K. H.; Majumdar, A.; Anvari, B.; Ochieng, W. Y.; Zhang, L. Integrated design of transport infrastructure and public spaces considering human behavior: A review of state-of-the-art methods and tools. *Frontiers of Architectural Research*, 2019. [Электронный ресурс]: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10085026/1/Integrated%20design%20of%20transport%20infrastructureand%20public%20spaces%20considering%20humanbehavior.pdf>. Доступ 17.06.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.08.003>.
25. Miller, E. J. Integrated urban modeling: Past, present, and future. *The Journal of Land Use*, 2018, Vol. 11, Iss. 1, pp. 387–399. [Электронный ресурс]: <https://www.jtlu.org/index.php/jtlu/article/view/1273/1034>. Доступ 17.06.2020. DOI: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.1273>.
26. Mátrai, T., Ábel, M.; Kerényi, L. S. How can a transport model be integrated to the strategic transport planning approach: A case study from Budapest. *Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. Transport Strategy, Budapest, Hungary, June 2015, pp. 192–199. [Электронный ресурс]: http://www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx_rupprecht/FLOW_Study_Budapest_-_How_can_a_transport_model_be_integrated_to_the_strategic_transport_planning_approach.pdf. Доступ 17.06.2020.
27. Haas, A. R. N. Key considerations for integrated multi-modal transport planning. *Cities That Work*, 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.theigc.org/wp-content/uploads/2019/02/Integrated-multi-modal-transport-planning-FINAL-Jan2019.pdf>. Доступ 17.06.2020.
28. Ušpalytė-Vitkūnienė, R., Burinskienė, M. Integration of public transport and urban planning. 7th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2008 – Conference Proceedings, 2008. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Marija_Burinskiene/publication/228716874_Integration_of_public_transport_and_urban_planning/links/543fb6d00cf2fd72f99d19ff/Integration-of-public-transport-and-urban-planning.pdf. Доступ 17.06.2020.
29. Немчинов Д. М. Принципы и методы планирования сетей автомобильных дорог: Монография. — М.: ТехПолиграфЦентр, 2014. — 305 с.
30. ВСН 25-86 (Минавтодор РСФСР). Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200006776>. Доступ 17.06.2020.
31. Методические рекомендации по проектированию кольцевых пересечений автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1980. — 76 с.
32. Генеральный план развития посёлка городского типа Шаховская МО. Главное управление архитектуры и градостроительства Московской области. — 2005. [Электронный ресурс]: <https://шах-го.рф/office-docs/terra/5429-generalnyy-plan-go-shahovskaya-moskovskoy-oblasti.html>. Доступ 17.06.2020.
33. Методические рекомендации по использованию программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения. — М.: Минтранс, 2017. [Электронный ресурс]: <http://www.infosait.ru/norma-doc/46/46381/>. Доступ 17.06.2020.
34. Немчинов М. В., Холин А. С. Транспортное обеспечение «природных» территорий. Методология разработки комплексной схемы организации и обеспечения безопасности движения автомобилей и пешеходов. — М.: Издательство АСВ, 2019. — 169 с.
35. Власов Д. Н. Транспортно-пересадочные узлы: Монография. — М.: МГСУ, 2017. — 192 с.



Trends in Development of Integrated Transport Schemes for Cities



Mikhail V. NEMCHINOV



Alexander S. KHOLIN

Nemchinov, Mikhail V., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia.

Kholin, Alexander S., Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia.*

ABSTRACT

The article discusses the process of planning the work of urban transport operations in the form of an integrated transport scheme (ITS), which is the transport part of the master plan for development of a city, and studies organization of urban transport. The objective of the article is to formulate the main directions of developments in the field of transport planning based on modern domestic and foreign experience and knowledge, and on retrospective analysis of changes in the field of urban transport planning.

The methodology is presented for the conditions prevailing in the Russian Federation,

the peculiarity of which comprise a relatively late (compared to European countries and the USA), but rapidly developing motorization of the country, a change in qualifications of specialists working in the field of urban transport planning, a certain loss of experience and skills in development of ITS in recent years.

The suggested conclusions represent a brief description of the concept of a common toolkit, a scheme and the most promising methods for developing approaches to development of integrated transport schemes and require further in-depth research in each specific segment.

Keywords: *urban transport, master plan, integrated transport scheme, transport correspondence, modelling, traffic organization, city route capacity, parking, emergency evacuation.*

*Information about the authors:

Nemchinov, Mikhail V. – D.Sc. (Eng), Professor of the Department of Road Construction and Operation of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, dekanat@da.madi.ru.

Kholin, Alexander S. – Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Road Survey and Design of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, holin-as@mail.ru.

Article received 13.04.2020, accepted 20.06.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 120.

Background. Retrospective analysis.

Problems of ensuring urban transport traffic have always been and are now a consequence of inconsistency of urban routes with the level of urban transport development and needs. Residents have always moved within settlements (for personal and business purposes). With spatial development of settlements, travel time and amount of goods transported increased, which resulted in emergence and development of transport (personal horse, horse carts, etc.). The transport once emerged, immediately demanded more perfect routes. Gradually, a network of streets emerged, along which vehicles and pedestrians moved. The growth in the number and technical perfection of vehicles was accompanied by development of transport infrastructure, of network of roads and streets, and of their technical improvement.

Domestic transport experts [1–6] divide the entire period of urban development (global process) into several stages:

1. Urban transport is represented by carts. Streets have a narrow carriageway with a wooden or cobblestone pavement for transport vehicles, and without strengthening the carriageway for all the others.

2. Emergence of rail tracks (with horse-drawn traction at the beginning (1853–1854)), then of electrified rail tracks (1881) is witnessed. The streets are narrow, of old construction. The first signs of a transport crisis appeared.

3. There is the emergence of off-street transport and off-street connecting lines (metro: 1863 – London, 1885 – New York, 1892 – Chicago, 1935 – Moscow).

4. There is the decisive reconstruction of street-road and off-street transport network: reconstruction of streets with a change in their geometric parameters, transport profiling of streets, mass construction of transport intersections at different levels, unification of urban and suburban transportation routes into a single transport system (currently).

In all cases, the reason for transition from the previous stage of the state of the urban environment to the next one was linked to oversaturation of settlements with vehicles and occurrence of difficulties in the traffic. At the same time, the system of ensuring traffic of ground (street) transport (including pedestrian flows as a type of urban traffic) was developing and becoming more complex. The development of transportation routes and the system of

organizing road traffic is constantly lagging behind development of urban transport, which requires periodically bringing them into line with each other.

In Russia, the issues of better urban transport organization are solved through development of an integrated transport scheme (ITS) of the city, traditionally focused on public passenger transport (street transport, assisted in cities with metro, by underground transport).

In Russia, from the outset, an integrated transport scheme was an integral part of the master urban development plan. True, it was developed after development of the master plan, and urban transport did not actually affect the urban planning. Since the intervals between development of new master plans were rather long, and due to the progress in urban transport, and the difficulties of forecasting for a long time, it was necessary to consider the prospects for transport development for shorter periods of time. Therefore, development of integrated transport schemes is inherently the most important ongoing urban planning task. In the late 1990s (during the famous transition period in Russia), the complex transport scheme was for a short time excluded from the master plan of urban development, and that coincided with the beginning of rapid motorization of the country. Very soon, especially in large cities, acute transport problems declared themselves loudly, and that required resumption of development of integrated transport schemes. Currently, such schemes are being massively developed not only in cities, but also in rural areas¹.

However, the «period of perestroika» did not pass unnoticed for urban construction. The experience and knowledge of development of such schemes has been largely lost, and that happened against the background of a sharp (of «explosive» type) growth of urban transport, increase in the number of vehicles, technical advancement, an increase in transport mobility of the population, a slowdown in reconstruction of the street-road network, emergence of a number of socio-economic changes, changes in acquired qualifications of customers and developers of integrated transport schemes,

¹ That concept is sometimes used locally in several countries, e.g., <https://trimis.ec.europa.eu/project/integrated-transport-scheme-rural-area-gloucestershire-hospital-transport-scheme>. – *Ed. note.*

mass digitalization of techniques of urban and transport design.

From 1992 to the present, the transport environment in Russia has radically changed in cities, urban agglomerations and, radically, in rural areas. Settlements have changed (they have grown, have been enlarged), and urban agglomerations have emerged. The motorization of population has led to formation of huge car fleets in cities (up to many millions and hundreds of thousands of cars in cities and city agglomerations). As a result, intensive traffic flows appeared in the city streets and roads (up to tens and hundreds of thousands of cars per day). The traffic conditions for urban transport have changed accordingly. The predominant place on streets and city roads was taken by cars, displacing public transport. Speed has decreased and the traffic process has become more complicated. At the same time, due to the large number of private cars, the growth of urban areas, relocation and division of industrial enterprises and organizations, the range of travel of residents has increased. Cars, in addition to places for movement, demanded places for parking (short-term) and storage (long-term). In cities, an acute problem of car parking has arisen. As a result, streets, roads, courtyards were overflowed with parked and moving vehicles, often obstructing movement of other vehicles. In this aspect, it should be remembered that any volume has a capacity limit. Do not fill a liter bottle with more than one litre of liquid. The globe also represents a specific capacity. It has long been determined that the resources («capacity») of the globe are quite limited, and it can feed (thus supporting the existence) of only a certain number of people (somewhere no more than 12 billion) [7]. This concerns the cities as well. Their territory is constantly extending due to the increase in the number of inhabitants. But now it is quite difficult to expand the territory of the city. There are no vacant lands. Russian cities generally grow upward. In 1968, the area of the territory of Moscow was only 875 km² with population of about 7 million people, in 2019 it was of 2562 km² with population of 12,62 million people. The population density was 8000 people/km² in 1968 [8], and in 2020 it was of 4980 people/km² [9]. But this is the density averaged over the city. In the center of Moscow, the density remained no less than in

1968. The increase in area did not lead to a decrease in the population density of the traditional territory of the city, but to development of a specific huge agglomeration. We use the word «specific» since usually urban agglomerations are formed spontaneously around the entire city, through formation, development and gradual merger of suburban cities and towns. Its geometric shape is usually predefined by local natural conditions (rivers, lakes, mountains, etc.). The modern Moscow urban agglomeration is artificial, not so connected with development of Moscow suburbs.

A simple calculation shows that at present in Moscow almost each family has one or two cars (rounded up calculation shows that with population of 12,5 million people and the average number of people in a family of 3–4 persons, the evaluated number of families will be about 4,17–3,12 million; and the number of cars registered in the city is more than 4,5 million) [9; 10]. And their number grows annually by several hundred thousand. There was a problem where to store them. The overwhelming majority of the «active» vehicle fleet operates only during peak hours. Cars, parked and moving, already occupy the roadway so much that it becomes impossible to drive along many streets. This speaks of overcrowding of the city with cars. In this regard, it is timely to raise the question of assessing the car capacity of the city and its street-road network. Cars are needed, i.e., they should be, they should be driving, i.e. to meet the needs of townspeople, to provide convenience of life. However, to continue to meet that challenge in the future, it is time to assess the permissible limits of filling urban areas – streets, roads, squares, courtyards – with cars, considering environmental damage. The level of air pollution from road transport is well known (it is extremely high). The impact of vehicles on the noise level in the city is great. There is also soil pollution with fuel, oils, wear products of car parts. But there is a limit to everything. Time has come to evaluate it and recommend to the administrations of settlements certain guidelines and methods of managing the process of motorization. The practices of the our life have shown that both market relations and the process of accumulating cars in cities require regulation to ensure favorable living conditions for inhabitants of the settlement.



In recent decades, man-made threats to residents of settlements (of all sizes) have sharply increased in the form of a high road traffic accident rate, an increase in environmental pollution with urban transport waste (exhaust gases, vehicle wear products, etc.). Threats of a natural and man-made nature have become more serious and large-scale: natural and man-made fires and air pollution, flooding of the territory of settlements (as a result of flooding by atmospheric precipitation, during floods) and other natural disasters (dust storms, tornadoes, etc.). Catastrophic situations require the rescue of residents through rapid evacuation (as, for example, it is done in the USA and in a number of other countries).

The administrative and technical conditions for development of integrated transport schemes have also changed. The qualifications of customers of such schemes and of the corps of their developers have changed: in both cases, the number of qualified specialists in the field of urban planning and urban transport has sharply decreased (up to the disappearance), as part of city administrations, that are customers of integrated transport schemes, and as part of contractor organizations, that are scheme developers. In Russia, before the perestroika period, there was a network of urban planning design and research organizations that comprised design institutes (Central research and design institute of urban development and Urban design institute, Giprogor, in Moscow, Leningiprogor in Leningrad), urban planning departments in Moscow (Moscow State Construction Institute (MISI), Moscow State Institute of Architecture (MARKHI)), Leningrad (LISI), Omsk, Rostov-on-Don, and other cities' universities, which had got a huge potential of highly professional specialists in urban planning and transport. During the years of «perestroika» there was a change in the range of organizations who had usually been contractors, and the loss, if not of all, but then of the overwhelming part of the corps of specialists of transport urban planning profile. The digitalization of the project and design process (absolutely necessary for technical reasons) has led to massive emergence of a large number of fairly competent programmers in newly born enterprises, who, however, do not possess urban planning and transport knowledge. This consequently

resulted in refocusing of transport solutions on their digitalization at the expense of practical urban planning and transport solutions.

The development and improvement of the legal framework in Russia have resulted in a ban on collection of certain types of information on transport correspondence, necessary and essential for development of integrated transport schemes. If earlier it had been possible to obtain data on the places of residence of employees of enterprises and institutions (e.g., on the locations of the points of departure of passengers of public transport), and from these data it was possible to reliably map job transport correspondences, now the law on personal data protection prohibits collecting that information. Unfortunately, a new system for collecting data on transport and pedestrian mobility of urban residents has not been created in Russia. Besides, a lot of very small enterprises have appeared, which together form significant passenger flows (pedestrians, public and private road transport). In the USA, every ten years, anonymized demographic surveys of population are conducted in the form of censuses, while participation for citizens is mandatory. The list of collected information includes questions about transport and pedestrian mobility. The collected and processed impersonal information can be freely used in development of transport service schemes [11].

Modern tasks

Despite all the changes that have taken place in Russia, the goal and objectives of developing integrated transport schemes have not only been fully preserved but expanded. The goal, in the light of development of cities convenient for life, is to increase the level of transport-friendly life (comfortable conditions for mobility), comprising work and recreation of residents of settlements, technogenic safety of the population, favourable conditions for development of all types of economies in settlements. On the whole, the tasks have been preserved, but have expanded, now they include establishment of a graph of transport correspondence in passenger and freight road transport; development of options for distribution of passenger, car and pedestrian flows along the street-road network and the choice of the optimal one; development of principles for optimal organization of vehicle



Integrated transport scheme. [Electronic resource]: <http://900igr.net/up/datai/223319/0008-006.jpg>.

traffic and pedestrian motion at the most important transport hubs; development of a set of engineering measures to bring the road network in compliance with the requirements of convenience and safety of transport and pedestrian traffic. The formation of transport and pedestrian correspondence allows extensive mathematical modelling on a city scale (macromodelling) and on a scale of individual transport hubs (micromodelling), using of software for collection and processing of initial data.

The changes that have taken place in Russia have necessitated the inclusion of new transport solutions in the integrated transport scheme, a partial reorientation of traditional developments towards assessing city car capacity, requirement to assess the possibility of ensuring emergency evacuation of population under the conditions of man-made and other disasters. The issue of emergency evacuation of residents of settlements by road has not received much attention before.

Results.

The foregoing makes it possible to formulate the main trends in development and improvement of integrated transport schemes of cities in the interests of making cities convenient for life, to develop the contents of ITS of traffic management, integrating the

classic Russian experience and modern requirements, methods, and tools of planning.

Maintaining traditional issues:

- analysis of the street-road network of the considered urban entity;
- analysis of the existing scheme and route system of urban public transport by mode;
- analysis of existing car flows and car parking systems (using mathematical [12–28] and physical [29–35] modelling);
- bringing the transport scheme of urban land public transport and its route system in line with the graph of job transport correspondence of population;
- analysis of pedestrian routes and pedestrian flows;
- analysis of the car parking system.

Development of new issues:

- use of mathematical modelling for optimal distribution of job correspondence referring to public and private road transport, cargo transportation on the existing street-road network of the city;
- development of principles for optimal organization of traffic and pedestrian motion at transport hubs and city streets;
- assessment of car capacity of the city, based on the conditions for ensuring safe traffic, short-term and long-term storage of cars, assessment of the acceptable number of the city car fleet under these conditions;



- assessment of car capacity of storage areas: garages, yard and street parking lots, car storage areas;
- selection of the optimal mode of car movement along the network of city streets (using different criteria: travel speed, volumes of harmful emissions, etc.);
- assessment of the level of environmental impact of road transport on the environmental situation in the city according to the implemented option of traffic organization;
- assessment, organization and engineering equipment of pedestrian paths (sidewalks and paths, ground and underground crossings of streets, lighting, safety fences, road surfaces of pedestrian paths, public transport stops);
- assessment of the possibility of urgent (in a short period of time) evacuation of the population in cases of natural and man-made disasters, designing of urgent evacuation routes, development of principles for optimal organization of traffic during the evacuation period (optimal traffic speed, organization of one-way traffic, maximum use of the width of the carriageway, organization of the possibility of oncoming movement of vehicles of the Ministry of Emergency Situations, traffic police, ambulance and other emergency vehicles, traffic regulation on evacuation routes), identification of modes of transport for evacuation (public and personal vehicles, gathering points for residents close to parking lots of public transport).

The socio-economic circumstances (legal, economic ones) prevailing for the urban environment make it almost impossible to use old methods and techniques for development of integrated transport schemes, assessment of the state of the network and route system of public transport, pedestrian traffic, accounting for road transport, development of passenger and freight graphs (excluding small distributors' vehicles).

New methods need to be developed to suit the new environment. It is necessary to make maximum use of the experience of collecting information on movements of residents, accumulated in foreign countries, where it is believed that transport issues largely determine the level of favorable life and business. Those practices have been largely developed recently in Moscow.

Brief conclusion.

The outlined conclusions represent a brief description of the concept of a common toolkit, a scheme and the most promising methods for developing integrated transport schemes in Russia in the near future and require further in-depth research in each segment.

REFERENCES

1. Butyagin, V. A. Planning and urban improvement: Textbook [*Planirovka i blagoustroystvo gorodov: Uchebnik*]. Moscow, Stroyizdat publ., 1974, 381 p.
2. Fishelson, M. S. Urban ways of communication [*Gorodskie puti soobshcheniya*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1967, 360 p.
3. Ovechnikov, E. V., Fishelson, M. S. Urban transport: Textbook [*Gorodskoi transport: Uchebnik*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1976, 352 p.
4. Dubrovin, E. N., Lantsberg, Yu. S., Lyalin, I. M., Turchikhin, E. Ya., Shafran, V. L., Starostin, Yu. V., Mandrikov, A. P. Intersections at different levels on city highways [*Peresecheniya v raznykh urovnyakh na gorodskikh magistralyakh*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1977, 431 p.
5. Samoilov, D. S. Sociology in urban and regional planning: Study guide [*Sotsiologiya v gorodskom i regionalnom planirovanii: Ucheb. posobie*]. Moscow, MGSU publ., 1998, 97 p.
6. Safronov, E. A. Transport systems of cities and regions: Study guide [*Transportnie sistemy gorodov i regionov: Ucheb. posobie*]. Moscow, ASV Publishing House, 2005, 272 p.
7. The limit of the planet's patience. How many people can the Earth endure? [*Predel terpeniya planet. Skolko lyudei sposobna vnesti Zemlya?*]. [Electronic resource]: https://aif.ru/society/science/predel_terpeniya_planety_skolko_lyudey_sposobna_vynesti_zemlya. Last accessed 17.06.2020.
8. Dynamics of the population of Moscow for 140 years [*Dinamika chislennosti naseleniya Moskvy za 140 let*]. [Electronic resource]: <http://www.demoscope.ru/weekly/2016/0689/analit03.php>. Last accessed 17.06.2020.
9. Population of Moscow [*Naselenie Moskvy*]. [Electronic resource]: https://ru.wikipedia.org/wiki/Население_Москвы. Last accessed 17.06.2020.
10. How many cars are there in Moscow? Data 2018–2019 [*Skolko mashin v Moskve. Dannye 2018–2019*]. [Electronic resource]: <https://yandex.ru/turbo/universeofcars.ru/s/skolko-mashin-v-moskve-v-2018-godu/>. Last accessed 17.06.2020.
11. Foreign experience in conducting population censuses [*Zarubezhnyi opyt provedeniya perepisei naseleniya*]. [Electronic resource]: <https://pandia.ru/text/78/306/7128.php>. Last accessed 17.06.2020.
12. Shevtsov, V. I. Mathematical modelling of traffic flows [*Matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov*]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2003, Iss. 11, pp. 3–46.
13. Yakimov, M. R., Popov, Yu. A. Transport planning: practical recommendations for creating transport models of cities in PNV VisionRVSUM software systems: Monograph [*Transportnoe planirovanie: prakticheskie rekomendatsii po sozdaniyu transportnykh modelei gorodov v programmykh kompleksakh PNV VisionRVSUM: Monografiya*]. Moscow, Logos publ., 2014, 200 p.
14. Yakimov, M. R. Transport planning: creating transport models of cities: Monograph [*Transportnoe planirovanie: sozдание transportnykh modelei gorodov: Monografiya*]. Moscow, Logos publ., 2013, 187 p.

15. Methodological recommendations on the use of software products for mathematical modelling of traffic flows in assessing the effectiveness of design solutions in the field of traffic management [*Metodicheskie rekomendatsii po ispolzovaniyu programmnykh produktov matematicheskogo modelirovaniya transportnykh potokov pri otsenke effektivnosti proektnykh reshenii v sfere organizatsii dorozhnogo dvizheniya*]. Moscow, Mintrans publ., 2017, 72 p.
16. Guidance on application of transport models in transport planning and project evaluation [*Rukovodstvo po primeneniyu transportnykh modelei v transportnom planirovanii i otsenke proektov*]. St. Petersburg, KOSTA Publishing house, 2016, 126 p.
17. Basics of transport modelling [*Osnovy transportnogo modelirovaniya*]. St. Petersburg, KOSTA Publishing house, 2015, 168 p.
18. Rodrigue, J.-P. Urban and Use and Transportation. [Electronic resource]: https://transportgeography.org/?page_id=4613. Last accessed 17.06.2020.
19. Duthie, J., Kockelman, K., Valsary, V., Bin Zhou, B. Applications of Integrated Models of Land Use and Transport: A Comparison of ITLUP and UrbanSim Land Use Models. Presented at the 54th Annual North American Meetings of the Regional Science Association. International, held November 2007 in Savannah, Georgia. [Electronic resource]: https://www.caee.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/RSAI07TELUMUrbanSim.pdf. Last accessed 17.06.2020.
20. Rode, Ph. Urban planning and transport policy integration: The role of governance hierarchies and networks in London and Berlin. *Journal of Urban Affairs*, 2019, Vol. 41, Iss. 1, pp. 39–63. [Electronic resource]: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07352166.2016.1271663>. Last accessed 17.06.2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/07352166.2016.1271663>.
21. Waddell, P. Integrated Land Use and Transportation Planning and Modelling: Addressing Challenges in Research and Practice. *Transport Reviews*, 2011, Vol. 31, Iss. 3, pp. 209–229. DOI: [10.1080/01441647.2010.525671](https://doi.org/10.1080/01441647.2010.525671).
22. Lu, Kai; Han, Baoming; Zhou, Xuesong Simon. Smart Urban Transit Systems: From Integrated Framework to Interdisciplinary Perspective. *Urban Rail Transit*, 2018, Vol. 4, pp. 49–67. [Electronic resource]: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40864-018-0080-x>. Last accessed 17.06.2020. DOI: [10.1007/s40864-018-0080-x](https://doi.org/10.1007/s40864-018-0080-x).
23. Fierek, S., Zak, J. Planning of an integrated urban transportation system based on macro – simulation and MCDM/A methods. 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2012, Vol. 54, pp. 567–579. [Electronic resource]: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40864-018-0080-x>. Last accessed 17.06.2020. DOI: [10.1016/j.sbspro.2012.09.774](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.774).
24. Yang, L.; van Dam, K. H.; Majumdar, A.; Anvari, B.; Ochieng, W. Y.; Zhang, L. Integrated design of transport infrastructure and public spaces considering human behavior: A review of state-of-the-art methods and tools. *Frontiers of Architectural Research*, 2019. [Electronic resource]: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10085026/1/Integrated%20design%20of%20transport%20infrastructureand%20public%20spaces%20considering%20humanbehavior.pdf>. Last accessed 17.06.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.08.003>.
25. Miller, E. J. Integrated urban modeling: Past, present, and future. *The Journal of Land Use*, 2018, Vol. 11, Iss. 1, pp. 387–399. [Electronic resource]: <https://www.jtlu.org/index.php/jtlu/article/view/1273/1034>. Last accessed 17.06.2020. DOI: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.1273>.
26. Mátrai, T., Ábel, M.; Kerényi, L. S. How can a transport model be integrated to the strategic transport planning approach: A case study from Budapest. Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). *Transport Strategy*, Budapest, Hungary, June 2015, pp. 192–199. [Electronic resource]: http://www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx_rupprecht/FLOW_Study_Budapest_-_How_can_a_transport_model_be_integrated_to_the_strategic_transport_planning_approach.pdf. Last accessed 17.06.2020.
27. Haas, A. R. N. Key considerations for integrated multi-modal transport planning. Cities That Work, 2019. [Electronic resource]: <https://www.theigc.org/wp-content/uploads/2019/02/Integrated-multi-modal-transport-planning-FINAL-Jan2019.pdf>. Last accessed 17.06.2020.
28. Ušpalytė-Vitkūnienė, R., Burinskienė, M. Integration of public transport and urban planning. 7th International Conference on Environmental Engineering, ICEE2008 – Conference Proceedings, 2008. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Marija_Burinskiene/publication/228716874_Integration_of_public_transport_and_urban_planning/links/543fb6d00cf2fd72f99d19ff/Integration-of-public-transport-and-urban-planning.pdf. Last accessed 17.06.2020.
29. Nemchinov, D. M. Principles and methods of planning road networks: Monograph [*Printsiipy i metody planirovaniya setei avtomobilnykh dorog: Monografiya*]. Moscow, TechPoligrafCenter publ., 2014, 305 p.
30. VSN25-86 (Minavtodor of the RSFSR). Guidelines for traffic safety on highways [*VSN25-86 (Minavtodor RSFSR). Ukazaniya po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobilnykh dorogakh*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200006776>. Last accessed 17.06.2020.
31. Guidelines for design of ring road intersections [*Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu koltsevykh peresechenii avtomobilnykh dorog*]. Moscow, Transport publ., 1980, 76 p.
32. General plan for development of the urban-type settlement Shakhovskaya MO. Main Department of Architecture and Urban Planning of Moscow Region. 2005 [*Generalniy plan razvitiya poselka gorodskogo tipa Shakhovskaya MO. Glavnoe upravlenie arkitektury i gradostroitelstva Moskovskoi oblasti 2005*]. [Electronic resource]: <https://max-ro.pbpf/office-docs/terra/5429-generalnyy-plan-go-shahovskaya-moskovskoy-oblasti.html>. Last accessed 17.06.2020.
33. Guidelines for the use of software products for mathematical modelling of traffic flows in assessing the effectiveness of design solutions in the field of traffic management [*Metodicheskie rekomendatsii po ispolzovaniyu programmnykh produktov matematicheskogo modelirovaniya transportnykh potokov pri otsenke effektivnosti proektnykh reshenii v sfere organizatsii dorozhnogo dvizheniya*]. Moscow, Mintrans publ., 2017. [Electronic resource]: http://www.infosait.ru/norma_doc/46/46381/. Last accessed 17.06.2020.
34. Nemchinov, M. V., Kholin, A. S. Transport support of «natural» territories. Methodology for development of a comprehensive scheme for organizing and ensuring safety of vehicles and pedestrians [*Transportnoe obespechenie «prirodnykh» territorii. Metodologiya razrabotki kompleksnoi skhemy organizatsii i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya avtomobilei i peshekhodov*]. Moscow, ASV Publishing house, 2019, 169 p.
35. Vlasov, D. N. Transport interchange hubs: Monograph [*Transportno-peresadochnie uzly: Monografiya*]. Moscow, MGSU publ., 2017, 192 p. ●





Развитие системы корпоративного управления в железнодорожных компаниях



Дундуа Реваз Дмитриевич – АО «ФПК», Москва, Россия.*

Реваз ДУНДУА

В современных рыночных условиях особая роль в деятельности компаний, направленной на повышение их конкурентоспособности, принадлежит эффективности корпоративного управления. Это в полной мере относится и к деятельности зарубежных и российских транспортных компаний.

Одной из крупнейших в мире транспортно-логистических компаний является холдинг «Российские железные дороги». Учитывая масштабность деятельности ОАО «РЖД», в том числе обусловленную протяжённостью и пространственно-географической распре-

делённостью сети, вовлечённость компании в решение крупных социально-экономических задач, и в контексте изучения опыта ведущих мировых транспортных компаний целесообразно обобщение опыта формирования корпоративной политики ОАО «РЖД», структуры и процессов модернизации системы корпоративного управления.

В предлагаемой статье содержится составленный на основе опубликованных корпоративных документов обобщённый обзор и краткий анализ данных вопросов, который может служить основой для дальнейших исследований.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, корпорация, корпоративное управление, особенности бизнес-процессов, эффективность, ОАО «РЖД».

*Информация об авторе:

Дундуа Реваз Дмитриевич – начальник сектора внедрения и сопровождения новых технологий Управления организации продаж АО «ФПК», Москва, Россия, r.dundua@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 07.04.2020, принята к публикации 25.06.2020.

For the English text of the article please see p. 141.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время осуществление финансово-хозяйственной деятельности хозяйствующими субъектами акционерной формы собственности в высококонкурентной среде транспортной отрасли Российской Федерации связано с внедрением эффективных инструментов корпоративного управления, использование которых раскрывается в открыто публикуемой нефинансовой отчётности.

Внедрение и совершенствование корпоративного управления акционерными обществами в России позволяет руководству компаний транспортной отрасли, крупнейшей из которых является ОАО «РЖД», не только улучшить систему управления инвестиционными активами, кадрового управления, но и выстроить корпоративное управление исходя из бизнес-целей, стадии развития компании, а также учёта мнения заинтересованных сторон.

Корпоративное управление представляет собой совокупность правил, законов и нормативных актов, на которых основана и которыми регламентируется деятельность компаний [1]. Корпоративное управление базируется на постоянном мониторинге и учёте внутренних и внешних факторов, влияющих на интересы акционеров компании, а также на клиентов, поставщиков, органы управления [2].

Международная практика показывает, что именно риск-моделирование внешних факторов как этап создания эффективной системы корпоративного управления в большинстве случаев становится основой для повышения финансовых результатов деятельности корпораций [3; 4].

Понятие, сущность, алгоритмы формирования корпоративного управления достаточно широко освещаются в научной литературе, в том числе и в России, где несмотря на относительную новизну этой области научных исследований имеются значительные наработки. Так, значительный вклад к определению современной роли эффективного корпоративного управления в акционерных обществах внесли такие учёные, как И.Ю. Бочарова, Д.М. Михайлов, Н.П. Терёшина, Л.Н. Тепман, Н.М. Розанова, А.Ю. Рыманов и др.

Вместе с тем, несмотря на содержательные исследования и существенный вклад

учёных в изучение этой сферы деятельности, эффективное корпоративное управление в транспортном комплексе в мировой научной литературе, на взгляд автора, освещено в целом фрагментарно и требует дальнейшего изучения.

Применительно к транспортной отрасли России, наибольший интерес представляет система корпоративного управления в ОАО «РЖД» — крупнейшей транспортно-логистической компании.

Целью статьи является составление обобщённого обзора опубликованных корпоративных документов и — на его основе — краткого анализа создания принципиальных основ формирования корпоративной политики ОАО «РЖД», структуры и процессов модернизации системы корпоративного управления.

Такой анализ представляется полезным в качестве основы для дальнейших исследований, в том числе в сфере разработки методов повышения эффективности деятельности транспортных компаний, дальнейших сравнений практики деятельности других мировых железнодорожных компаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С момента своего создания, даже в условиях неустойчивой рыночной конъюнктуры, ОАО «РЖД» стабильно обеспечивает транспортное обслуживание экономики и населения страны [5; 6]. Сегодня ОАО «РЖД» и его дочерние и зависимые общества ежедневно обеспечивают перевозку около 3,8 млн тонн грузов и 3,2 млн пассажиров.

ОАО «РЖД» является одним из крупнейших инвесторов в российскую экономику, вкладывая 3 % от общего объёма капитальных вложений, осуществляя масштабные закупки продукции, более 80 % которой выпускают российские компании.

В ОАО «РЖД» принята Долгосрочная программа развития до 2025 г. Достижение параметров базового сценария этой программы позволит увеличить вклад железнодорожного транспорта в ВВП РФ почти вдвое к 2025 году до 8,3 трлн руб.

Система корпоративного управления ОАО «РЖД» осуществляется в соответствии с разделением полномочий органов



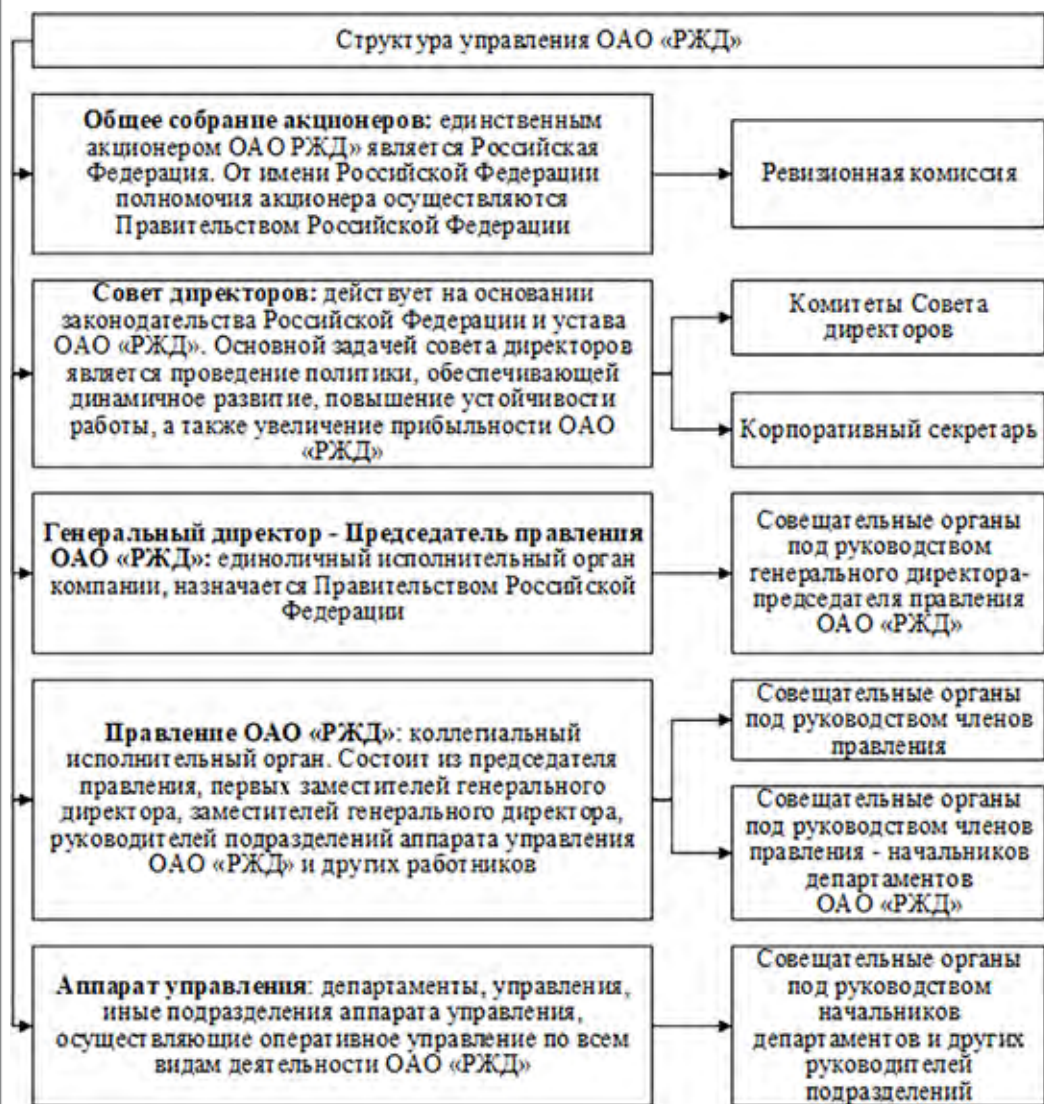


Рис. 1. Структура управления ОАО «РЖД» [8].

управления. В ОАО «РЖД» применяются принципы корпоративного управления ОЭСР, в которых отражено, что корпоративное управление является комплексом отношений, формируемых управлением государственной корпорации, её администрацией, акционерами и другими лицами, заинтересованными в её деятельности [7].

На рис. 1 приведена структура управления компаний.

Основу системы корпоративного управления ОАО «РЖД» обеспечивает процессный подход, в соответствии с ко-

торым управление деятельностью выстраивается как управление комплексом процессов (в том числе сквозных). В компании также применяется функциональное управление, которое позволяет чётко разграничивать ответственность и контролировать дисциплину. Проектный подход применяется для проектно-ориентированных направлений деятельности, например, научно-исследовательских, строительных и т.д.

При этом требования к качеству организации корпоративного управления в силу того факта, что ОАО «РЖД» явля-

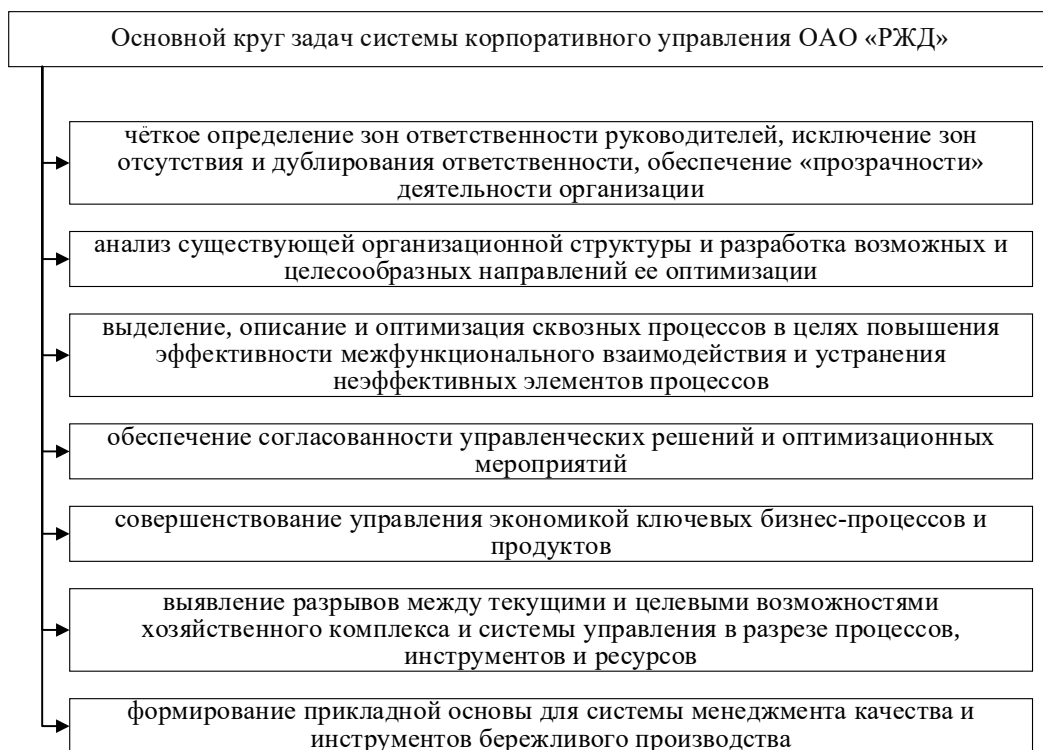


Рис. 2. Основной круг задач системы корпоративного управления ОАО «РЖД» [8].

ется естественной монополией [9], усилены.

Этот факт диктуется не только интересами акционера, представленного Российской Федерацией, но и коммерческими, операционными и финансовыми отношениями между акционером и компанией, а также с наличием и потенциалом конкуренции между видами перевозок.

Кроме того, требования вытекают из высокой социальной значимости продуктов и услуг ОАО «РЖД», что оказывает воздействие на состав и характер информации, отражаемой в корпоративном отчёте.

Основным подходом к проектированию процессов является подход «сверху—вниз», предполагающий формирование комплексной процессной модели ОАО «РЖД» путём последовательной декомпозиции её элементов верхних уровней на элементы нижних уровней.

Компания «Делойт» (Deloitte), характеризует процессный подход как лучшую

практику корпоративного управления, подчёркивает в своём отчёте, что эффективное управление реализуется путём комбинации структур и механизмов, которые согласовывают интересы всех вовлечённых сторон (теория агентских отношений), обеспечивают учёт мнения всех заинтересованных сторон, свободное распространение информации (теория заинтересованных сторон или теория стейкхолдеров). Вышеперечисленные переменные управления имеют научно доказанную корреляционную зависимость с результатами деятельности корпораций [4].

В рамках расширения применения процессного подхода в управлении холдинг «РЖД» ориентируется на выполнение задач, представленных на рис. 2.

ОАО «РЖД» поэтапно переходит к функционированию в форме комплекса вертикально-интегрированных структур, специализирующихся на конкретных видах деятельности. Одновременно с этим переходом создаваемая в ОАО



**Мероприятия по внедрению положений Кодекса корпоративного
управления ОАО «РЖД» [8]**

Цель	Мероприятие
Совершенствование организации основ противодействия коррупции, а также формирование единого подхода к обеспечению работы по профилактике и предупреждению проявления признаков коррупции	Организован канал связи, по которому любое заинтересованное лицо может сообщить о ставших ему известными коррупционных действиях сотрудников или сторонних лиц, способных причинить вред экономической деятельности, имиджу и деловой репутации ОАО «РЖД».
Совершенствование системы управления рисками	Создан Центр развития управления рисками и аутсорсингом. Утверждено Положение о системе управления рисками. Утверждена Антикоррупционная политика ОАО «РЖД».
Совершенствование системы корпоративного управления	В соответствии с рекомендациями Кодекса актуализировано Положение об информационной политике ОАО «РЖД». Начиная с 2015 года, публикация годового отчёта ОАО «РЖД» осуществляется до проведения годового общего собрания акционеров. В соответствии с рекомендациями Кодекса актуализированы положения о Комитете по кадрам и вознаграждениям, Комитете по аудиту и рискам и Комитете по стратегическому планированию совета директоров ОАО «РЖД». Утверждено Положение об организации внутреннего аудита в холдинге «РЖД» в новой редакции.
Совершенствование системы территориального корпоративного управления	Одновременно с внедрением рекомендаций Кодекса в свою деятельность ОАО «РЖД» ведёт аналогичную работу в дочерних обществах, координируя действия с Экспертным советом при Правительстве Российской Федерации.

«РЖД» организационная модель направлена на формирование матричной структуры управления, при которой особое внимание уделяется созданию и обеспечению качественного функционирования структур, отвечающих за эффективное взаимодействие подразделений ОАО «РЖД» по всем вертикалям управления, в том числе и на региональном уровне.

Важно отметить, что полностью отказаться от территориального подхода к управлению ОАО «РЖД» невозможно: его имущественный комплекс охватывает всю территорию Российской Федерации и представляет собой значимый фактор социально-экономического развития страны. В силу географического масштаба данного комплекса полноценная реализация функций управления ОАО «РЖД» без наличия территориальных органов управления неэффективна и приведёт к необходимости решения вопросов корпоративным центром.

Матричность управления реализуется путём развития на всех уровнях управления сквозных горизонтальных связей, обеспечивающих взаимодействие хозяйственных вертикалей, ответственных за координацию деятельности подразделе-

ний на региональном и линейном уровне. Также матричность управления усиливается за счёт расширения применения проектных принципов управления на всех уровнях управления.

Исходя из тесной хозяйственной и финансовой зависимости участников перевозочного процесса, объединённых ключевым активом — инфраструктурой железнодорожного транспорта, предусматривается формирование стратегического контура управления с усиленными функциями планирования и контроля, который определяет направления организационного развития ОАО «РЖД». Это осуществляется для реализации эффекта синергии, обеспечения требований безопасности и непрерывности перевозочного процесса.

Воплощение на практике принципов специализации и матричности управления создаёт в ОАО «РЖД» в целом достаточные условия для снятия ряда ограничений и снижения рисков, а также дальнейшего раскрытия потенциала делегирования полномочий.

С учётом общности задач, технологий и дополнительных синергетических эффектов от скоординированной деятель-

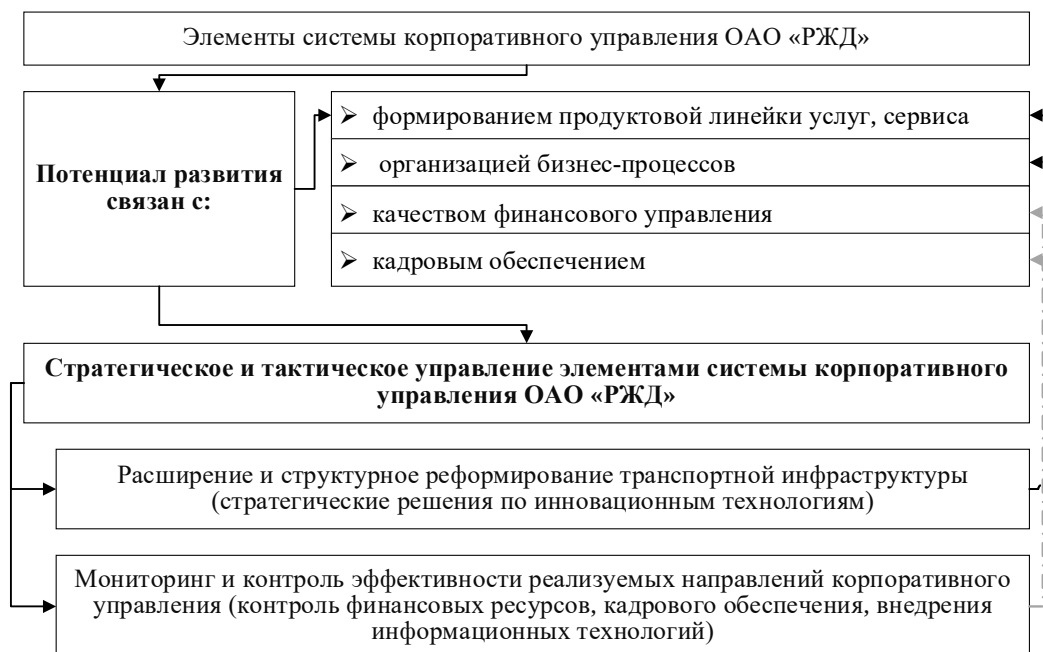


Рис. 3. Элементы системы корпоративного управления ОАО «РЖД» [составлено автором].

ности ответственными подразделениями по функциональной принадлежности для организации управления формируются органы, обеспечивающие организацию и контроль управления в подразделениях по функциональным вертикалям с учётом специфики конкретного направления деятельности, в том числе, по таким направлениям, как управление затратами и эффективностью, управление человеческими ресурсами, развитие и другим.

В ОАО «РЖД» реализован ряд мер по внедрению положений Кодекса корпоративного управления, представленных в табл. 1.

В настоящее время ОАО «РЖД» продолжает работу по внедрению положений Кодекса корпоративного управления. В Устав Компании были внесены изменения, предусматривающие право совета директоров ОАО «РЖД» включать в ежегодно утверждаемый советом директоров перечень не только дочерние, но и подконтрольные общества. Советом директоров ОАО «РЖД» с учётом рекомендательных положений Кодекса корпоративного управления внесены изменения в положения о комитетах совета директоров ОАО «РЖД», а также утверждено Положение об оценке деятельности совета директо-

ров, комитетов совета директоров и членов совета директоров ОАО «РЖД».

Повышение эффективности корпоративного управления в ОАО «РЖД» связано с обеспечением поступательного развития и потенциала такого развития в будущем [10]. При этом потенциал может быть представлен элементами, наглядно отражёнными на рис. 3 [3].

К целям развития корпоративной системы управления можно отнести, во-первых, реализацию потенциала её развития, обеспечение эффективности управления в соответствии с изменяющейся корпоративной и хозяйственной структурой ОАО «РЖД», во-вторых, непрерывное повышение качества управления. Модель корпоративного управления, реализуемая в ОАО «РЖД», обеспечивает соблюдение прав и законных интересов акционеров, справедливое к ним отношение, прозрачность принятия решений, информационную открытость, профессиональную и этическую ответственность членов Совета директоров, иных должностных лиц компании и акционера, а также развитие системы норм деловой этики.

Текущую эффективность следует оценить как высокую: имеются тенденции улучшения работы субъектов управления, повышение финансовых результатов. Сре-



ди особенностей корпоративного управления можно выделить две основные: специфика направленности деятельности и организационно-правовой формы. ОАО «РЖД» работает с большим количеством контрагентов, которые являются не только коммерческими организациями, но и социально значимыми институтами. И ОАО «РЖД» реализует в своей деятельности прежде всего важные общественные, социальные и репутационные задачи. Вместе с тем, для дальнейшего повышения эффективности корпоративного управления необходим постоянный анализ экономической конъюнктуры, иных внешних рисков и угроз, возникающих во внешней среде компании. Анализ таких рисков требуется вести постоянно. На данный момент к ним можно было бы отнести ценовую конкуренцию в транспортной отрасли; возрастание расходов вследствие усиления влияния неблагоприятных факторов и прогнозов ухудшения состояния мирового рынка в связи с нарастанием неблагоприятной эпидемиологической обстановки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема повышения эффективности корпоративного управления достаточно актуальна для российской экономики. По результатам краткого анализа корпоративного управления в ОАО «РЖД» можно отметить долгосрочные положительные факторы. В основу развития системы корпоративного управления ОАО «РЖД» заложены принципы процессного подхода и организационного развития, построения эффективного управления хозяйственным комплексом, гибкого совершенствования, формирования целевой модели и организационной структуры Компании в соответствии с рыночными изменениями и внутренними преобразованиями, а также обеспечения долгосрочной финансовой стабильности, экономической эффективности, конкурентоспособности ОАО «РЖД». Их реализации могут содействовать положительные тенденции к повышению качества планирования, прогнозирования и моделирования, в том числе с учётом рисков и благоприятных факторов.

Учитывая комплексность, системность и многофакторный характер деятельности крупных транспортных компаний и несмо-

тря на наличие большого объёма научных работ, консалтинговых отчётов, посвящённых его отдельным составляющим (например, финансовому менеджменту), остаются актуальными дальнейшие углублённые исследования комплексного характера, в том числе и сравнительного плана, связанные с методами и механизмами обеспечения роста эффективности корпоративного управления на транспорте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Е. В. Корпоративное управление. Учеб. пособие. — М.: Флинта, 2018. — 336 с.
2. Розанова Н. М. Корпоративное управление: Учебник для бакалавриата и магистратуры. — М.: Юрайт, 2016. — 339 с.
3. García-Sánchez, I.-M., Noguera-Gámez L. Integrated Reporting and Stakeholder Engagement: The Effect on Information Asymmetry. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 2017, No. 5, pp. 395–413.
4. Integrated Reporting: a driver for Integrated Thinking. Deloitte. 2020. [Электронный ресурс]: <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/risk/articles/integrated-reporting-a-driver-for-integrated-thinking.html>. Доступ 03.03.2020.
5. Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 17-ФЗ (ред. от 26.07.2019 г.) «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации».
6. Постановление Правительства РФ от 18.09.2003 г. № 585 (ред. от 16.12.2019 г.) «О создании открытого акционерного общества «Российские железные дороги».
7. Официальный сайт ОЭСР 2020. [Электронный ресурс]: <https://www.oecd.org/general/38464001.pdf>. Доступ 03.03.2020.
8. Корпоративные социальные отчёты ОАО «РЖД» за 2015–2018 гг. [Электронный ресурс]: https://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5085&layer_id=3290&refererLayerId=162&id=4172. Доступ 03.03.2020.
9. Федеральный закон от 17.08.1995 г. № 147-ФЗ (ред. от 29.07.2017 г.) «О естественных монополиях».
10. Терёшина Н. П., Сорокина А. В. Корпоративное управление. Учеб. пособие. — М.: МГУПС (МИИТ), 2014. — 214 с.
11. Корпоративная отчётность и раскрытие нефинансовой информации. АО «КПМГ». [Электронный ресурс]: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ru/pdf/2018/10/ru-ru-corporate-reporting-and-non-financial-information.pdf>. Доступ 03.03.2020.
12. Realizing the benefits: The impact of Integrated Reporting / Black Sun. [Электронный ресурс]: <https://www.blacksunplc.com/content/dam/black-sun/corporate-comms/Documents/Research/black-sun-realizing-the-benefits.pdf>. Доступ 03.03.2020.
13. Technology for Integrated Reporting. A CFO guide for driving multi-capital thinking. Integrated Reporting <IR>. [Электронный ресурс]: http://integratedreporting.org/wp-content/uploads/2016/10/Technology-for-Integrated-Reporting_CFOguide.pdf. Доступ 03.03.2020.
14. The Board of Directors and integrated reporting. Integrated Reporting <IR>. [Электронный ресурс]: http://integratedreporting.org/wp-content/uploads/2017/07/IFA_Reporting-Integre%CC%81-2017_EN.pdf. Доступ 03.03.2020. ●



Corporate Governance Development in Railway Companies



Dundua, Revaz D., JSC Federal Passenger Company, Moscow, Russia.*

Revaz D. DUNDUA

ABSTRACT

In modern market environment efficiency of corporate governance is of particular importance for a company's activity to raise its competitiveness. It is completely true regarding foreign and Russian transport companies.

The Russian Railways holding company is among global leading transport and logistics companies. Considering the large scale activity of JSC Russian Railways particularly determined by the length and geographically extensiveness of its

network, its involvement in solution of large social and economic problems, and in the context of the study of the practices of world leading transport companies it is worthwhile to generalize the experience of development of corporate policy of JSC Russian Railways, and of processes of updating of its corporate governance system.

The article contains generalized reviewing and brief analysis of above topics based on published corporate documents and suggests a basis for further research.

Keywords: *railways, corporation, corporate governance, features of business processes, efficiency, JSC Russian Railways.*

*Information about the author:

Dundua, Revaz D. – Head of the Sector of Implementation and Follow-up of New Technology of the Department of Sales of JSC Federal Passenger Company (JSC FPC), Moscow, Russia, r.dundua@gmail.com.

Article received 07.04.2020, accepted 25.06.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 134.

Background.

Currently, implementation of financial and economic activity by joint-stock economic entities in the highly competitive environment of the transport industry of the Russian Federation is associated with introduction of effective corporate governance tools disclosed in publicly published non-financial statements.

The introduction and further improvement of corporate governance in joint-stock companies in Russia allows the management of companies of the transport industry, JSC Russian Railways being the largest one, not only to improve the investment asset and human resources management, but also to build corporate governance based on the business goals, with respect to the stage of the company's development, and considering the opinion of stakeholders.

Corporate governance is a set of rules, laws and regulations which lay foundation of corporate activity and further regulate it [1]. Corporate governance is based on permanent monitoring and accounting of internal and external factors affecting the interests of the company's shareholders, as well as of customers, suppliers, and management bodies [2].

International practices show that it is the risk modelling of external factors, being a stage in creating an effective corporate governance system, that in most cases becomes the basis for improving the financial performance of corporations [3; 4].

The concept, essence, algorithms of corporate governance development are widely present in scientific sources. This is true for Russia as well where despite relative novelty of this research field it inspired a considerable number of developments. I. Yu. Bocharova, D. M. Mikhailov, L. N. Tepman, N. M. Rozanova, A. Yu. Rymanov and others scientists have made a significant contribution to identifying current role of efficient corporate governance in joint-stock companies.

Despite the substantial research and the significant contribution of researchers in that field, in the author's opinion, the issues of effective corporate governance in the transport industry are covered fragmentarily and require further study.

Considering transport sector of Russian economy, the system of corporate governance of JSC Russian Railways attract greatest interest as of the largest transport and logistics company in Russia.

The *objective* of the article is to proceed with a generalized review of published corporate documents and to compose, based on it, a brief analysis of development of fundamentals of corporate policy of JSC Russian Railways, of the structure and process of modernization of its corporate governance system. Such an analysis seems opportune as a basis for further study, particularly on the methods of enhancement of efficiency of transport companies, further comparison of best practices of global railway companies.

Results.

Since its inception, even in an unstable market environment, JSC Russian Railways has consistently provided transport services to the country's economy and population [5; 6]. Today, JSC Russian Railways and its subsidiaries and dependent companies carry about 3,8 million tons of cargo and 3,2 million passengers daily.

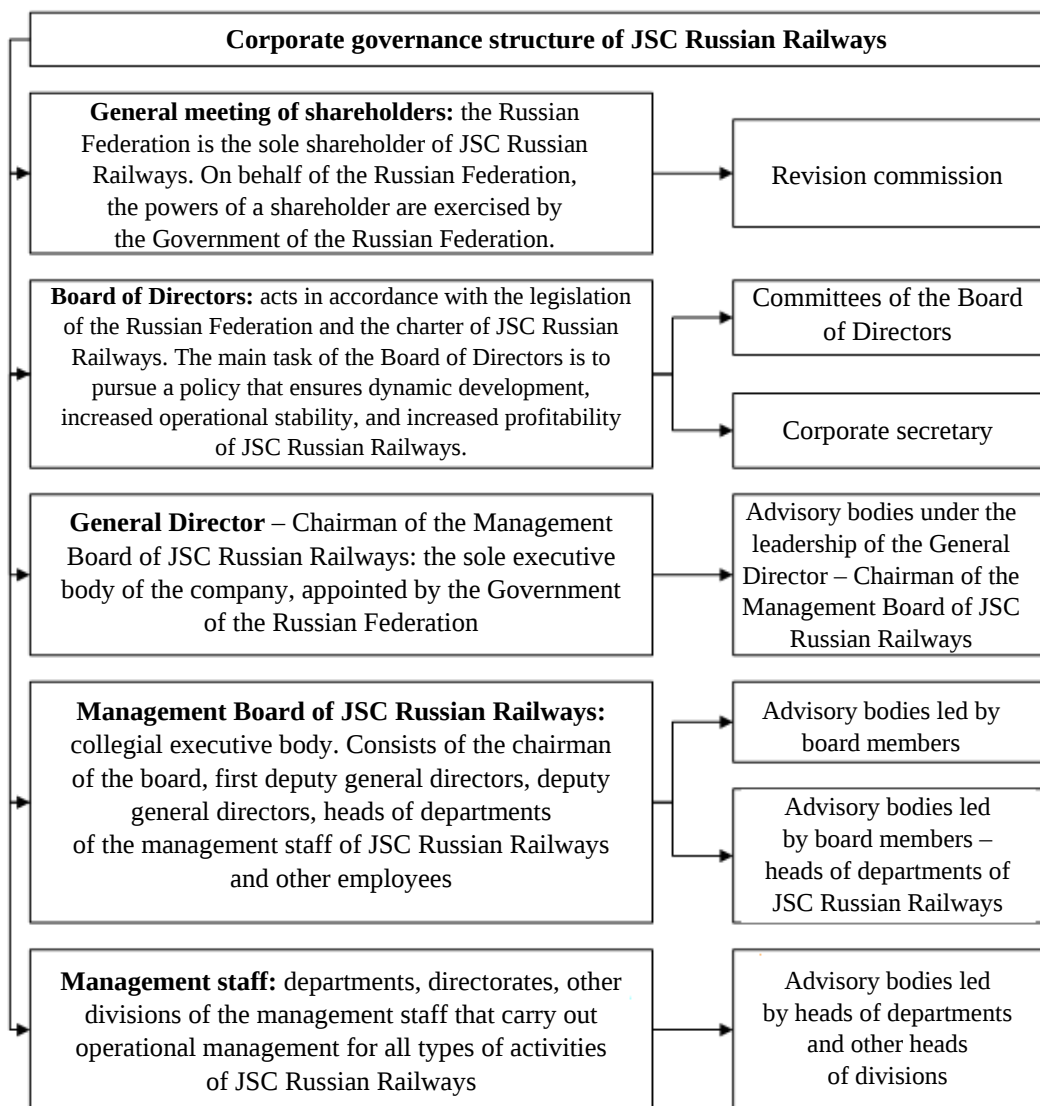
JSC Russian Railways is one of the largest investors in the Russian economy, investing 3 % of the total capital investment, making large-scale purchases of products, more than 80 % of which are produced by Russian companies.

JSC Russian Railways has adopted a Long-Term Development Program until 2025. Achieving the parameters of the baseline scenario of this program will almost double the contribution of railway transport to the Russian GDP by 2025 attaining so for railway transport 8,3 trillion rubles threshold.

The corporate governance system of JSC Russian Railways is carried out in accordance with the division of powers between the management bodies. JSC Russian Railways apply OECD principles of corporate governance, providing for corporate governance to be relationships formed by state corporation governing bodies, its management, shareholders, and other persons (stakeholders) interested in its activity [7].

The Pic. 1 shows the structure of the company.

The basis of the corporate governance system of JSC Russian Railways is provided by a process approach, in accordance with which management of activities is built as management of a set of processes (including end-to-end). The company also uses functional management, which allows for a clear delineation of



Pic. 1. Corporate governance system of JSC Russian Railways [8].

responsibility and for ensuring discipline control. The project approach is used for project-oriented activities, for example, research, construction, etc.

At the same time, the requirements for quality of corporate governance organization, due to the fact that JSC Russian Railways is a natural monopoly [2], have been strengthened.

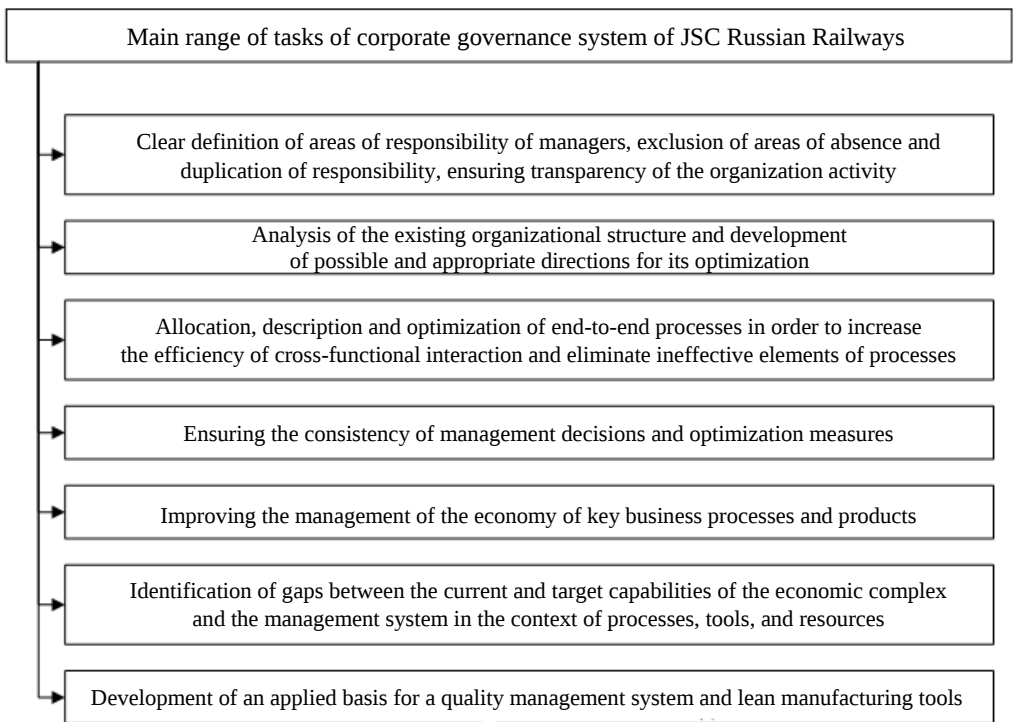
This fact is explained by the interests of the shareholder, represented by the Russian Federation, but also by commercial, operational, and financial relations between the shareholder and the company, as well as by potential probability of competition between modes of transportation.

In addition, the requirements stem from the high social significance of the products and services of JSC Russian Railways, which impacts the nature and contents of the information included into the corporate report.

The main approach to design processes is a top-downwards approach, which implies formation of an integrated process model of JSC Russian Railways by sequential decomposition of its upper-level elements into lower-level elements.

Deloitte, characterizing the process approach as the best corporate governance practice, emphasizes in its report that effective management is implemented through a





Pic. 2. The main range of tasks of the corporate governance system of JSC Russian Railways [8].

combination of structures and mechanisms that harmonize the interests of all parties involved (theory of agency relations), ensure that the views of all stakeholders are considered, and information is freely circulated (stakeholder theory). The above management variables have a scientifically proven correlation with corporate performance [4].

As part of expanded application of the process approach in management, the Russian Railways holding company focuses on fulfillment of the tasks presented in Pic. 2.

JSC Russian Railways is gradually transitioning to functioning in the form of a set of vertically integrated structure units specialized in specific types of activities. Simultaneously with the transition to an organization specialized in the types of activities, the organizational model being created at JSC Russian Railways is aimed at forming a matrix management structure, in which special attention is paid to creating and ensuring the high-quality functioning of structures responsible for effective interaction of JSC Russian Railways divisions across all verticals of management, including at the regional level.

It is important to note that it is impossible to completely abandon the territorial approach to governance of JSC Russian Railways: its property complex covers the entire territory of the Russian Federation and is a significant factor in the country's socio-economic development. Due to the geographic scale of this complex, the full-fledged implementation of the management functions of JSC Russian Railways without the presence of territorial management bodies is ineffective and will lead to the need to resolve issues by the corporate HQ.

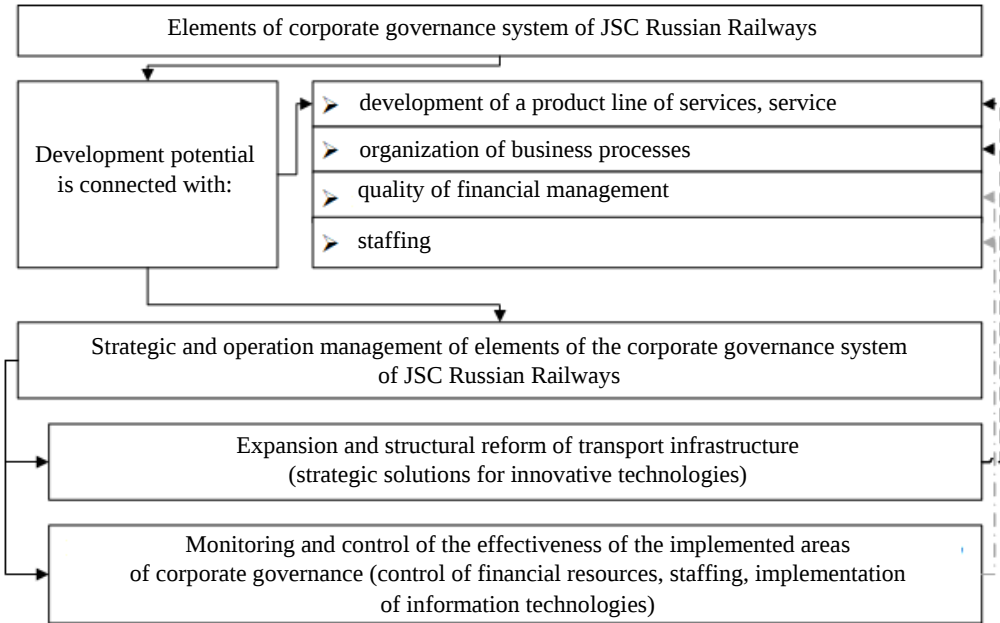
Matrix management is implemented through development of end-to-end horizontal links at all management levels, ensuring interaction of economic verticals responsible for coordinating the activities of divisions at the regional and line levels. Also, the matrix of management is enhanced by expanding application of project management principles at all levels of management.

Based on the close economic and financial dependence of the participants in the transportation process, united by a key asset which is railway infrastructure, it is planned to form a strategic management loop with enhanced planning and control functions,

Table 1

Measures to implement the provisions of the Corporate Governance Code of JSC Russian Railways [8]

Goal	Measure
Improving organization of the basics of combating corruption, as well as formation of a single approach to ensuring prevention of signs of corruption	A communication channel has been organized through which any interested person can inform about corruption actions of employees or third parties that have become known to him that can harm economic activity, image, and the business reputation of JSC Russian Railways.
Improving the risk management system	The Center for Risk Management and Outsourcing Development was established. The Regulation on the risk management system was approved. The Anti-Corruption Policy of JSC Russian Railways was approved.
Improvement of the corporate governance system	In accordance with the recommendations of the Code, the Regulation on the information policy of JSC Russian Railways was updated. Starting from 2015, the publication of the annual report of JSC Russian Railways is carried out before the annual general meeting of shareholders. In accordance with the recommendations of the Code, the provisions on the Human Resources and Remuneration Committee, the Audit and Risk Committee and the Strategic Planning Committee of JSC Russian Railways Board of Directors were updated. The new version of the Regulation on Organization of Internal Audit at the Russian Railways Holding Company was approved.
Improving the territorial corporate governance system	Simultaneously with implementation of the Code's recommendations in its activities, JSC Russian Railways is carrying out similar work in its subsidiaries, coordinating actions with the Expert Council under the Government of the Russian Federation.



Pic. 3. Elements of the corporate governance system of JSC Russian Railways [compiled by the author].





which determines the guidelines for organizational development of JSC Russian Railways. This is done to realize the synergy effect, ensure safety requirements and the continuity of the transportation process.

The implementation of the principles of specialization and matrix management will create sufficient conditions for JSC Russian Railways as a whole to remove a number of constraints and reduce risks, as well as to further unleash the potential for delegating authority.

Taking into account the joint character of tasks, technologies and additional synergistic effects from coordinated activities, the functionally responsible units organize bodies that ensure organization and control of management in units by functional verticals, taking into account the features of a particular direction of activity, in such areas as cost and efficiency management, human resource management, development, and others.

JSC Russian Railways has implemented a number of measures to implement the provisions of the Corporate Governance Code, presented in Table 1.

At present, JSC Russian Railways continues to implement the provisions of the Corporate Governance Code. The Articles of Charter of the Company were amended to provide for the right of the Board of Directors of JSC Russian Railways to include not only subsidiaries but also controlled companies in

the list approved by the Board of Directors annually. The Board of Directors of JSC Russian Railways, taking into account the recommendations of the Corporate Governance Code, amended the regulations on the committees of the Board of Directors of JSC Russian Railways, and also approved the Regulation on evaluating the activities of the Board of Directors, Committees of the Board of Directors and members of the Board of Directors of JSC Russian Railways.

Improving the efficiency of corporate governance at JSC Russian Railways is associated with ensuring progressive development and the potential for such development in the future [10]. In this case, the potential can be represented by the elements, visualized in Pic. 3 [3].

The goals of development of corporate governance include, firstly, implementation of its development capacity, provision of efficient governance in compliance with changing corporate and economic structure of JSC Russian Railways, and secondly, continuously improved quality of management. The corporate governance model implemented at JSC Russian Railways ensures the observance of rights and legitimate interests of shareholders, fair treatment, transparency in decision-making, information openness, professional and ethical responsibility of members of the Board of Directors, other company officials

and a shareholder, as well as development of the system business ethics.

The current efficiency should be assessed as high: there are tendencies to improve the work of its subjects, to increase financial results. Among the features of corporate governance, two main ones can be distinguished: specificity of the focus of activity and the presence of specificity of organizational and legal form. JSC Russian Railways works with a large number of counterparties, which are not only commercial organizations, but also socially significant institutions. Thus, JSC Russian Railways implements in its activities primarily important public, social and reputation objectives. To further improve efficiency of corporate governance it is necessary to permanently monitor economic conditions, other external risks and threats, external to the company. Risk analysis should be continuous. Currently those risks might include price competition in the transport industry; increased costs due to the increased influence of unfavorable factors and forecasts of a deterioration of the world market due to the growth of an unfavourable epidemiological situation.

Conclusion

The problem of increasing the efficiency of corporate governance is quite relevant for the Russian economy. Summing up brief analysis of corporate governance in JSC Russian Railways, long-term positive factors should be noted. The development of corporate governance at JSC Russian Railways is based on the principles of the process approach and organizational development, building effective management of the economic complex, flexible improvement, development of a target model and organizational structure of the company in accordance with market changes and internal transformations, as well as ensuring long-term financial stability, economic efficiency, and competitiveness of JSC Russian Railways. The implementation of those trends can be positively influenced by improved quality of planning, forecasting and modelling of risk situations for the railway company's business.

Considering system nature, complexity, and multifactor character of the activity of big transport companies, and despite number of research publications and consulting reports, devoted to specific aspects of its components (e.g., financial management) further in-depth research is still of topicality. It might comprise

comparative study of methods and mechanisms of enhanced efficiency of corporate governance in the transportation sector.

REFERENCES

1. Ivanova, E. V. Corporate governance. Study guide [*Korporativnoe upravlenie. Uchebnoe posobie*]. Moscow, Flinta publ., 2018, 336 p.
2. Rozanova, N. M. Corporate governance: Textbook for bachelor's and master's studies [*Korporativnoe upravlenie: Uchebnik dlya bakalavriata i magistratury*]. Moscow, Yurait publ., 2016, 339 p.
3. García-Sánchez, I.-M., Noguera-Gámez, L. Integrated Reporting and Stakeholder Engagement: The Effect on Information Asymmetry. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 2017, No. 5, pp. 395–413.
4. Integrated Reporting: a driver for Integrated Thinking. Deloitte. 2020. [Electronic resource]: <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/risk/articles/integrated-reporting-a-driver-for-integrated-thinking.html>. Last accessed 03.03.2020.
5. Federal law dated 10.01.2003 No. 17-FZ (as amended on 26.07.2019) «On railway transport in the Russian Federation» [*Federalniy zakon ot 10.01.2003 № 17-FZ (red. ot 26.07.2019) «O zheleznodorozhnom transporte v Rossiiskoi Federatsii»*].
6. Resolution of the Government of the Russian Federation of September 18, 2003 No. 585 (as amended on December 16, 2019) «On establishment of the open joint stock company «Russian Railways» [*Postanovlenie Pravitelstva RF ot 18.09.2003 g. № 585 (red. ot 16.12.2019) «O sozdanii otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiiskie zheleznnye dorogi»*].
7. OECD official website. [Electronic resource]: <https://www.oecd.org/general/38464001.pdf>. Last accessed 03.03.2020.
8. Corporate social reports of JSC Russian Railways for 2015–2018. [Electronic resource]: https://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5085&layer_id=3290&refererLayerId=162&id=4172. Last accessed 03.03.2020.
9. Federal law dated 17.08.1995 No. 147-FZ (red. ot 29.07.2017) «On natural monopolies» [*Federalniy zakon ot 17.08.1995 № 147-FZ (red. ot 29.07.2017) «O estestvennykh monopoliyakh»*].
10. Teryoshina, N. P., Sorokina, A. V. Corporate governance. Study guide [*Korporativnoe upravlenie. Ucheb. posobie*]. Moscow, MGUPS (MIIT), 2014, 214 p.
11. Corporate reporting and disclosure of non-financial information. JSC KPMG. [Electronic resource]: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ru/pdf/2018/10/ru-ru-corporate-reporting-and-non-financial-information.pdf>. Last accessed 03.03.2020.
12. Realizing the benefits: The impact of Integrated Reporting. Black Sun. [Electronic resource]: <https://www.blacksunplc.com/content/dam/black-sun/corporate-comms/Documents/Research/black-sun-realizing-the-benefits.pdf>. Last accessed 03.03.2020.
13. Technology for Integrated Reporting. A CFO guide for driving multi-capital thinking. Integrated Reporting <IR>. [Electronic resource]: http://integratedreporting.org/wp-content/uploads/2016/10/Technology-for-Integrated-Reporting_CFOguide.pdf. Last accessed 03.03.2020.
14. The Board of Directors and integrated reporting / Integrated Reporting <IR>. [Electronic resource]: http://integratedreporting.org/wp-content/uploads/2017/07/IFA_Reporting-Integre%CC%81-2017-EN.pdf. Last accessed 03.03.2020.





Оптимизация процесса выгрузки железорудного сырья на примере металлургического комбината



Алексей ПОПОВ



Ольга СУСЛОВА



Елена ВОРОНКОВА

Попов Алексей Тимофеевич — Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия.

Суслова Ольга Анатольевна — Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия.

Воронкова Елена Александровна — Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ) Липецк, Россия.*

Процесс выгрузки железорудного сырья металлургического комбината в адрес агломерационной фабрики долгое время не был предметом специального рассмотрения. За прошедшие годы условия металлургического производства претерпели определённые изменения – произошла его интенсификация, которая влечёт за собой необходимость переоценки параметров стабильной работы агломерационного производства. Целью представленного исследования является рассмотрение вопросов возможного технико-технологического улучшения, гармонизации транспортных потоков с требованиями основного процесса производства. Для достижения данной цели используется методика, основанная на применении методов математического моделирования, в частности, математического аппарата линейного программирования, графоаналитического метода, метода теории вероятности.

Первостепенную позицию занимают вопросы процесса выгрузки, хранения железорудного сырья, его подготовки к агломерационному производству.

В статье представлены основные позиции процесса оптимизации выгрузки агломерационной шихты металлургического комбината. Приведена общая характери-

стика технологии металлургического производства и каждого процесса в частности. Более подробно рассмотрен агломерационный процесс. Приведены таблицы исходного железорудного сырья для агломерационного производства за определённые отчётные периоды, в целях наглядности данные одной из таблиц сведены в диаграмму. Рассмотрена схема стандартного склада руды эстакадного типа, на которой последовательно показаны основные процессы агломерационного производства от подачи сырья на вагоноопрокидыватель до попадания посредством ленточного конвейера в штабель, а далее – в приёмные бункеры. Также в статье приведён пример формирования штабелей железорудного сырья с использованием марганцовистого известняка.

В основу исследования закладывается динамическая транспортная задача с задержками (ДТЗЗ), учитывающая время движения грузов, динамику объёмов производства по времени, динамику потребления, запасов у поставщиков и потребителей, стоимости перевозок и хранения, стоимости убытков потребления. В данном исследовании есть несколько монозадач с моногрузом, которые накладываются друг на друга, образуя мультипликативное наложение однопродуктовых задач.

Ключевые слова: промышленный транспорт, металлургический комбинат, выгрузка, железорудное сырьё, математическая модель, оптимизация, агломерация.

*Информация об авторах:

Попов Алексей Тимофеевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия, popov@stu.lipetsk.ru.

Суслова Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета, Липецк, Россия, suslova_2003@mail.ru.

Воронкова Елена Александровна – аспирант кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета, Липецк, Россия, makarova_lena27@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 25.01.2020, принята к публикации 27.04.2020.

For the English text of the article please see p. 156.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс выгрузки железорудного сырья и проблема оптимизации данного процесса стали остро интересовать научных исследователей в настоящее время. Этот вопрос пристально не рассматривался, по крайней мере в России, в течение 20 лет. Условия металлургического производства изменились за данный период: выросли объёмы выпуска готовой продукции, планируется их дальнейшее увеличение на существующих производственных мощностях; скорость спекания агломерата на ленте стала выше — произошла интенсификация производства. Таким образом, вопросы процесса выгрузки сырья, его хранения, подготовки к агломерационному производству выходят на первое место [1]. Также значительно увеличилось число компонентов агломерационной шихты: если ранее их количество не превышало десяти, то в настоящее время оно достигает 23–29 наименований. В связи с произошедшими изменениями возникает необходимость исследования транспортной инфраструктуры и операционной структуры технического процесса; его основная цель — найти их несоответствия входящим и выходящим потокам. Целесообразно исследовать возможности гармонизации транспортных потоков требованиям основного производственного процесса с тем, чтобы рассмотреть вопросы возможного технико-технологического улучшения, — что и является *целью* представленного исследования [1]. Для её достижения используется *методика*, основанная на применении методов математического моделирования, в частности, математического аппарата линейного программирования; графоаналитического метода; метода теории вероятности.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Прокат с покрытиями и без него — конечный продукт металлургического производства. Чтобы получить этот металлургический продукт, железная руда проходит длинную цепь непрерывных технологических процессов. Работа среднестатистического металлургического комбината включает агломерационное, доменное, коксо-

химическое, сталеплавильное, прокатное производство.

Основные компоненты для доменных цехов: агломерат, кокс — получают на агломерационном и коксохимическом производствах соответственно. В свою очередь, доменное производство выпускает чугун, который может являться товарной продукцией первого передела, а не только полуфабрикатом для сталеплавильного производства. Последнее, посредством продувки жидкого чугуна и металлолома кислородом, выпускает сталь, разливаемую в непрерывнолитые заготовки (слябы), которые служат товарной продукцией второго передела, а также используются для производства проката [2–4]. Цель прокатного производства — получение металла необходимой формы, с требуемыми свойствами и структурой [1]. Наиболее продуктивным и эффективным способом металлообработки является прокатка. Прокатка — это процесс деформирования металла между вращающимися валками, в результате чего исходная заготовка вытягивается, а толщина её уменьшается. Данная операция, в свою очередь, подразделяется на горячую и холодную прокатку. Начальная температура стали при горячей прокатке достигает 1000–1200°C. Холодная применяется для получения изделия с лучшим качеством поверхности и механическими свойствами и, как следствие, большей добавочной стоимостью.

АНАЛИЗ ПРАКТИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Описанный металлургический цикл основывается на агломерационном процессе. Первостепенная цель данной операции — превращение мелкой многокомпонентной шихты в окучкованный продукт (агломерат), являющийся для доменной печи основным железорудным сырьём [1]. Если будут недостаточно решены вопросы взаимодействия транспорта и входящих потоков сырья агломерационного производства, то эти сбои по принципу «домино» распространятся на все указанные этапы металлургического передела. Это приведёт к мультипликативному увеличению упущенной выгоды по производству металло-



Таблица 1

Исходное железорудное сырье для агломерационного процесса (октябрь 2019 года)

№ п/п	Наименование	Количество вагонов, ед.	Масса, т	Процентное соотношение, %	В сухом виде
1	Концентрат железорудных агломератов	1387	95 704	79,75	86 133, 60
2	Окалина чёрных металлов	6	417	0,35	396,15
3	Руда железная	146	10 214	8,51	9 314,15
4	Пыль колошниковая	10	522	0,43	502,25
5	Пыль аспирационная	10	573	0,48	553,98
6	Скрап конвертерных цехов (0–10 мм)	23	1 446	1,21	1 446,00
7	Окалина конвертерных цехов	1	65	0,05	63,57
8	Окалина железная КЦ кр.	2	182	0,15	174,17
9	Окалина (горячая прокатка)	11	1 003	0,84	975,02
10	Окалина изв. замасленная	6	534	0,45	469,92
11	Щебень фракционный	47	3 257	2,71	3 105,55
12	Оксид (холодная прокатка)	1	78	0,07	76,28
13	Оксид динамных сталей	1	65	0,05	44,59
14	Отсев металл. доломит	1	78	0,07	78,00
15	Известь	95	5 863	4,89	5 863,00
	ИТОГО	1 747	120 000	100,00	109 196,22

Таблица 2

Исходное железорудное сырье для агломерационного процесса (ноябрь 2019 года)

№ п/п	Наименование	Количество вагонов, ед.	Масса, т	Процентное соотношение, %	В сухом виде
1	Концентрат железорудных агломератов	1386	95 663	79,72	86 096,70
2	Окалина чёрных металлов Урал	6	417	0,35	396,15
3	Руда железная	146	10 214	8,51	9 314,15
4	Пыль колошниковая ДЦ-1	6	261	0,22	251,87
5	Пыль колошниковая ДЦ-2	5	261	0,22	253,22
6	Пыль аспирационная ДЦ-1	6	287	0,25	271,50
7	Пыль аспирационная ДЦ-2	5	287	0,25	275,96
8	Скрап конв. цехов (0–10 мм)	23	1 446	1,21	1 446, 00
9	Окалина конв. цехов	1	65	0,06	62,67
10	Окалина железная КЦ кр.	2	182	0,15	174,94
11	Окалина (горячая прокатка)	11	1 003	0,84	960,87
12	Окалина изв. замасленная	6	534	0,45	469,92
13	Щебень фракционный	38	3 257	2,71	3 128, 35
14	Оксид (холодная прокатка)	1	78	0,07	53,51
15	Оксид динамных сталей	1	65	0,05	62,86
16	Отсев металл. доломит	1	78	0,07	78,00
17	Известь	94	5 902	4,92	5 902,00
	ИТОГО	1 738	120 000	100,00	109 198,64

продукции. В настоящий момент остро встаёт вопрос решения данных задач, на что и нацелено проводимое исследование [2–6].

Исходным сырьём для агломерационного процесса являются аглоруды, флюсы (доломит, известняк, известь), железоруд-

ные концентраты (продукты обогащения железных руд), металлургические отходы (колошниковая пыль, окалина, шламы), коксовая мелочь, отсев агломерата и окатышей из доменных цехов, отсеянный мелкий агломерат, который возвращают для повторного спекания (возврат)

Формирование штабелей железорудного сырья с использованием марганцовистого известняка. Схема «разрез» штабеля [1]

№ п/п		Наименование слоя	Объём каждого слоя, т	Объём каждого слоя, ваг.
1		Концентрат железных руд	6 000	90
2		Марганцовистый известняк	1 080	16
3		Щебень	500	6
4		Концентрат железных руд	2 000	30
5		Руда железная	2 240	32
6		Концентрат железных руд	4 500	128
7		Скрап	400	7
8		Концентрат железных руд	2 000	30
9		Щебень	500	6
10		Концентрат железных руд	4 500	128
11		Марганцовистый известняк	1 010	15
12		Концентрат железных руд	2 000	30
13		Руда железная	2 240	32
14		Концентрат железных руд	4 500	64
15		Щебень	500	6
16		Концентрат железных руд	9 000	128
17		Скрап	400	7
18		Марганцовистый известняк	1 010	15
19		Руда железная	2 240	32
20		Щебень	500	6
21		Концентрат железных руд	12 000	170
22		Щебень	500	6
23		Марганцовистый известняк	1 010	15
24		Концентрат железных руд	4 500	64
25		Скрап + окалина	400	7
26		Руда железная	1 680	24
27		Концентрат железных руд	9 000	128
28		Щебень	500	6
29		Концентрат железных руд	18 000	256

ний, в свою очередь, выполняется, чтобы получить однородную смесь компонентов шихты, которые обладают высокой газопроницаемостью в процессе спекания.

Процесс спекания происходит на агломерационных машинах, представляющих замкнутый конвейер, который, в свою очередь, состоит из паллет (спекательных тележек), осуществляющих движение по направляющим рельсам. Когда спекательная тележка проходит под питателем, на неё загружается подготовленная шихта. В момент прохождения загруженной паллеты под газовыми горелками зажигательного горна твёрдое топливо верхнего слоя шихты начинает гореть, и круг горения распространяется сверху вниз. Тележки последовательно пропускают под вакуум-камерами с целью просасывания воздуха

через спекаемую шихту, который требуется для горения твёрдого топлива и удаления продуктов сгорания [1; 2; 4].

Как только в хвосте агломерационной машины отделён горячий возврат, агломерат следует на охладитель. А потом вновь повторяется стадия грохочения, в процессе которой выделяется холодный возврат [2; 4; 7; 8]. Отсортированный агломерат в вагонах направляется в доменный цех.

На рассматриваемом нами металлургическом комбинате агломерационным производством используются открытые склады руды (СР) эстакадного типа (рис. 2) [1].

В состав рассматриваемой агломерационной фабрики входят три склада эстакадного типа: СР (склад руды)-1, СР-2, СР-3. Склад СР-2 имеет в своём составе два штабеля, остальные по одному [1]. В про-

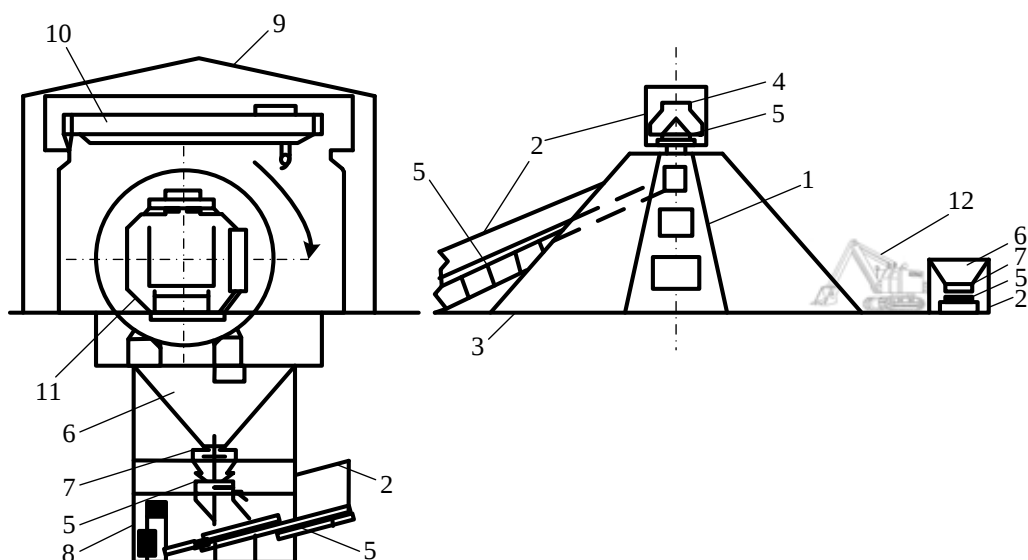


Рис. 2. Склад руды эстакадного типа: 1 – эстакада, 2 – галереи, 3 – подштабельное покрытие, 4 – разгрузочная тележка, 5 – ленточный конвейер, 6 – приёмные бункера, 7 – питатель, 8 – подземная часть приёмного устройства, 9 – здание приёмного устройства, 10 – кран мостовой, 11 – вагоноопрокидыватель, 12 – экскаватор [3].

цессе выгрузки железорудного сырья одновременно формируются два штабеля, каждый из которых представляет собой многокомпонентный «пирог», количество слоёв, их последовательность и объём каждого слоя строго регламентированы. При закладке штабеля необходимо руководствоваться схемой его формирования, пример которой приведён в табл. 3.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Задачей исследования является построение математической модели оптимизации выгрузки железорудного сырья, в основу которой закладывается динамическая транспортная задача с задержками (ДТЗЗ) [1; 9; 10].

Известны объёмы производства, то есть объём сырья, поступающий со станций примыкания в адрес металлургического комбината, $A_i, i = \overline{1, x}$; объёмы спроса – количество сырья, необходимое для формирования конкретного слоя, $B_j, j = \overline{1, y}$. Имеем период оптимизации в виде дискретных тактов $[0, T], T \in \{0, 1, 2, \dots\}$. Известна удельная стоимость единицы груза $C_{ij}(t)$ в $t^{\text{й}}$ момент времени [1].

Чтобы решить поставленную задачу, необходимо минимизировать функционал [1; 9–13]:

$$F = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij}(t) \cdot U_{ij}(t) + \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m C_i^*(t) \cdot X_i^A(t) + \sum_{t=0}^T \sum_{j=1}^n C_j^*(t) \cdot X_j^B(t), \quad (1)$$

где $U_{ij}(t)$ – объём поставки от i -го поставщика к j -му потребителю, то есть количество вагонов с грузом, отправляемых из A_i и прибывающих в B_j в момент времени t ;

$X_i^A(t)$ – объём запаса железорудного сырья у i -го поставщика в момент времени t ;

$X_j^B(t)$ – объём запаса железорудного сырья у j -го потребителя, в момент времени t ;

$C_j^*(t)$ – затраты на хранение единицы запаса в момент времени t у i -го поставщика;

$C_j^*(t)$ – затраты на хранение единицы груза j -го потребителя в момент времени t [1].

На оптимизацию функционала (1) накладываются такие ограничения, как [1]:

1. Уравнение динамики связи поставщиков и потребителей:

$$U_{ij}^+(t) = U_{ij}^-(t - t_{ij}); \quad (2)$$

$$U_{ij}^+(t + t_{ij}) = U_{ij}^-(t), \quad (3)$$

где $U_{ij}^+(t)$ – поставка, прибывающая к потребителю;

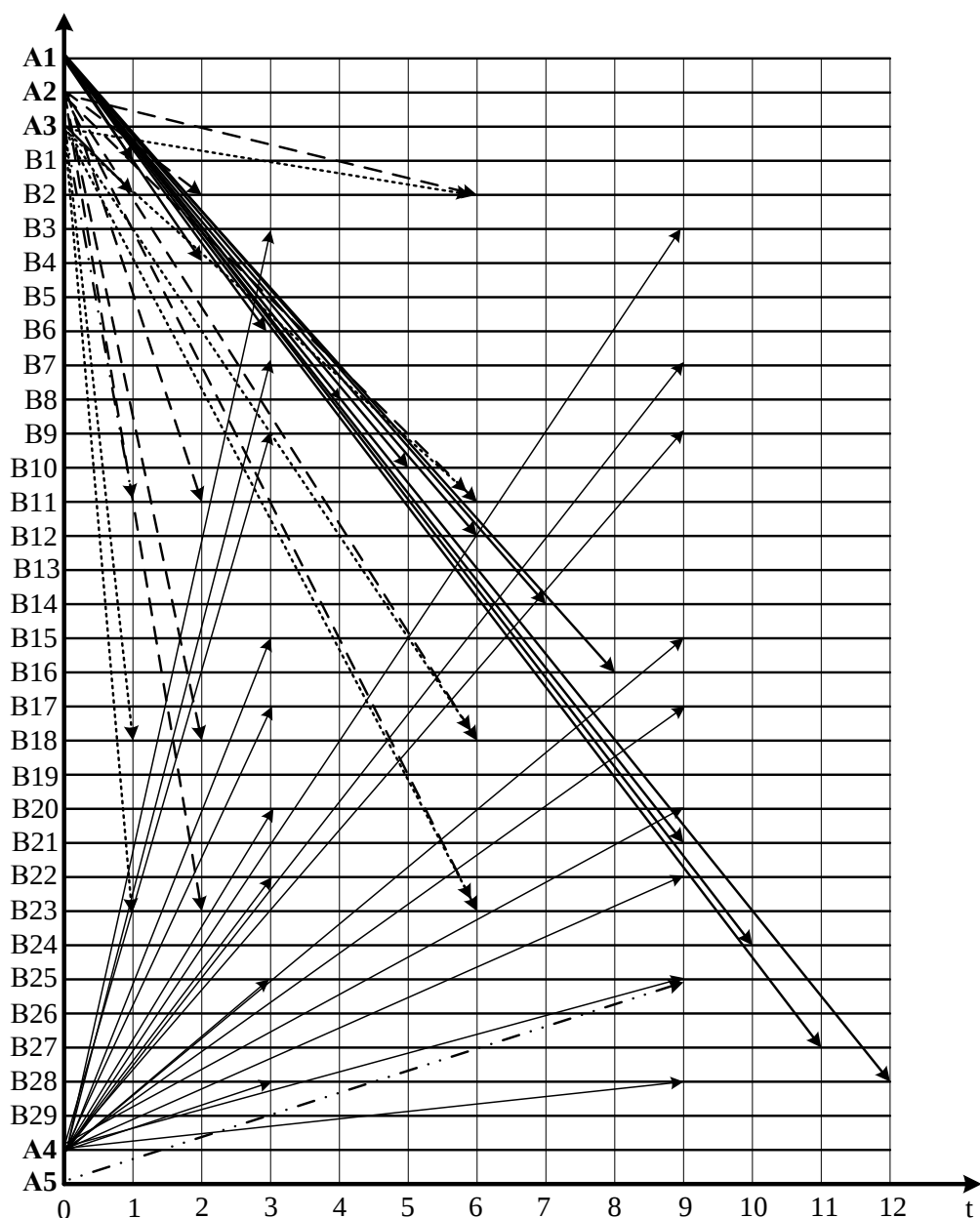


Рис. 3. Диаграмма взаимосвязи периодов оптимизации поставщиков и потребителей (авторский рисунок).

$U_{ij}^-(t)$ — поставка, вышедшая от поставщика;

t_{ij} — время транспортного запаздывания, равная продолжительности транспортировки от A_i к B_j [1].

2. Уравнение динамики запасов у поставщиков [1; 10]:

$$X_i^A(t+1) = X_i^A(t) - \sum_{j=1}^n U_{ij}^-(t) + a_i(t), \quad (4)$$

где $a_i(t)$ — объём поставок.

3. Уравнение динамики запасов потребителей:

$$X_j^B(t+1) = X_j^B(t) - \sum_{i=1}^m U_{ij}^+(t) - b_j(t). \quad (5)$$

4. Уравнение баланса объёмов производства, потребления, поставок:

$$\sum_{i=0}^T \sum_{i=1}^m a_i(t) = \sum_{i=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n U_{ij}(t) = \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^n b_j(t). \quad (6)$$

5. Ограничение естественной неотрицательности поставок и запасов [10]:

$$U_{ij}(t) \geq 0; \quad X_i^A(t) \geq 0; \quad X_j^B(t) \geq 0.$$

Получение решения ДТЗ3 возможно, если выполняется условие (7) — динамический баланс объёмов поставщиков и потребителей [1; 14; 15], то есть, если присутствует относительная согласованность их производственных программ:

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m a_i(t) \geq \sum_{t=0}^{t+t_0} \sum_{j=1}^n b_j(t); \quad t = 0, \dots, T_0 \quad (7)$$

В постановке данной математической модели за поставщика условно примем станции примыкания, обеспечивающие агломерационное производство агломерационным сырьём, в роли потребителя — слой; таким образом, количество потребителей равно числу слоёв в формируемом штабеле. В данном случае металлургический комбинат обслуживают пять станций примыкания. То есть, в поставленной задаче имеем пять поставщиков (A1, A2, A3, A4, A5). Как упоминалось ранее, в формируемом штабеле имеем 29 слоёв, следовательно, в описываемой задаче есть 29 потребителей (B1, ..., B29). Поток сырья необходимо «попасть» в определённый слой, и каждый из этих слоёв могут формировать несколько поставщиков. Так образуется наслоение, то есть несколько монозадач с моногрузом накладываются друг на друга; в итоге получаем мультипликативное наложение однопродуктовых задач, на основе которых строится диаграмма взаимосвязи периодов оптимизации поставщиков и потребителей (рис. 3).

Количество математических моделей получается равным количеству слоёв в формируемом штабеле. Но не стоит забывать о том, что формировать одновременно два и более слоёв мы не можем, в определённый отрезок времени формируется только один слой.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Исследовав возможности гармонизации транспортных потоков с требованиями основного производственного процесса, авторы смогли представить способы возможного технико-технологического улучшения.

Решив поставленную задачу, мы получаем научно, теоретически обоснованные нормативы технологического простоя сырья в ожидании выгрузки. Становятся известны интервалы и простои в случае несанкционированного прибытия груза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А. Т., Суслова О. А., Воронкова Е. А. Теоретические основы оптимизации процесса выгрузки железорудного сырья на примере металлургического комбината // Вестник Липецкого государственного технического университета. — 2020. — № 2 (43). — С. 36–40.
2. Кудрин В. А. Металлургия стали. — М.: Металлургия, 1989. — 560 с.
3. Harrison, A., van Hoek, R. Logistics Management and Strategy. Competing through the supply chain. 3rd edition. Prentice hall financial times, 2008, 343 p. [Электронный ресурс]: <https://docviewer.yandex.ru/?lang=en&tm=1600715022&tld=ru&name=Logistics+Management+and+Strategy+Competing+Through+the+Supply+Chain.pdf&text=2.+Alan+Harrison%2C+Remko+van+Hoeke.+Logistics+Management+and+Strategy%3A+competing+through+the+supply+chain&url=https%3A%2F%2Fvulms.vu.edu.pk%2FCourses%2FMGMT615%2FDownloads%2FLogistics%20Management%2520and%2520Strategy%2520Competing%2520Through%2520the%2520Supply%2520Chain.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=7a09cc4c3f45d00889f1763e4f234aa5&keyno=0>. Доступ 11.12.2019.
4. Рябошук С. В., Ковалёв П. В., Кур А. А. Сырьевая база металлургии. — СПб., 2018. — 60 с.
5. Галабурда В. Г. Единая транспортная система: Учебник для вузов. — М.: Транспорт, 1996. — 295 с.
6. Рахмангулов А. Н. Железнодорожные транспортно-технологические системы: организация функционирования: Монография. — Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. — 300 с.
7. Козлов П. А., Миловидов С. П., Попов А. Т. Организация работы технологического транспорта в промышленных системах // Экономика и математические методы. — 1986. — № 4 (22). — С. 697–703.
8. Козлов П. А., Владимирская И. П. Пути повышения обоснованности технологических решений: проблемы и суждения // Вестник ВНИИЖТ: Научно-технический журнал. — 2009. — № 3. — С. 8–13.
9. Попов А. Т., Гнедаш М. А. Оптимизация транспортных потоков в системе «производство—транспорт—потребление»: Монография. — Липецк: ЛГТУ, 2006. — 179 с.
10. Попов А. Т., Суслова О. А., Воронкова Е. А. Оптимизация взаимодействия агломерационного и доменного производства на основе динамической транспортной задачи с задержками // Вестник Липецкого государственного технического университета. — 2018. — № 2 (36). — С. 66–74.
11. Попов А. Т. Оптимизация взаимодействия технологического железнодорожного транспорта и производства (на примере металлургического комбината) / Дис... канд. техн. наук. — М., МИИТ, 1984. — 237 с.
12. Нестеров Е. П. Транспортные задачи линейного программирования. — М.: Транспорт, 1971. — 216 с.
13. Канторович Л. В., Горстко А. Б. Математическое оптимальное программирование в экономике. — М.: Знание, 1968. — 96 с.
14. Phillips, D. T., Garcia-Diaz, A. Fundamentals of Network Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981, 474 p. [Электронный ресурс]: https://books.google.ru/books/about/Fundamentals_of_network_analysis.html?id=w2FRAAAAMAAJ&redir_esc=y. Доступ 25.02.2020.
15. Ford, L. R., Fulkerson, D. R. Flows in Networks. New Jersey: Princeton university press Princeton, 1962, 212 p. [Электронный ресурс]: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2007/R375.pdf>. Доступ 25.02.2020.





Optimization of the Process of Unloading of Iron Ore Raw Materials: The Case of a Steel Plant



Alexey T. POPOV



Olga A. SUSLOVA



Elena A. VORONKOVA

Popov, Alexey T., Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia.

Suslova, Olga A., Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia.

Voronkova, Elena A., Lipetsk State Technical University (LSTU) Lipetsk, Russia.*

ABSTRACT

The process of unloading iron ore raw materials of the metallurgical plant to the sinter plant has not been considered for a long time as a particular topic. Over the last years the conditions of metallurgical production have undergone certain changes: its intensification has occurred, which entails the need to re-evaluate parameters of stable operation of sinter production. The objective of the suggested study is to consider the issues of possible technical and technological improvement harmonizing transport flows with the requirements of the main production process. To achieve this goal, a technique of mathematical modelling is used, based on the mathematical apparatus of linear programming; graphic-analytical method; method of probability theory.

The issues of the process of unloading, storage of iron ore raw materials, of their preparation for sinter production are primarily considered.

The article presents the main positions of the process of optimizing unloading of sinter batch of a metallurgical plant. The general characteristics of the technology of metallurgical

production and of each particular process are described. The agglomeration process is considered in more detail. The tables of initial iron ore raw materials for sintering production for certain reporting periods are given, for the sake of clarity, the data of one of the tables are summarized in a diagram. A diagram of a standard trestle-type ore warehouse is considered, which sequentially shows the main processes of sintering production from supply of raw materials to the car dumper to getting through a belt conveyor into a stack, and then into receiving bins. The article also provides an example of formation of piles of iron ore raw materials using manganese limestone.

The study is based on a dynamic transport problem with delays (DTPD), which considers time of transportation of goods, the dynamics of production volumes over time, the dynamics of consumption, the dynamics of stocks of suppliers and consumers, dynamics of cost of transportation and storage, dynamics of cost of consumption losses. The study contains several mono-problems with a mono load, which overlap each other, forming a multiplicative overlay of single-product problems.

Keywords: industrial transport, steel plant, metallurgical plant, unloading, iron ore raw materials, mathematical model, optimization, agglomeration.

*Information about the authors:

Popov, Alexey T. – Ph.D. (Eng), Professor, Head of the Department of Traffic Management of Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia, popov@stu.lipetsk.ru.

Suslova, Olga A. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Traffic Management of Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, suslova_2003@mail.ru.

Voronkova, Elena A. – Ph.D. student at the Department of Traffic Management of Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, makarova.lena27@yandex.ru.

Article received 25.01.2020, accepted 27.04.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 148.

Background.

The process of unloading iron ore raw materials and the problem of optimizing this process have become of acute interest to researchers at the present time. This issue has not been addressed in detail for 20 years, at least in Russian scientific sources. The conditions of metallurgical production have changed over this period: the output of finished products has increased, and it is planned to further increase it at the existing production facilities; sintering speed of the agglomerate on the belt became higher, and so, intensification of production took place. Thus, the issues of the process of unloading raw materials, their storage, preparation for sinter production come to the fore [1]. And also the number of sinter charge (batch) components has increased significantly: if earlier their number did not exceed ten, now it reaches 23–29 items. In connection with the changes that have occurred, it becomes necessary to study the transport infrastructure and the operational structure of the technical process; its main objective is to find their inconsistencies in incoming and outgoing flows. It is advisable to explore the possibilities of harmonizing transport flows with the requirements of the main production process in order to consider the issues of possible technical and technological improvement, and that is the *objective* of the suggested study [1]. To achieve it, a *method* used is based on application of methods of mathematical modelling, in particular, on the mathematical apparatus of linear programming; graphic-analytical method; method of probability theory.

Theoretical foundations of the technological process

Rolled steel with and without coatings is the end product of metallurgical production. To obtain this metallurgical product, iron ore goes through a long chain of continuous technological processes. The work of an average metallurgical plant includes sintering, blast-furnace, coke-chemical, steel-making, rolling production.

The main components for blast-furnace shops, which are agglomerate, coke, are obtained at sinter and by-product coke plants, respectively. In turn, blast-furnace production produces pig iron, which can be a commercial product of the first processing, and not only a semi-finished product for steel production. The latter, by blowing liquid iron and scrap metal with oxygen, produces steel, poured into continuously cast

billets (slabs), which serve as commercial products of the second processing, and are also used for production of rolled products [2; 3; 4]. The purpose of rolling production is to obtain metal of the required shape, with the required properties and structure [1]. The most productive and efficient way of metalworking is rolling. Rolling is the process of deformation of metal between rotating rolls, as a result of which the original workpiece is stretched, and its thickness decreases. This operation, in turn, is divided into hot and cold rolling. The initial temperature of steel during hot rolling reaches 1000–1200°C. Cold is used to obtain a product with better surface quality and mechanical properties and, as a result, a higher added value.

Analysis of practices of functioning of sinter production

The described metallurgical cycle is based on an agglomeration process. The primary goal of this operation is transformation of a small multicomponent charge into a lumpy product (agglomerate), which is the main iron ore raw material for a blast furnace [1]. If the issues of interaction between transport and incoming flows of raw materials of sinter production are not sufficiently resolved, then these failures following the principle of «dominoes» will spread to all the indicated stages of metallurgical processing. This will lead to a multiplicative increase in lost profits in production of metal products. At the moment, the question of solving these problems arises, which is what this study is aimed at [2–6].

The initial raw materials for the sintering process are sinter ores, fluxes (dolomite, limestone, lime), iron ore concentrates (products of enrichment of iron ores), metallurgical waste (blast furnace dust, scale, sludge), coke breeze, sinter and pellets screening from blast furnaces, screened-out small agglomerate, which is returned for re-sintering (return) (Tables 1, 2) [1]. The period for laying a zone (stack) depends on the required volume of feedstock, as well as on its availability and can vary from several days to several weeks.

Analyzing Table 1 and Table 2 we see that the most massive flow to sinter production consists of the concentrate of iron ores, the least powerful flows are scale of converter workshops, oxide of dynamo steel, cold rolling, screening. Fluctuations in flows arriving at different periods of time are absent or minimal and range from 0,002 % to 0,5 %, which indicates



Table 1

Initial iron ore raw materials for the agglomeration process (October 2019)

No.	Name	Number of cars, pcs	Weight, t	Percentage, %	In dry form
1	Concentrate of iron ore agglomerate	1387	95 704	79,75	86 133, 60
2	Scale of ferrous metals	6	417	0,35	396,15
3	Iron ore	146	10 214	8,51	9 314,15
4	Blast furnace dust	10	522	0,43	502,25
5	Aspiration dust	10	573	0,48	553,98
6	Scrap of convertor workshops (0–10 mm)	23	1 446	1,21	1 446,00
7	Scale of convertor workshops	1	65	0,05	63,57
8	Iron scale CC cr.	2	182	0,15	174,17
9	Scale (hot rolling)	11	1 003	0,84	975,02
10	Scale lime oiled	6	534	0,45	469,92
11	Fractional crushed stone	47	3 257	2,71	3 105,55
12	Oxide (cold rolling)	1	78	0,07	76,28
13	Oxide of dynamo steel	1	65	0,05	44,59
14	Screening out of metal dolomite	1	78	0,07	78,00
15	Lime	95	5 863	4,89	5 863,00
	TOTAL	1 747	120 000	100,00	109 196,22

Table 2

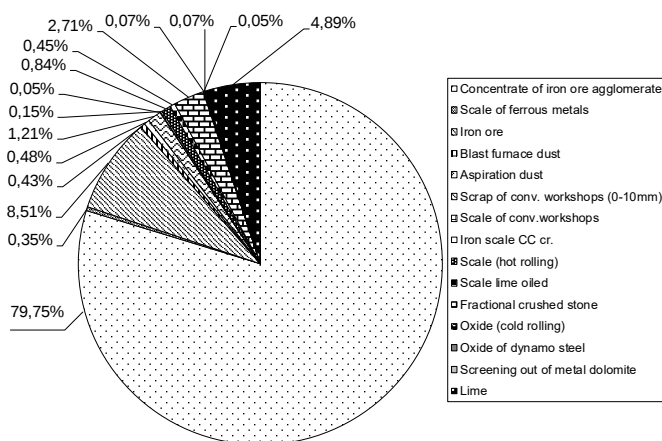
Initial iron ore raw materials for the agglomeration process (November 2019)

No.	Name	Number of cars, pcs	Weight, t	Percentage, %	In dry form
1	Concentrate of iron ore agglomerate	1386	95 663	79,72	86 096,70
2	Scale of ferrous metals Ural	6	417	0,35	396,15
3	Iron ore	146	10 214	8,51	9 314,15
4	Blast furnace dust DC-1	6	261	0,22	251,87
5	Blast furnace dust DC-2	5	261	0,22	253,22
6	Aspiration dust DC-1	6	287	0,25	271,50
7	Aspiration dust DC-2	5	287	0,25	275,96
8	Scrap of conv. workshops (0–10 mm)	23	1 446	1,21	1 446, 00
9	Scale of conv. workshops	1	65	0,06	62,67
10	Iron scale CC cr.	2	182	0,15	174,94
11	Scale (hot rolling)	11	1 003	0,84	960,87
12	Scale lime oiled	6	534	0,45	469,92
13	Fractional crushed stone	38	3 257	2,71	3 128, 35
14	Oxide (cold rolling)	1	78	0,07	53,51
15	Oxide of dynamo steel	1	65	0,05	62,86
16	Screening out of metal dolomite	1	78	0,07	78,00
17	Lime	94	5 902	4,92	5 902,00
	TOTAL	1 738	120 000	100,00	109 198,64

stabilization of the technology. That is, on the one hand, there is a stable core of stability, on the other, there are some changes, if there are changes, therefore, there is optimization, there is dynamics. Stack capacity is standard. Meeting these requirements, namely, formation of a multi-layer stack, is the main problem for the personnel of industrial railway transport.

The main task of the non-public access road is a reliable, impeccable transport service.

Agglomeration includes the following operations: homogenization, storage, batch preparation and sintering, carried out on sintering machines, batch cooling on coolers, and sintered agglomerate processing [1]. Averaging occurs during development of the



Pic. 1. Average percentage of iron ore in a stack [1] (authors' drawing).

stack, when the material of the stack is fed by an excavator to the receiving hoppers (Pic. 2), from where the raw material enters the technological belt conveyor that feeds the sintering belt. The processes of storage and averaging of iron ore raw materials are carried out in warehouses of sintering factories in special stacks in layers, with the obligatory observance of the given proportions (Pic. 1). The number of layers and their volume are prescribed in the corresponding schemes, an example of such a scheme is given in Table 3. At the agglomeration production we are considering, the stack is formed from 29 layers of iron ore raw materials.

The process of preparing the charge includes the following operations: dosing (carried out to maintain the required amount and ratio between the components), followed by mixing, wetting, and pelletizing. The latter, in turn, is performed in order to obtain a homogeneous mixture of charge components, which have high gas permeability during the sintering process.

The sintering process takes place on sintering machines, which represent a closed conveyor, which, in turn, consists of pallets (baking trolleys) moving along guide rails. When the sintering trolley passes under the feeder, the prepared charge is loaded onto it. At the moment the loaded pallet passes under the gas burners of the incendiary furnace, solid fuel of the upper layer of the charge begins to burn, and the circle of combustion spreads from top to bottom. The trolleys are sequentially passed under vacuum chambers, in order to suck air through the sintered charge, which is

required for combustion of solid fuel and removal of combustion products [1; 2; 4].

As soon as hot return is separated in the tail of the sinter machine, the sinter flows to the cooler. And then the screening stage is repeated again, during which a cold return is released [2; 4; 7; 8]. The sorted sinter is sent in cars to the blast furnace shop.

At the metallurgical plant we are considering, sintering production uses open ore storages (SR) of the trestle type (Pic. 2) [1].

The agglomeration plant under consideration includes three trestle (rack) type warehouses: SR (ore storage)-1, SR-2, SR-3. The SR-2 warehouse contains two stacks, the other warehouses have only one at a time [1]. In the process of unloading iron ore, two stacks are simultaneously formed, each of which is a multicomponent «pie», the number of layers, their sequence and the volume of each layer are strictly regulated. When laying a stack, it is necessary to be guided by the scheme of its formation, an example of which is given in Table 3.

Mathematical model

The task of the study is to build a mathematical model for optimizing unloading of iron ore raw materials, which is based on a dynamic transport problem with delays (DTPD) [1; 9; 10].

The production volumes are known, that is, the volume of raw materials coming from the adjoining stations to the metallurgical plant, A_i , $i = \overline{1, x}$; demand volumes — the amount of raw materials required to form a specific layer, B_j , $j = \overline{1, y}$. We have an optimization period in the



Table 3

Formation of stacks of iron ore raw materials using manganese limestone.
Layout «section» of the stack [1]

No.		Name of the layer	Volume of each layer, t	Volume of each layer, cars
1		Iron ore concentrate	6 000	90
2		Manganese limestone	1 080	16
3		Crushed stone	500	6
4		Iron ore concentrate	2 000	30
5		Iron ore	2 240	32
6		Iron ore concentrate	4 500	128
7		Scrap	400	7
8		Iron ore concentrate	2 000	30
9		Crushed stone	500	6
10		Iron ore concentrate	4 500	128
11		Manganese limestone	1 010	15
12		Iron ore concentrate	2 000	30
13		Iron ore	2 240	32
14		Iron ore concentrate	4 500	64
15		Crushed stone	500	6
16		Iron ore concentrate	9 000	128
17		Scrap	400	7
18		Manganese limestone	1 010	15
19		Iron ore	2 240	32
20		Crushed stone	500	6
21		Iron ore concentrate	12 000	170
22		Crushed stone	500	6
23		Manganese limestone	1 010	15
24		Iron ore concentrate	4 500	64
25		Scrap + scale	400	7
26		Iron ore	1 680	24
27		Iron ore concentrate	9 000	128
28		Crushed stone	500	6
29		Iron ore concentrate	18 000	256

form of discrete clock cycles $[0, T]$, $T \in \{0, 1, 2, \dots\}$. The specific cost of a unit of cargo $C_{ij}(t)$ at the t^{th} moment of time is known [1].

To solve the problem, it is necessary to minimize the functional [1; 9–13]:

$$F = \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^n C_{ij}(t) \cdot U_{ij}(t) + \sum_{i=0}^T \sum_{i=1}^m C_i^*(t) \cdot X_i^A(t) + \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^n C_j^*(t) \cdot X_j^B(t), \quad (1)$$

where $U_{ij}(t)$ is volume of delivery from the i -th supplier to the j -th consumer, that is, the number of cargo with cargo sent from A_i and arriving at B_j at time t ;

$X_i^A(t)$ is volume of stock of iron ore raw materials at the i -th supplier at time t ;

$X_j^B(t)$ is volume of stock of iron ore raw materials at the j -th consumer, at time t ;

$C_j^*(t)$ are costs of storing a unit of stock at time t at the i -th supplier;

$C_j^*(t)$ are costs of storing a unit of cargo of the j -th consumer at time t [1].

The optimization of the functional (1) is subject to such restrictions as:

1. Equation of dynamics of communication between suppliers and consumers [1]:

$$U_{ij}^+(t) = U_{ij}^-(t - t_{ij}); \quad (2)$$

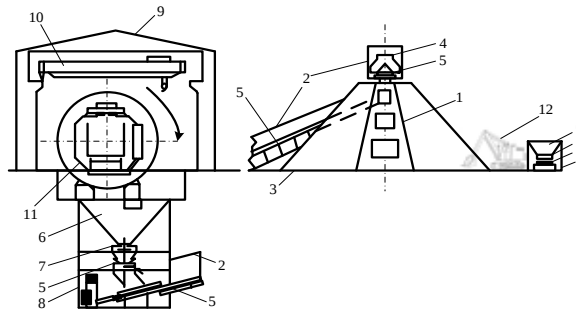
$$U_{ij}^+(t + t_{ij}) = U_{ij}^-(t), \quad (3)$$

where $U_{ij}^+(t)$ is supply arriving at the consumer;

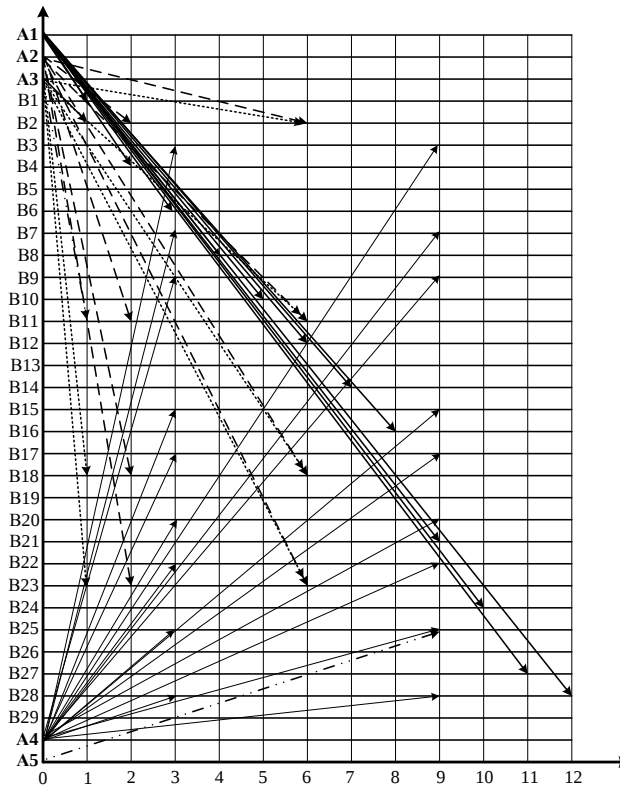
$U_{ij}^-(t)$ is delivery coming from the supplier;

t_{ij} is transport delay time, equal to duration of transportation from A_i to B_j [1].

2. Equation of dynamics of stocks at suppliers [1; 10]:



Pic. 2. Trestle type ore warehouse: 1 – overpass, 2 – galleries, 3 – under-stack cover, 4 – unloading trolley, 5 – belt conveyor, 6 – receiving bins, 7 – feeder, 8 – underground part of the receiving device, 9 – receiving device building, 10 – bridge crane, 11 – car dumper, 12 – excavator [3].



Pic. 3. Diagram of the relationship between the periods of optimization of suppliers and consumers (authors' drawing).

$$X_i^A(t+1) = X_i^A(t) - \sum_{j=1}^n U_{ij}^-(t) + a_i(t), \quad (4)$$

where $a_i(t)$ is volume of supplies.

3. Equation of dynamics of consumer stocks [10]:

$$X_j^B(t+1) = X_j^B(t) - \sum_{i=1}^m U_{ij}^+(t) - b_j(t). \quad (5)$$

4. Equation of balance of volumes of production, consumption, supplies [10]:

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m a_i(t) = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n U_{ij}(t) = \sum_{t=0}^T \sum_{j=1}^n b_j(t). \quad (6)$$

5. Limiting natural non-negativity of supplies and stocks [10]:

$$U_{ij}(t) \geq 0; \quad X_i^A(t) \geq 0; \quad X_j^B(t) \geq 0.$$

Obtaining DTPD solution is possible [1; 14; 15], if condition (7) is satisfied: there is a dynamic balance of volumes of suppliers and consumers, that is, if there is a relative consistency of their production programs:

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m a_i(t) \geq \sum_{t=0}^{t_{ij}} \sum_{j=1}^n b_j(t); \quad t = 0, \dots, T_0. \quad (7)$$

In formulation of this mathematical model, we will conventionally take the adjoining stations for the supplier, providing sinter production with agglomerated raw materials, as the consumer is the layer; thus, the number of consumers is equal to the number of layers in the stack being formed. In this case, the metallurgical plant is served by five adjoining stations. That is, in the task at hand, we have five suppliers (A1, A2, A3, A4, A5). As mentioned earlier, in the formed stack we have 29 layers, therefore, in the described problem there are 29 consumers (B1, ..., B29). The flow of raw materials must «get» into a certain layer, and each of these layers can be formed by several suppliers. This is how layering is formed, that is, several mono-tasks with a mono load are superimposed on each other; as a result, we get a multiplicative imposition of single-product tasks, on the basis of which a diagram of the relationship between optimization periods of suppliers and consumers is constructed (Pic. 3).

The number of mathematical models is equal to the number of layers in the stack being formed. But do not forget that we cannot form two or more layers at the same time, only single layer is formed at a certain time.

Brief conclusions. Having investigated the possibilities of harmonizing transport flows with the requirements of the main production process, the authors could present ways of possible technical and technological improvement.

Having solved the problem, we obtain scientifically, theoretically grounded standards for technological downtime of raw materials pending unloading. Intervals and downtime in case of unauthorized cargo arrival will become known.

REFERENCES

1. Popov, A. T., Suslova, O. A., Voronkova, E. A. Theoretical foundations of optimization of the process of unloading iron ore raw materials on the example of a metallurgical plant [*Teoreticheskie osnovy optimizatsii protsessy vygruzki zheleznorudnogo syriya na primere metallurgicheskogo kombinata*]. *Bulletin of Lipetsk State Technical University*, 2020, Iss. 2 (43), pp. 36–40.
2. Kudrin, V. A. *Metallurgy of steel* [*Metallurgiya stali*]. Moscow, Metallurgiya publ., 1989, 560 p.
3. Harrison, A., van Hoek, R. *Logistics Management and Strategy. Competing through the supply chain*. 3rd edition. Prentice hall financial times, 2008, 343 p. [Electronic resource]: <https://docviewer.yandex.ru/?lang=en&tm=1600715022&tld=ru&name=Logistics+Management+and+Strategy+Competing+Through+the+Supply+Chain.pdf&text=2,+Alan+Harrison%2C+Remko+van+Hoek.+Logistics+Management+and+Strategy%3A+competing+through+the+supply+chain&url=https%3A%2F%2Fvulms.vu.edu.pk%2FCourses%2FDownloads%2FLogistics%2520Management%2520and%2520Strategy%2520Competing%2520Through%2520the%2520Supply%2520Chain.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=7a09cc4c3f45d00889f1763e4f234aa5&keyno=0>. Last accessed 11.12.2019.
4. Ryaboshuk, S. V., Kovalev, P. V., Kur, A. A. *Raw materials base of metallurgy* [*Syrievaya baza metallurgii*]. St. Petersburg, 2018, 60 p.
5. Galaburda, V. G. *Single transport system: Textbook for universities* [*Edinaya transportnaya sistema: Uchebnik dlya vuzov*]. Moscow, Transport publ., 1996, 295 p.
6. Rakhmangulov, A. N. *Railway transport and technological systems: organization of functioning: Monograph* [*Zheleznodorozhnie transportno-tekhnologicheskie sistemy: organizatsiya funktsionirovaniya: Monografiya*]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 300 p.
7. Kozlov, P. A., Milovidov, S. P., Popov, A. T. *Organization of work of technological transport in industrial systems* [*Organizatsiya raboty tekhnologicheskogo transporta v promyshlennyykh sistemakh*]. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 1986, Iss. 4 (22), pp. 697–703.
8. Kozlov, P. A., Vladimirskaia, I. P. *Ways to improve validity of technological solutions: problems and judgments* [*Puti povysheniya obosnovannosti tekhnologicheskikh reshenii: problemy i suzheniya*]. *Bulletin of VNIIZhT: Scientific and technical journal*, 2009, Iss. 3, pp. 8–13.
9. Popov, A. T., Gnedash, M. A. *Optimization of transport flows in the system «production–transport–consumption»: Monograph* [*Optimizatsiya transportnykh potokov v sisteme «proizvodstvo–transport–potrebleniye»*]. *Monografiya*. Lipetsk, LSTU publ., 2006, 179 p.
10. Popov, A. T., Suslova, O. A., Voronkova, E. A. *Optimization of interaction between agglomeration and blast-furnace production on the basis of a dynamic transport problem with delays* [*Optimizatsiya vzaimodeistviya aglomeratsionnogo i domennogo proizvodstva na osnove dinamicheskoi transportnoi zadachi s zaderzhkami*]. *Bulletin of Lipetsk State Technical University*, 2018, Iss. 2 (36), pp. 66–74.
11. Popov, A. T. *Optimization of interaction of technological railway transport and production (using an example of a metallurgical plant)*. Ph.D. (Eng) thesis [*Optimizatsiya vzaimodeistviya tekhnologicheskogo zheleznodorozhnogo transporta i proizvodstva na osnove metallurgicheskogo kombinata*]. *Dis ... kand. tekhn. nauk*. Moscow, MIIT publ., 1984, 237 p.
12. Nesterov, E. P. *Transport problems of linear programming* [*Transportnye zadachi lineinogo programmirovaniya*]. Moscow, Transport publ., 1971, 216 p.
13. Kantorovich, L. V., Gorstko, A. B. *Mathematical optimal programming in economics* [*Matematicheskoe optimalnoye programmirovaniye v ekonomike*]. Moscow, Znanie publ., 1968, 96 p.
14. Phillips, D. T., Garcia-Diaz, A. *Fundamentals of Network Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981, 474 p. [Electronic resource]: https://books.google.ru/books/about/Fundamentals_of_network_analysis.html?id=w2FRAAAAMAAJ&redir_esc=y. Last accessed 25.02.2020.
15. Ford, L. R., Fulkerson, D. R. *Flows in Networks*. New Jersey: Princeton university press Princeton, 1962, 212 p. [Electronic resource]: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2007/R375.pdf>. Last accessed 25.02.2020.



НАДЁЖНОСТЬ АВТОМАТИКИ 164

Детальная методика риска отказов железнодорожной автоматики. Сделает ли теория вероятности отказы невероятными?



БПЛА 174

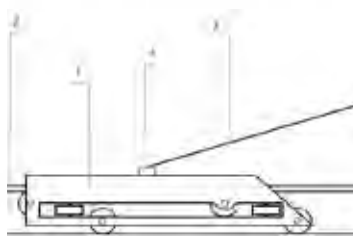
Предложено неожиданное решение вопросов безопасности полётов БПЛА на транспортных объектах: беспилотник «на привязи» у монорельса.

RELIABILITY AND TELEMECHANICS 169

A technique to assess risks of failure of rail telematics. Will the probability theory make the failures less probable?

UAV 182

Unexpected solution of the security issues related to UAV flights over transport facilities: a tethered UAV and the monorail.





Метод для расчётных оценок характеристик безопасности железнодорожной автоматики



Константин БОЧКОВ



Дмитрий КОМНАТНЫЙ

*Бочков Константин Афанасьевич — Белорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь, Гомель.
Комнатный Дмитрий Викторович — Белорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь, Гомель*.*

Рассматривается проблема количественного анализа безопасности микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Проблема остаётся актуальной, так как предметом анализа безопасности являются редко происходящие, но очень опасные события. В качестве основных характеристик безопасности выбраны риск и значимость отказа. Определение значимости отказа выбрано по стандарту MIL-STD-1629A как наиболее адекватное. Приведены расчётные выражения для значимости отказа. Вероятность возникновения опасного отказа получена методом модельного анализа. Вероятность перерастания отказа в аварию предлагается рассчитывать методами сценарного анализа путём

построения древа событий. Приведены расчётные соотношения для рейтингов нарушений, позволяющие сравнивать опасные отказы и аварийные последовательности, в которые отказ может перерасти. Оценка риска эксплуатации систем железнодорожной автоматики выбрана не связанной с экономическими категориями, удобная для нормирования. Она основана на вероятностных представлениях о природе риска и рассчитывается методами теории вероятности. Разработанные расчётные соотношения и модели позволяют анализировать выполнение функций систем обеспечения безопасности движения поездов методами, общими для систем управления, но вместе с тем отражающими особенности работы железнодорожной автоматики.

Ключевые слова: железная дорога, системы железнодорожной автоматики, безопасность, риск, значимость отказа, рейтинги отказов, вероятность опасного отказа, нормирование риска.

*Информация об авторах:

Бочков Константин Афанасьевич – доктор технических наук, профессор, научный руководитель – заведующий НИЛ «Безопасность и электромагнитная совместимость технических средств» Белорусского государственного университета транспорта, Республика Беларусь, Гомель, bochkov1999@mail.ru, priemnay@belsut.gomel.by.

Комнатный Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики телемеханики и связи, докторант Белорусского государственного университета транспорта, Республика Беларусь, Гомель, toe4031@gstu.by.

Статья поступила в редакцию 17.02.2020, принята к публикации 28.05.2020.

For the English text of the article please see p. 169.

Успешная разработка и внедрение современных микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) требуют проведения анализа их безопасности количественными методами. Это объясняется тем, что в таких системах условия безопасности перевозочного процесса реализуются аппаратно-программными средствами. Применяемая элементная база имеет симметричные отказы, интенсивность которых значительно выше интенсивности отказов электромагнитных реле I класса надёжности. К тому же микроэлектронная элементная база имеет низкую устойчивость к электромагнитным помехам и вместе с тем эксплуатируется в сложной электромагнитной обстановке. Следовательно, обеспечить безопасность современных СЖАТ путём экспертных оценок аналогично системам, построенным на реле I класса надёжности, становится невозможным.

В опубликованных монографиях по железнодорожной автоматике [2–4] наиболее распространены методы анализа безопасности, созданные на основе моделей и представлений теории надёжности. Теория надёжности в настоящее время получила широкое развитие, поэтому естественны попытки использовать её для решения новых технических задач. По этому пути построения теории безопасности следуют авторы работ [5–7]. В методах анализа безопасности из [2–4] основной величиной, описывающей безопасность, является интенсивность потока отказов. Предполагается, что поток отказов — пуассоновский, интенсивность отказов является статистически устойчивой величиной. На основании этого подхода в [8; 9] использованы такие показатели безопасности, как средняя наработка до отказа, время пребывания системы в состоянии опасного отказа, коэффициент безопасности. Справедливо отмечается [10], что такие методы анализа безопасности не учитывают то обстоятельство, что опасные отказы, аварии и крушения являются редкими и даже уникальными событиями. Также не учитывается, что для перерастания опасного отказа в аварию требуется стечение нескольких неблагоприятных обстоятельств, которое также происходит достаточно

редко. Достоверное определение интенсивности опасных отказов представляет собой самостоятельную проблему.

С целью учёта редкости событий аварий в [11] предлагается рассматривать участки законов распределения плотности вероятности величин, характеризующих опасные отказы, с большими значениями этих величин и малыми вероятностями их появления. Однако при таком подходе возникает проблема определения параметров и характеристик законов распределения либо из теоретических соображений, либо из данных опыта.

Следовательно, разработка методов анализа безопасности СЖАТ представляет собой крупную научно-техническую проблему, исчерпывающее решение которой в настоящее время ещё не получено. Соответственно, *целью* данной работы является дальнейшее развитие методов анализа безопасности СЖАТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения поставленной цели требуется, в первую очередь, ввести основные величины, характеризующие свойство безопасности СЖАТ. В [12] указано, что такими величинами в теории безопасности систем управления ответственными технологическими процессами являются риск и значимость отказа. Там же изложены общие методы определения этих величин. Применительно к СЖАТ на основании [12] могут быть предложены модификация таких методов количественных расчётов значимости отказа и риска, а также способы рейтингового анализа нарушений безопасности и нормирования риска.

Наиболее адекватное определение значимости отказа S приведено в методике из стандарта MIL-STD-1629A. Хотя этот стандарт и отменён официально, заменён на стандарт MIL-STD-2070, но его методы и модели продолжают широко использоваться при проведении анализа безопасности ответственных технических систем, в частности, летательных аппаратов [1; 12; 13]. В указанных стандартах значимость отказа определяется как вероятность перерастания исходного опасного отказа в аварийную ситуацию:

$$S = P(I_0) P(E/I_0), \quad (1)$$

где $P(I_0)$ — вероятность отказа;





$P(E/I_0)$ — вероятность перерастания опасного отказа в аварию.

Такое определение учитывает, что не каждый опасный отказ влечёт за собой аварийную ситуацию; для развития аварийной ситуации должно произойти стечение нескольких неблагоприятных обстоятельств. Это стечение случается достаточно редко. Следовательно, приведённое определение значимости отказа устраняет отмеченный выше недостаток существующих методов анализа безопасности.

Значимость отказа имеет математический смысл вероятности возникновения аварийной ситуации по причине данного опасного отказа, поэтому её нормирование должно осуществляться по стандарту ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012, в котором установлены уровни SIL и соответствующие значения вероятностей опасного отказа выполнения функции безопасности. В частности, для систем железнодорожной автоматики установлен уровень безопасности SIL 4 по ГОСТ 33894-2016.

Вероятность опасного отказа на основании [14] определяется по формуле:

$$P(I_0) = P_{hw}(T_{mi}) P_{sw}(T_{mi}) P_{op}(T_{mi}) P_{emd}(T_{mi}), \quad (2)$$

где P_{hw} — вероятность того, что время t с момента вступления поезда на маршрут до момента отказа аппаратуры СЖАТ не меньше времени пребывания поезда на маршруте;

P_{sw} — вероятность того, что время t с момента вступления поезда на маршрут до момента отказа программно-математического обеспечения СЖАТ не меньше времени пребывания поезда на маршруте;

P_{op} — вероятность того, что время t с момента вступления поезда на маршрут до момента отказа оператора СЖАТ не меньше времени пребывания поезда на маршруте;

P_{emd} — вероятность того, что время t с момента вступления поезда на маршрут до момента отказа аппаратуры СЖАТ под действием электромагнитных помех не меньше времени пребывания поезда на маршруте;

T_{mi} — время пребывания поезда на маршруте, с.

Вероятности P_{hw} , P_{sw} , P_{op} рассчитываются по формулам:

$$P_{hw}(T_{mi}) = \exp \left[-T_{mi} \sum_{m=1}^{m_0} \lambda_m (1 - v_m) \right], \quad (3)$$

$$P_{sw}(T_{mi}) = \exp \left[-a T_{mi} \sum_{m=1}^{m_0} \lambda_m \right], \quad (4)$$

$$P_{op}(T_{mi}) = \exp \left[-T_{mi} \sum_{m=1}^{m_0} \lambda_m (1 - v_m) \right], \quad (5)$$

где λ — интенсивность отказов 1/с;

v — коэффициент, учитывающий парирование опасного отказа устройствами самоконтроля [14];

a — коэффициент, учитывающий пребывание программно-математического обеспечения в пассивном состоянии;

m_0 — число возможных отказов.

Характеристики электромагнитных помех, действующих на СЖАТ, имеют вероятностную природу [15]. Неоднократно предпринимались экспериментальные исследования законов распределения плотности вероятности характеристик электромагнитных помех [15; 16]. Поэтому вероятность отказа аппаратуры СЖАТ под действием электромагнитных помех рационально рассчитывать на основании известной модели «нагрузка—устойчивость» [15]:

$$P_{emd} = \int_0^{\infty} f_N(U) F_R(U) dU, \quad (6)$$

где U — напряжение помех, В;

$f_N(U)$ — функция плотности вероятности распределения уровня помех;

$F_R(U)$ — функция вероятности уровня помехоустойчивости аппаратуры СЖАТ.

Вероятность перерастания опасного отказа в аварию определяется путём анализа деревьев событий аварийных последовательностей по [12; 17]. Также задача расчёта вероятности перерастания опасного отказа в аварию решается в [18; 19]. Таким образом, при расчёте вероятности перерастания опасного отказа в аварию осуществляется сценарный анализ, рассматриваются конкретные пути реализации аварии. При расчёте вероятности опасного отказа осуществляется модельный анализ опасного отказа на основе моделей для расчёта вероятности отказов, вызванных различными причинами. Эти этапы анализа безопасности систем управления ответственными технологическими процессами, в том числе СЖАТ, являются обязательными [11].

Для сравнительного анализа нарушений безопасности вводятся понятия рейтингов нарушений [12].

Рейтинг $R = \sum_{i=1}^L Q_i$ отражает вероятность развития данного опасного отказа по всем L аварийным последовательностям.

Максимальный рейтинг $R_{max} = \max(Q_i)$ отражает вероятность развития наиболее вероятной аварийной последовательности для данного опасного отказа.

Средний рейтинг $R_{mdl} = R/L$ отражает вероятность развития всех возможных аварийных последовательностей для данного опасного отказа.

Завершающим этапом анализа безопасности систем управления ответственными технологическими процессами, в их числе и СЖАТ, является оценка риска эксплуатации. При оценке риска желательно не использовать экономические категории и «политические» соображения [20], а вместо этого получить численную оценку, удобную для нормирования. Такая оценка предложена в [21] и осуществляется по формуле:

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{P_{mif}} - 1}, \quad (7)$$

где P_{mif} — вероятность сбоя аппаратуры.

Так как значимость отказа имеет математический смысл вероятности возникно-

вения аварийной ситуации по причине данного опасного отказа, то применительно к рассматриваемому в статье методу анализа безопасности выражение (7) преобразуется к:

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{C} - 1}, \quad (8)$$

где C — значимость отказа.

В [21] обоснованы граничные значения риска, которые определяют области нормальной и аварийной работы технической системы и позволяют нормировать значения риска при эксплуатации СЖАТ:

- $0 < \rho < 1$ — ограниченная безопасность;
- $\rho = 1$ — критическое состояние, наличие отказов;
- $\rho > 1$ — опасное состояние, угроза аварии;
- $\rho \gg 1$ — запредельное состояние, угроза катастрофы.

ВЫВОДЫ

Итак, в статье сформулирован метод анализа безопасности СЖАТ, приведены соотношения для расчёта величин, характеризующих безопасность эксплуатации СЖАТ, описан сценарный и модельный анализ безопасности СЖАТ.

Отличительными чертами предлагаемого метода являются:

1. Учитываются основные исходные события, могущие привести к браку в поездной работе, аварии, крушению: отказы аппаратной части по причине ограниченной надёжности элементной базы, ошибки программно-математического обеспечения, ошибки оператора, воздействие электромагнитных помех.

2. Учитываются неаддитивность факторов, влияющих на опасный отказ, критичность совокупности факторов и другие аспекты перерастания опасного отказа в аварийную ситуацию.

3. Развитие аварийной ситуации характеризуется параметрами, которые можно просто определить в практике эксплуатации. Не используется общий поток опасных отказов, распределение плотности вероятности в области хвостов распределений, оценка которых осложнена редкостью соответствующих событий.

4. Показатели безопасности и риска позволяют осуществить нормирование, не



привлекая экономические категории, обоснованно сравнивать аварийные последовательности в аспекте безопасности с учётом наиболее вероятных, вероятных, и в среднем. Учитываются и возможные исходные события, и пути перехода в аварийно, и возможное конечное происшествие.

5. Редкость и даже уникальность аварийной ситуации не влияет на выбор математического описания; аварийные ситуации учитываются в дереве событий.

6. Используется методика анализа, общая для систем управления ответственными технологическими процессами, осуществляются сценарный и модельный анализ риска, необходимый для всех технических систем.

7. Вероятности исходных событий рассчитываются по хорошо апробированным методам теории надёжности, характеристики аварийных ситуаций — специфическими адекватными методами теории безопасности.

8. Реализуется принцип принятия решения на основе фактов [10].

Очевидно, что все достоинства предлагаемого в статье метода и преодолеваемые им трудности анализа безопасности непосредственно применимы к вопросам эксплуатации СЖАТ, обеспечения функциональной безопасности этих систем. При этом осуществляется дальнейшее развитие теории СЖАТ на основе уже достигнутого уровня [14; 17].

Поэтому допустимо заключить, что результаты настоящей статьи могут найти применение для доказательства безопасности современных микропроцессорных и микроэлектронных СЖАТ, что является актуальной научно-практической задачей и необходимым этапом разработки и внедрения таких систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. MIL-STD1629A 24 November 1980 Military Standart Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. Washington, DC, Department of Defense; Washington, DC: Department of defense, 1980, 25 p. [Электронный ресурс]: <https://www.fmea-fmea.com/milstd1629.pdf>. Доступ 27.03.2020.
2. Сапожников В. В., Елкин Б. Н., Кокурин И. М. [и др.] Станционные системы автоматики и телемеханики: Учебник / Под ред. В. В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1997. — 432 с.
3. Андрес Э., Долгий И. [и др.] Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира: Учеб. пособие. [Пер. с англ.] / Под ред. Т. Тега и С. Власенко. — М.: Интекст, 2010. — 496 с.

4. Сапожников В. В. [и др.] Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / Под ред. В. В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1997. — 288 с.

5. Шубинский И. Б., Новожилов Е. О. Метод нормирования показателей надёжности объектов железнодорожного транспорта // Надёжность. — 2019. — Т. 19. — № 4 — С. 17–23.

6. Шубинский И. Б., Замышляев А. М., Проневич О. Б. Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта // Надёжность. — 2017. — Т. 17. — № 1. — С. 40–45.

7. Маковеев О. Л., Костюнин С. Ю. Оценка параметров безопасности и безотказности систем контроля и управления // Надёжность — 2017. — Т. 17. — № 1. — С. 46–52.

8. Braband, J. A practical guide to safety analysis methods. Signal + Draht, 2001, Vol. 93, No. 9, pp. 41–44.

9. Braband, J., Lennartz, A. Systematic Process for the Definition of Safety Targets for Railway Signalling Applications. Signal + Draht, 1999, No. 9, pp. 53–57.

10. Негрей В. Я. Развитие методов оценки безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте // Вестник БелГУТ. Наука и транспорт. — 2002. — № 2. — С. 12–16.

11. Махутов Н. А., Пермяков В. Н., Аметханов Р. С. и др. Анализ рисков и обеспечение защищённости критически важных объектов нефтегазохимического комплекса. — Тюмень: Тюм. ГНГУ, 2013. — 560 с.

12. Александровская Л. М. [и др.] Безопасность и надёжность технических систем. — М.: Университетская книга, Логос. — 2008. — 378 с.

13. MIL-STD2070 15 April 1983 Military Standart Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis for Aeronaut and ICAL Equipment. Washington, DC, Naval Publications and Form center, 1983, 24 p.

14. Лисенков В. М. Безопасность технических средств в системах управления движением поездов. — М.: Транспорт, 1992. — 160 с.

15. Бочков К. А. Теория и методы контроля электромагнитной совместимости микроэлектронных систем обеспечения безопасности движения поездов / Дис... док. тех. наук. — М.: МИИТ, 1993. — 379 с.

16. Бестемьянов П. Ф. Методика статистического моделирования электромагнитных помех в каналах автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 2–8.

17. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. — М.: ВИНТИ РАН, 1999. — 232 с.

18. Баранов Л. А., Кульба В. В., Шелков А. Б., Сомов Д. С. Индикаторный подход в управлении безопасностью объектов железнодорожного транспорта // Надёжность. — 2018. — Т. 18. — № 2. — С. 34–42.

19. Проневич О. Б., Швед В. Э. Алгоритм расчёта и прогнозирования показателей функциональной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта // Надёжность — 2018. — Т. 18. — № 3. — С. 46–55.

20. Малкин В. С. Надёжность технических систем и техногенный риск. — Ростов н/Д: Феникс, 2010. — 452 с.

21. Сосновский Л. А. Риск. Механотермодинамика необратимых повреждений. — Гомель: БелГУТ, 2004. — 317 с.



Method for Calculating Safety Features of Railway Automation Devices



Konstantin A. BOCHKOV



Dmitry V. KOMNATNIY

Bochkov, Konstantin A., Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus, Gomel.

Komnatniy, Dmitry V., Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus, Gomel.*

ABSTRACT

The problem of quantitative analysis of safety of microelectronic and microprocessor systems of railway automation and telemechanics is considered. The problem remains relevant, since the subject of safety analysis is rarely occurring, but extremely dangerous events. The risk and significance of failure are selected as the main safety features of these systems. The way to identify a failure was chosen according to MIL-STD-1629A standard, as the most adequate. Calculated expressions for significance of a failure are proposed. The probability of a dangerous failure is calculated by the method of model analysis. It is proposed to calculate the probability of a failure further developing into an accident

using scenario analysis methods by constructing event trees. Calculated ratios for ratings of violations are suggested, allowing to compare dangerous failures and emergency sequences developed from a failure. The risk assessment of operation of railway automation systems was selected not related to economic categories, and thus convenient for rationing. It is based on probabilistic concepts of the nature of risk and is calculated using the methods of probability theory. The developed design ratios and models make it possible to analyze performance of the functions of train traffic safety systems by methods common to control systems, at the same time reflecting the features of operation of railway automation.

Keywords: railway, railway automation systems, safety, risk, significance of a failure, ratings of failures, probability of dangerous failure, risk regulation.

*Information about the authors:

Bochkov, Konstantin A. – D.Sc. (Eng), Professor, Scientific Supervisor – Head of the Research Laboratory of Safety and electromagnetic compatibility of technical means of Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus, Gomel, bochkov1999@mail.ru, priemnay@belsut.gomel.by.

Komnatniy, Dmitry V. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Automation of Telemechanics and Communications, D.Sc. student of Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus, Gomel, toe4031@gsu.by.

Article received 17.02.2020, accepted 28.05.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 164.

Successful development and implementation of modern microelectronic and microprocessor railway automation and telemechanics systems (RATS) require quantitative analysis of their safety. This is due to the fact that in such systems, safety conditions of the transportation process are implemented by hardware and software tools. The applied element base has symmetrical failures, the intensity of which is much higher than the failure rate of electromagnetic relays of I class of reliability. In addition, the microelectronic element base has low immunity to electromagnetic interference and, at the same time, operates in a complex electromagnetic environment. Consequently, it becomes impossible to ensure safety of modern RATS through expert assessments, similar to systems built on relays of I class of reliability.

In the published monographs on railway automation [2–4], the most common methods of safety analysis are based on models and representations of the theory of reliability. The theory of reliability has now been widely developed, therefore, attempts to use it to solve new technical problems are natural. The authors of [5–7] follow this path of constructing a safety theory. In safety analysis methods from [2–4], the main value describing safety is the rate of failure. It is assumed that the failure flow is Poisson, and the failure rate is statistically stable. On the basis of this approach, in [8; 9] such safety indicators as mean time to failure, the time the system remains in a state of dangerous failure, and safety factor. It is fairly noted [10] that such methods of safety analysis do not take into account the fact that dangerous failures, accidents and crashes are rare and even unique events. It is also not considered that a combination of several unfavorable circumstances is required for development of a dangerous failure into an accident, which also occurs quite rarely. Reliable determination of intensity of dangerous failures is an independent problem.

In order to take into account rarity of accident events, in [11] it is proposed to consider sections of the probability density distribution laws of quantities characterizing dangerous failures, with large values of these quantities and low probabilities of their occurrence. However, with this approach, the problem arises of determining the parameters and characteristics of distribution laws either

from theoretical considerations or from experience data.

Consequently, development of methods for analyzing safety of RATS is a major scientific and technical problem, an exhaustive solution of which has not yet been obtained. Accordingly, the *objective* of this work is further development of methods for analyzing safety of RATS.

Results.

To achieve the stated objective, it is required, first of all, to introduce the basic values that characterize the safety property of RATS. In [12] it is indicated that such values in the theory of safety of control systems for responsible technological processes are associated with risk and significance of a failure. General methods for determining these values are also presented there. With regard to RATS, based on [12], the below described modification of such methods for quantitative calculations of significance of a failure and a risk, as well as methods for rating analysis of safety violations and risk regulation, can be proposed.

The most adequate definition of significance of a failure C is given in the methodology of MIL-STD-1629A standard. Although this standard has been officially canceled and replaced by MIL-STD-2070 standard, its methods and models continue to be widely used in safety analysis of critical technical systems, in particular, regarding aircrafts [1; 12; 13]. In these standards, significance of a failure is defined as the probability of an initial dangerous failure developing into an emergency:

$$C = P(I_0) \cdot P(E/I_0), \quad (1)$$

where $P(I_0)$ is probability of a failure;

$P(E/I_0)$ is probability of a dangerous failure developing into an emergency.

This definition takes into account that not every dangerous failure entails an emergency; for development of an emergency, a combination of several unfavourable circumstances must occur. This confluence is rare. Consequently, the above definition of significance of a failure eliminates the aforementioned drawback of existing methods of safety analysis.

The significance of a failure has the mathematical meaning of probability of an emergency due to a given dangerous failure, therefore, its regulation should be carried out in accordance with GOST R MEC61508-2-2012 standard, which establishes SIL levels and the corresponding values of probabilities of a



dangerous failure of a safety function. In particular, the safety level of SIL 4 has been set for railway automation systems in accordance with GOST 33894-2016.

The probability of a dangerous failure based on [14] is determined according to the formula $P(I_0) = P_{hw}(T_{mi}) P_{sw}(T_{mi}) P_{op}(T_{mi}) P_{emd}(T_{mi})$, (2) where P_{hw} is probability that time t from the moment the train enters the route until the moment when RATS equipment fails is not less than the time the train stays on the route;

P_{sw} is probability that time t from the moment the train enters the route until the moment of failure of the software and mathematical support of RATS is not less than the time the train stays on the route;

P_{op} is probability that the time t from the moment the train enters the route until the moment of failure of RATS operator is not less than the time the train stays on the route;

P_{emd} is probability that the time t from the moment the train enters the route until the moment when RATS equipment fails under the influence of electromagnetic interference is not less than the time the train stays on the route;

T_{mi} is time of train staying on the route, s.

The probabilities P_{hw} , P_{sw} , P_{op} are calculated according to the formulas:

$$P_{hw}(T_{mi}) = \exp \left[-T_{mi} \sum_{m=1}^{m_0} \lambda_m (1 - v_m) \right], \quad (3)$$

$$P_{sw}(T_{mi}) = \exp \left[-a T_{mi} \sum_{m=1}^{m_0} \lambda_m \right], \quad (4)$$

$$P_{op}(T_{mi}) = \exp \left[-T_{mi} \sum_{m=1}^{m_0} \lambda_m (1 - v_m) \right], \quad (5)$$

where λ is intensity of failures 1/s;

v is coefficient that takes into account parrying of a dangerous failure by self-control devices [14];

a is coefficient taking into account software stay in a passive state;

m_0 is the number of possible failures.

The characteristics of electromagnetic interference affecting RATS are of a probabilistic nature [15]. Experimental studies of laws of probability density distribution of characteristics of electromagnetic interference have been repeatedly undertaken [15; 16]. Therefore, it is rational to calculate the probability of a failure of RATS equipment under the influence of electromagnetic interference on the basis of the well-known «load–stability» model [15]:

$$P_{emd} = \int_0^{\infty} f_N(U) F_R(U) dU, \quad (6)$$

where U is interference voltage, V;

$f_N(U)$ is probability density function of the interference level distribution;

$F_R(U)$ is function of the probability of the interference immunity level of RATS equipment.



The probability of a dangerous failure developing into an accident is determined by analyzing the trees of events of emergency sequences according to [12; 17]. Also, the problem of calculating the probability of a dangerous failure developing into an accident is solved in [18; 19]. Thus, when calculating the probability of a dangerous failure developing into an accident, scenario analysis is carried out, and specific ways of accident emergence are considered. When calculating the probability of a dangerous failure, a model analysis of a dangerous failure is carried out on the basis of models to calculate the probability of failures caused by various reasons. These stages of safety analysis of control systems of critical technological processes, including RATS, are mandatory [11].

For a comparative analysis of safety violations, the concepts of ratings of violations are introduced [12].

The rating $R = \sum_{i=1}^L Q_i$ reflects the probability of a given dangerous failure development for all L emergency sequences.

The maximum rating $R_{max} = \max(Q_i)$ reflects the probability of the most probable emergency sequence for a given dangerous failure.

The average rating $R_{mdl} = R/L$ reflects the probability of development of all possible emergency sequences for this dangerous failure.

The final stage in analysis of safety of control systems for critical technological processes, including RATS, is assessment of the operating risk. When assessing risk, it is desirable not to use economic categories and «political» considerations [20], but to obtain a numerical estimate that is convenient for rationing. Such an estimate was proposed in [21] and is carried out according to the formula:

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{P_{mjf}} - 1}, \quad (7)$$

where P_{mjf} is probability of equipment failure.

Since the significance of a failure has the mathematical meaning of the probability of an emergency due to a given dangerous failure, in relation to safety analysis method considered in the article, expression (7) is transformed into:

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{C} - 1}, \quad (8)$$

where C is significance of a failure.

In [21], the boundary values of risk are substantiated, which determine the areas of normal and emergency operation of the technical system and make it possible to normalize the risk values during operation of RATS:

- $0 < \rho < 1$ – limited safety;
- $\rho = 1$ – critical state, presence of failures;
- $\rho > 1$ – dangerous state, threat of an accident;
- $\rho \gg 1$ – transcendental state, threat of a catastrophe.

Conclusions.

So, the article formulates a method for analyzing safety of RATS, the ratios for calculating the values that characterize safety of RATS are described, a scenario and model analysis of safety of RATS are also suggested.

The distinctive features of the proposed method are:

1. The main initiating events that can lead to defects in train operation, accidents, crashes are considered: hardware failures due to limited reliability of the element base, errors in software and mathematical support, operator errors, exposure to electromagnetic interference.

2. The non-additivity of factors influencing the dangerous failure, criticality of the combination of factors and other aspects of development of a dangerous failure into an emergency situation are considered.

3. Development of an emergency is characterized by parameters that can be easily determined in operational practice. The general flow of dangerous failures and the probability density distribution in the region of distribution tails are not used since their assessment is complicated by rarity of the corresponding events.

4. Safety and risk indicators allow to carry out standardization without involving economic categories, to reasonably compare emergency sequences in terms of safety, considering the most probable, probable and average. Possible initiating events and paths of transition to an accident and a possible final event are also taken into account.

5. Rarity and even uniqueness of the emergency does not affect the choice of mathematical description; emergency situations are taken into account in the event tree.

6. The method of analysis is used, which is common for control systems of responsible technological processes, scenario and model risk analysis is carried out, which is necessary for all technical systems.

7. The probabilities of initiating events are calculated according to well-tested methods of the theory of reliability, characteristics of emergency situations are calculated with the specific adequate methods of safety theory.

8. The principle of decision making on the basis of facts is implemented [10].

It is obvious that all the advantages of the method proposed in the article and the difficulties of safety analysis solved by it are directly applied to the issues of operation of RATS, ensuring functional safety of these systems. At the same time, further development of the theory of RATS is carried out based on the already achieved level [14; 17].

Therefore, it is permissible to conclude that the results of this article can be used to prove safety of modern microprocessor and microelectronic RATS, which is an urgent scientific and practical task and a necessary stage in development and implementation of such systems.

REFERENCES

1. MIL-STD1629A 24 November 1980 Military Standard Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. Washington, DC, Department of Defense; Washington, DC: Department of defense, 1980, 25 p. [Electronic resource]: <https://www.fmea-fmeca.com/milstd1629.pdf>. Last accessed 27.03.2020.
2. Sapozhnikov, V. V., Elkin, B. N., Kokurin, I. M. [et al]. Station automation and telemechanics systems: Textbook [Stantsionnye sistemy avtomatiki i telemekhaniki: Uchebnik]. Ed. by V. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport publ., 1997, 432 p.
3. Andres, E., Dolgiy, I. [et al]. Automation and telemechanics systems on the world's railways: Study guide [Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznnykh dorogakh mira: Ucheb. posobie] [Trans. from English]. Ed. by T. Tega and S. Vlasenko. Moscow, Intekst publ., 2010, 496 p.
4. Sapozhnikov, V. V. [et al]. Certification and safety proof of railway automation systems [Sertifikatsiya i dokazatelstvo bezopasnosti sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki]. Ed. by V. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport publ., 1997, 288 p.
5. Shubinsky, I. B., Novozhilov, E. O. Method of standardization of indicators of reliability of railway transport facilities [Metod normirovaniya pokazatelei nadezhnosti ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta]. *Nadezhnost'*, 2019, Vol. 19, Iss. 4, pp. 17–23.
6. Shubinsky, I. B., Zamyshlyayev, A. M., Pronevich, O. B. A graph method for assessing industrial safety at railway transport facilities [Grafyoviy metod otsenki proizvodstvennoi bezopasnosti na ob'ektakh zheleznodorozhnogo transporta]. *Nadezhnost'*, 2017, Vol. 17, Iss. 1, pp. 40–45.

7. Makoveev, O. L., Kostyunin, S. Yu. Assessment of safety parameters and reliability of monitoring and control systems [Otsenka parametrov bezopasnosti i bezotkaznosti sistem kontrolya i upravleniya]. *Nadezhnost'*, 2017, Vol. 17, Iss. 1, pp. 46–52.

8. Braband, J. A practical guide to safety analysis methods. SIGNAL + DRAHT, 2001, Vol. 93, No. 9, pp. 41–44.

9. Braband, J., Lennartz, A. Systematic Process for the Definition of Safety Targets for Railway Signalling Applications. SIGNAL + DRAHT, 1999, No. 9, pp. 53–57.

10. Negrei, V. Ya. Development of methods for assessing safety of the transportation process in railway transport [Razvitiye metodov otsenki bezopasnosti perevoznogo protsessa na zheleznodorozhnom transporte]. *Bulletin of BelSUT. Science and transport*, 2002, Iss. 2, pp. 12–16.

11. Makhutov, N. A., Permyakov, V. N., Ametkhanov, R. S. [et al]. Risk analysis and security of critical objects of the petrochemical complex [Analiz riskov i obespechenie zashchishchennosti kriticheskikh vazhnykh ob'ektov neftegazokhimicheskogo kompleksa]. Tyumen, Tyum. SNSU, 2013, 560 p.

12. Aleksandrovskaya, L. M. [et al]. Safety and reliability of technical systems [Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh sistem]. Moscow, University book, Logos, 2008, 378 p.

13. MIL-STD2070 15 April 1983 Military Standard Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis for Aeronaut and ICAL Equipment. Washington, DC, Naval Publications and Form center, 1983, 24 p.

14. Lisenkov, V. M. Safety of technical means in train traffic control systems [Bezopasnost' tekhnicheskikh sredstv v sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov]. Moscow, Transport publ., 1992, 160 p.

15. Bochkov, K. A. Theory and methods of control of electromagnetic compatibility of microelectronic systems for ensuring safety of train traffic. D.Sc. (Eng) thesis [Teoriya i metody kontrolya elektromagnitnoi sovmestimosti mikroelektronnykh sistem obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov. Dis... doc. tekhn. nauk]. Moscow, MIIT publ., 1993, 379 p.

16. Bestemyanov, P. F. Methods of statistical modelling of electromagnetic interference in the channels of automation and telemechanics on railway transport [Metodika staticheskogo modelirovaniya elektromagnitnykh pomekh v kanalakh avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte]. *Elektrotehnika*, 2016, Iss. 9, pp. 2–8.

17. Lisenkov, V. M. Statistical theory of train traffic safety [Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poezdov]. Moscow, VINITI RAS, 1999, 232 p.

18. Baranov, L. A., Kulba, V. V., Shelkov, A. B., Somov, D. S. Indicator approach in safety management of railway transport facilities [Indikatornyi podkhod v upravlenii bezopasnostyu ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta]. *Nadezhnost'*, 2018, Vol. 18, Iss. 2, pp. 34–42.

19. Pronevich, O. B., Shved, V. E. Algorithm for calculating and predicting indicators of functional safety of power supply systems for railway transport [Algoritmy rascheta i prognozirovaniya pokazatelei funktsionalnoi bezopasnosti sistem elektroobrazovaniya zheleznodorozhnogo transporta]. *Nadezhnost'*, 2018, Vol. 18, Iss. 3, pp. 46–55.

20. Malkin, V. S. Reliability of technical systems and technogenic risk [Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk]. Rostov-on-Don, Phoenix publ., 2010, 452 p.

21. Sosnovsky, L. A. Risk. Mechanothermodynamics of irreversible damage [Risk. Mekhanotermodinamika neobratimyykh povrezhdeniy]. Gomel, BelSUT, 2004, 317 p. ●





Обеспечение безопасности при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры



Светлана ШВЕЦОВА



Алексей ШВЕЦОВ

*Швецова Светлана Валерьевна – Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия.
Швецов Алексей Владиславович – Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Россия; Северо-Восточный федеральный университет, Якутск, Россия*.*

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), также известные как дроны или беспилотники, получают всё большее практическое применение в современном обществе, в том числе как инструменты реализации концепций «умного города», «умного здравоохранения», «умной индустрии», Интернета вещей, 3D-картографии, цифрового транспорта. Но, в настоящий момент, применение БПЛА на определённых объектах, в том числе и транспортной инфраструктуры (ОТИ), в первую очередь, в аэропортах, невозможно в силу существующих ограничений, вызванных угрозами безопасности, возникающими при полёте БПЛА.

Авторами в данной работе была поставлена цель предложить решение, позволяющее начать эксплуатацию беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры, в настоящий момент закрытых для полётов БПЛА.

Для достижения цели работы, с применением анализа и синтеза, сравнения и обобщения, сформулированы факторы и условия безопасного применения БПЛА на ОТИ, с учётом которых разработаны метод повышения безопасности движения

беспилотных летательных аппаратов и реализующая его система контроля маршрутов беспилотных летательных аппаратов.

Предложенная система делает возможным безопасно применять БПЛА на ОТИ за счёт ограничения зоны их полёта строго в обозначенном коридоре, что позволяет исключить угрозу столкновения БПЛА с другими транспортными средствами (ТС), эксплуатируемыми на ОТИ, опасными элементами ОТИ, людьми и т.д.

Для функционирования системы не требуется электроэнергия, что позволяет внедрять систему без создания вспомогательной энергообеспечивающей инфраструктуры.

Практическое применение предложенной системы и, как следствие, внедрение большего количества возможностей, возникающих при применении БПЛА, способно генерировать на объектах транспорта принципиально новые технологические процессы и структуры, что является одним из направлений создания транспортной инфраструктуры следующего поколения, основанной на IoT и искусственном интеллекте.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, БПЛА, объект транспортной инфраструктуры, безопасность, обеспечение безопасности.

*Информация об авторах:

Швецова Светлана Валерьевна – аспирант Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, transport-safety@mail.ru.

Швецов Алексей Владиславович – доцент Владивостокского государственного университета экономики и сервиса (ВГУЭС), Владивосток, Россия, доцент Северо-Восточного федерального университета (СВФУ), Якутск, Россия, zit-otb@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 01.03.2020, принята к публикации 21.04.2020.

For the English text of the article please see p. 182.

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), также известные как дроны или беспилотники, получают всё большее практическое применение в современном обществе, в том числе при реализации таких приложений, как «умный город», «умное здравоохранение», «умные индустрии» [1–5]. Кроме того, «беспилотники и Интернет вещей (IoT) совместно помогают развивать безопасность, 3D-картографию, транспорт и др.» [6]. Но, в настоящий момент, «распространение возможностей, предоставляемых технологиями и методами, связанными с беспилотными летательными аппаратами, сдерживается существующими ограничениями по применению БПЛА на определённых объектах» [7], в числе которых и отдельные объекты транспортной инфраструктуры (ОТИ), в первую очередь, аэропорты.

В настоящее время применение беспилотных летательных аппаратов на отдельных объектах транспорта, в первую очередь, в аэропортах, законодательно запрещено во многих странах мира [7], включая Россию, сделано это из-за угроз безопасности, возникающих при полёте БПЛА. К таким угрозам относятся аварии и чрезвычайные ситуации (ЧС) [8], которые могут возникнуть при столкновении БПЛА с транспортными средствами, эксплуатируемыми на ОТИ, опасными грузами, находящимися на объекте, или опасными техническими элементами объекта транспортной инфраструктуры. К опасным техническим элементам можно отнести технические установки и системы, в которых применяются легковоспламеняемые и химически-опасные вещества, системы энергообеспечения, системы управления движением и т.д.

Риск столкновения БПЛА с другими транспортными средствами или элементами ОТИ может быть расценён как невысокий [7; 9; 15], однако последствия такой аварии, согласно исследованиям [10–14], могут быть достаточно серьёзными, особенно если учитывать, «что вес профессиональных дронов уже сейчас достигает десятков килограммов, при этом некоторые модели дронов работают на жидком горючем топливе» [15]. Так, топливный бак турбореактивного дрона

AB5 JetQuad [16], разработанного компанией FusionFlight (США), вмещает 19 литров дизельного топлива. AB5 JetQuad способен перевозить груз весом 18 кг, сам беспилотник весит 23 кг, в результате суммарный вес заправленного дрона AB5 JetQuad, перевозящего груз, будет достигать 60 кг.

В ближайшее время планируется начало серийного производства гражданских грузовых дронов нового поколения с грузоподъёмностью уже в сотни килограмм. В качестве примера таких летательных аппаратов можно привести грузовой БПЛА «вертолётного» типа модели «CAV», разработанный компанией Боинг [17], способный перевозить грузы массой до 227 килограммов. «CAV имеет в длину 6,1 м, в ширину 5,3 м, в высоту 1,5 м, и массу 498,9 килограмм» [17].

В современных условиях решение проблемы обеспечения безопасности полётов беспилотных летательных аппаратов невозможно без создания соответствующего методологического и технологического аппарата. При формировании теории и методов обеспечения безопасности полётов БПЛА необходимо применять комплексный подход, включающий совместное рассмотрение результатов научных исследований и потребностей практики, в целях обеспечения безопасности как эксплуатируемых беспилотных летательных аппаратов, так и объектов транспортной инфраструктуры, на которых они применяются.

Цель настоящего исследования — разработка метода повышения безопасности движения беспилотных летательных аппаратов и технического решения, его реализующего, совместно позволяющих создать необходимые условия для снятия существующих ограничений по применению БПЛА на ОТИ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения поставленной цели, по мнению авторов, первоначально необходимо сформулировать факторы, влияющие на безопасность при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры, а также выработать перечень условий безопасного применения БПЛА на ОТИ.



ФАКТОРЫ И УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА НА ОТИ

Основные факторы, влияющие на безопасность при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры, можно разделить на четыре группы.

1. Инфраструктурные факторы:

- близость путей движения других транспортных средств. Воздушные коридоры, выделенные для движения БПЛА, не должны пересекаться в одной плоскости с путями (коридорами) движения других ТС эксплуатируемых на ОТИ;

- минимальное количество свободного пространства для маневрирования. Пространство для маневрирования БПЛА на ОТИ ограничено существующими путями движения других ТС, а также зданиями, сооружениями и коммуникациями, имеющимися на ОТИ.

2. Технологические факторы:

- на ОТИ применяется ряд типов оборудования, в технологическом процессе которого применяются радиоканалы. БПЛА — это летательный аппарат, управление которым, осуществляется дистанционно по радиоканалу. В связи с этим необходимо учитывать риск сбоя в управлении БПЛА из-за воздействия других радиосигналов;

- на ряде ОТИ применяется оборудование, генерирующее радиопомехи. При планировании путей для передвижения БПЛА необходимо учитывать, что на пути движения БПЛА не должно быть участков с таким уровнем радиопомех, при котором возможны сбои в управлении летательным аппаратом.

3. Нормативно-правовые факторы:

- владелец беспилотного летательного аппарата несёт ответственность за нанесение БПЛА ущерба третьим лицам. При выборе маршрута движения БПЛА необходимо учитывать возможный риск столкновения не только с транспортными средствами или элементами ОТИ, но и с людьми, находящимися на объекте;

- владелец беспилотного летательного аппарата обязан осуществлять установленные законом регистрационные действия и получать необходимые разрешения. Графики и режимы движения БПЛА

должны быть согласованы с контролирующими органами.

4. Факторы риска несанкционированного вмешательства и воздействий:

- существует риск дистанционного перехвата управления беспилотным летательным аппаратом. В настоящий момент не существует инструмента гарантированной защиты канала управления БПЛА от несанкционированного вмешательства и воздействий со стороны нарушителя [18]. Необходимо учитывать риск перехвата управления летательным аппаратом, в том числе и с целью применения БПЛА для совершения акта незаконного вмешательства на ОТИ [19];

- гражданские БПЛА не имеют защиты от внешнего физического воздействия. Необходимо учитывать, что БПЛА легко может быть повреждён, к примеру, небольшим предметом, брошенным в его сторону нарушителем. При планировании путей и инфраструктуры для передвижения БПЛА необходимо учитывать, что БПЛА должны быть недоступны для прямого физического воздействия со стороны нарушителя.

Обобщение факторов, влияющих на безопасность при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры, позволяет сформулировать три основополагающих условия безопасного применения БПЛА на ОТИ:

- 1) зона возможного передвижения БПЛА должна находиться в границах выделенного воздушного коридора. Данное условие обусловлено тем, что в настоящее время нет защиты от угрозы неконтролируемого изменения траектории полёта БПЛА. «Смена траектории может произойти как вследствие ошибок оператора» [13], так и умышленного несанкционированного вмешательства и воздействий со стороны нарушителя, включая дистанционный перехват управления БПЛА. Кроме того, существует угроза потери управления над БПЛА при возникновении в нём технических неисправностей, после чего БПЛА также может изменить траекторию и столкнуться с другими транспортными средствами, эксплуатируемыми на ОТИ, опасными элементами ОТИ или людьми;

2) допустимо применение БПЛА только «вертолётного» типа. Возможность применения только такого типа БПЛА обусловлена тем, что БПЛА других типов, в первую очередь «самолётного», могут передвигаться с высокой скоростью и не предназначены для маневрирования в пределах ограниченных застроенных территорий;

3) допустимо применение БПЛА только с электрическими двигателями. Требование по применению данного вида тяги обусловлено тем, что аварии с участием «жидкотопливных» БПЛА имеют риск более тяжёлых последствий из-за возможного возгорания жидкого топлива, находящегося на борту.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Проблема безопасности движения беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры непосредственно связана с устойчивостью границ выделенного (для полётов БПЛА) воздушного коридора (ВВК), при выходе из которых БПЛА может столкнуться с другими наземными/воздушными ТС, элементами ОТИ или людьми, находящимися на ОТИ.

Устойчивость границ выделенного воздушного коридора, — состояние, при котором полёт БПЛА (от точки взлёта до точки посадки) возможен только в границах ВВК.

Обеспечение такой устойчивости возможно на основе создания условий блокирования рассматриваемого объекта в выделенном для его передвижения воздушном коридоре, что позволит предотвратить аварийные ситуации, связанные с выходом объекта из границ выделенного воздушного коридора. Технически данная задача сводится к предотвращению возможности пересечения БПЛА границ ВВК.

При такой постановке задачи представляется целесообразным обеспечить постоянную связь БПЛА с несвободной точкой (НТ), расположенной в центре окружно-

сти ВВК и ограниченной в передвижении осью ВВК.

При этом полученная связь должна ограничивать расхождение рассматриваемых объектов на расстояние, превышающее длину радиуса ВВК за вычетом длины БПЛА и $\frac{1}{2}$ длины НТ, что позволит обеспечить физическое сдерживание БПЛА в границах ВВК.

Для практической реализации предложенного метода повышения безопасности движения беспилотных летательных аппаратов авторами разработана система контроля маршрутов беспилотных летательных аппаратов (далее — СКМ).

СКМ позволяет обеспечить безопасное применение БПЛА на ОТИ за счёт ограничения зоны передвижения БПЛА строго в выделенном воздушном коридоре. При разработке СКМ были учтены все сформулированные условия безопасного применения БПЛА на ОТИ.

ОПИСАНИЕ СКМ

Принцип работы предлагаемой системы заключается в том, что беспилотный летательный аппарат не может выйти за пределы выделенного для его передвижения воздушного коридора. Данное ограничение достигается за счёт того, что БПЛА крепится удерживающим тросом к подвижной платформе, установленной на монорельс, проложенный по заданному маршруту движения БПЛА. При этом БПЛА сохраняет возможность полёта, но зона его передвижения ограничена траекторией монорельса и длиной удерживающего троса.

Детальная конструкция разработанной системы показана на рис. 1.

СКМ состоит из следующих элементов: подвижной платформы 1, установленной на монорельс 2; удерживающего троса 3, одним концом прикреплённого к креплению 4, установленному на подвижной платформе; вторым концом трос прикреплён к аналогичному креплению, устанавливаемому на БПЛА (на рис. 1 не показано).

Крепление БПЛА к СКМ обеспечивается удерживающим тросом. Оптимальным является применение спиринного удерживающего троса, такой трос



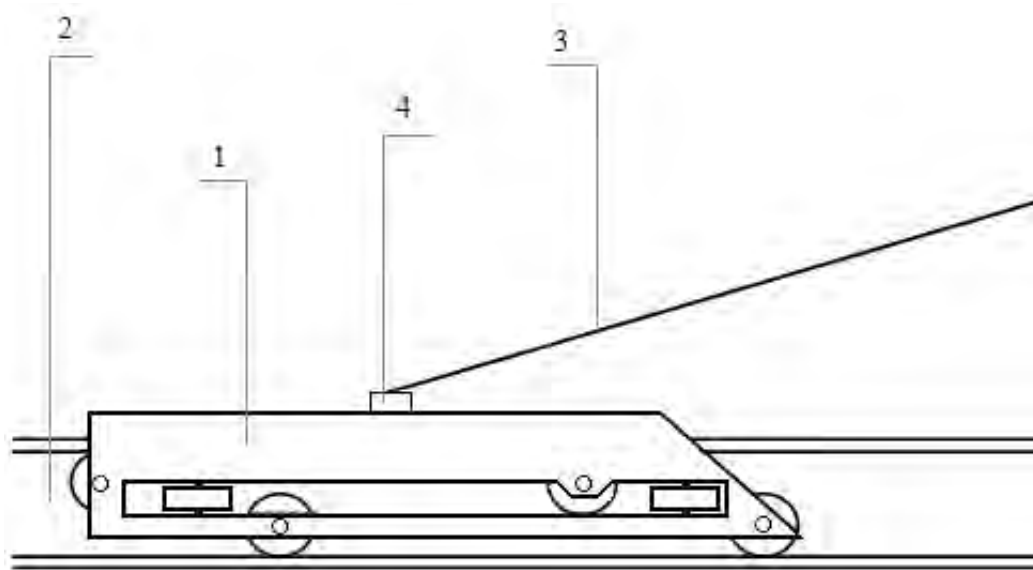


Рис. 1. Система контроля маршрутов беспилотных летательных аппаратов.

имеет минимальный провис, что снижает угрозу его зацепления за различные окружающие предметы во время полёта БПЛА.

Базовый элемент СКМ – подвижная платформа (элемент 1 рис. 1), спроектирована таким образом, чтобы создавать минимальный тормозящий эффект при полёте БПЛА. Достигается это за счёт двухосного расположения колёс платформы. Всего платформа имеет 12 колёс, основой которых являются роликовые подшипники.

Детальная конструкция подвижной платформы показана на рис. 2.

Подвижная платформа состоит из следующих элементов: корпуса 1, имеющего по бортам отверстия 2; восьми горизонтально расположенных осей 3, на которых установлены четыре нижних колеса 4 и четыре верхних колеса 5; четырёх вертикально расположенных осей 6, на которых установлены четыре боковых колеса 7. Материал корпуса подвижной платформы – алюминиевый сплав АД31.

Подвижная платформа устанавливается на монорельс (элемент 2 рис. 1).

Конструкция подвижной платформы позволяет ей двигаться по монорельсу как

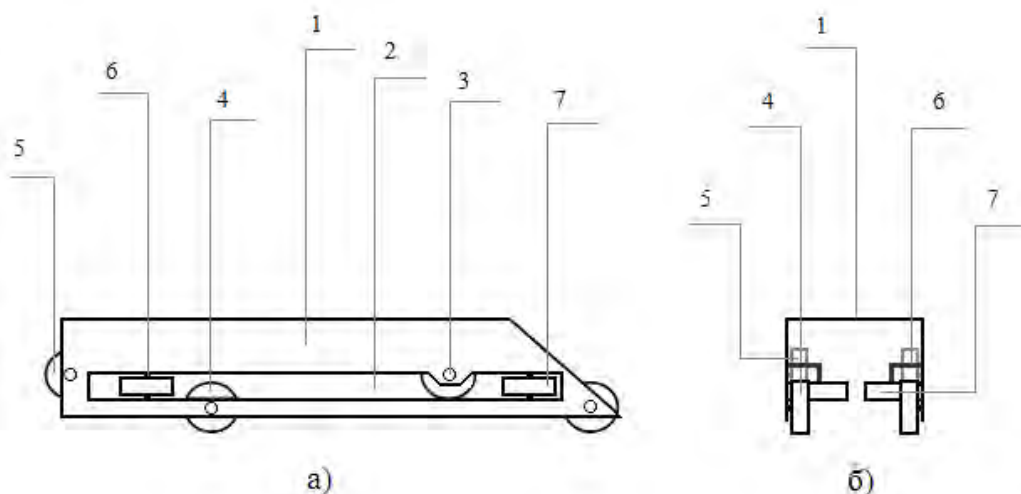


Рис. 2. Подвижная платформа: а) вид слева; б) вид спереди.

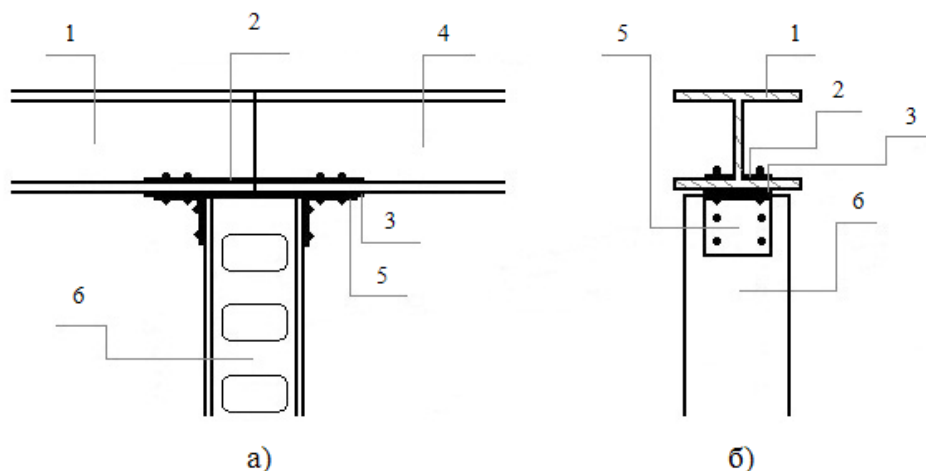


Рис. 3. Монорельс в комплекте с опорой-кронштейном: а) вид слева, б) вид спереди.

по направлению вперёд, так и по направлению назад.

Монорельс прокладывается по установленному маршруту движения БПЛА. Собирается монорельс из отдельных секций, количество которых определяется проектной длиной монорельса. Устанавливается монорельс на опорах-кронштейнах, закрепляемых, в свою очередь, на подходящих внешних объектах, например, зданиях или сооружениях, расположенных по пути прокладки монорельса, либо на специально установленных в грунт винтовых сваях.

Детальная конструкция монорельса показана на рис. 3.

Секция монорельса 1 крепится продольным верхним крепежом 2 и продольным нижним крепежом 3 к соседней секции монорельса 4 и угловым крепежом 5 к опоре-кронштейну 6. Материал монорельса — алюминиевый сплав АД31.

УСЛОВИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СКМ

На одном монорельсе одновременно может эксплуатироваться как одна подвижная платформа, так и группа платформ. К каждой подвижной платформе может прикрепляться только один БПЛА.

При эксплуатации группы подвижных платформ на одном монорельсе их движение может осуществляться только в одном выбранном направлении с безопасным интервалом между ними, это необходимо для предотвращения столкновений БПЛА.

Безопасный интервал (S_{int}) определяется по формуле:

$$S_{int} = T_{res} + B_{dis} + L_{hc} \cdot 2, \quad (1)$$

где T_{res} — дистанция, проходимая БПЛА с момента обнаружения оператором препятствия на пути движения БПЛА и до момента применения оператором экстренного торможения;

B_{dis} — тормозной путь, проходимый БПЛА при экстренном торможении;

L_{hc} — длина удерживающего троса.

Формула 1 позволяет рассчитать безопасный интервал для заданной скорости движения БПЛА, для этого в показатели T_{res} и B_{dis} подставляются их значения при рассматриваемой скорости.

ОГРАНИЧЕНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ

Система СКМ применима в приложениях, предусматривающих движение БПЛА по определённому маршруту.

Система контроля маршрутов беспилотных летательных аппаратов применима на наземных объектах транспортной инфраструктуры.

Система СКМ предназначена для работы с БПЛА «вертолётного» типа, вертикального взлёта и посадки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ

Натурный эксперимент проводился путём 15 минутного полёта БПЛА, прикрепленного удерживающим тросом к подвижной платформе, установленной на



Разработки, предусматривающие применение привязных БПЛА

Разработчик	Максимальная высота полёта дрона	Время непрерывного полёта дрона
Equinox Systems [20]	150 м	30 дней
TDS [21]	120 м	неограниченно
Aria Insights [22]	120 м	неограниченно
Elistair [23]	80 м	10 часов

монорельсе. Скорость и высота полёта, расположение БПЛА относительно монорельса, а также сила натяжения троса периодически изменялись оператором. В результате эксперимента установлено, что СКМ обеспечивает ограничение зоны передвижения БПЛА в границах выделенного воздушного коридора, при этом крепление БПЛА к системе не оказывает заметного влияния на управляемость и скорость БПЛА.

НАПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данное исследование развивается авторами в двух направлениях.

Первое направление – это разработка технологии, позволяющей оператору системы управлять БПЛА посредством проводной, а не радиосвязи. При этом в качестве проводной линии для передачи данных будет служить монорельс и далее удерживающий трос, крепящий БПЛА к подвижной платформе. Данный способ управления БПЛА позволит защитить канал управления БПЛА от сбоев, вызываемых радиопомехами, а также обеспечит защиту от дистанционного перехвата управления БПЛА нарушителем, что понизит уязвимость системы для несанкционированного вмешательства и воздействий.

Второе направление – это разработка технологии дистанционного энергообеспечения БПЛА, работающих с СКМ. При этом в качестве линии для передачи электроэнергии будет служить монорельс и далее удерживающий трос. Данный способ энергообеспечения позволит БПЛА работать практически в непрерывном режиме, а также повысит их грузоподъемность за счёт возможности применения более мощных электродвигателей. Дистанционное энергообеспечение беспилотных летательных аппаратов позволит создавать протяжённые системы маршрутно-зональ-

ного полёта БПЛА как на уровне городов, так и регионов с возможностью их последующей интеграции. Внедрение систем такого уровня позволит формировать в будущем глобальные логистические схемы доставки грузов, в которых в качестве средств доставки будут выступать грузовые БПЛА.

СРАВНЕНИЕ С РЕШЕНИЯМИ, ИЗВЕСТНЫМИ В МИРЕ

В настоящий момент в мире известен ряд разработок, предусматривающих использование привязных БПЛА (табл. 1).

Принципиальным отличием решений, описанных в табл. 1, от предлагаемой системы является то, что в них БПЛА, прикрепленный тросом к наземной стационарной базе, после взлёта и достижения заданной высоты находится в статичном состоянии и используется как платформа для размещения оборудования, например, предназначенного для передачи сигнала 3G/4G/5G с целью обеспечения покрытия сотовой связи на территориях ЧС до восстановления повреждённых вышек сотовой связи. Маршрутный полёт БПЛА в описанных решениях невозможен. Дополнительным отличием рассматриваемых решений от предложенной системы является то, что они предназначены для дистанционного электропитания БПЛА, информация о том, проводились или нет исследования на предмет того, способны ли данные решения обеспечить сдерживание БПЛА, отсутствует, что не позволяет рассматривать данные решения как средство обеспечения безопасности полётов БПЛА.

ВЫВОДЫ

В настоящем исследовании разработан метод повышения безопасности движения беспилотных летательных аппаратов и реализующая его система контроля маршрутов

беспилотных летательных аппаратов. Внедрение системы решает задачу обеспечения безопасности при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры, что, в свою очередь, позволяет снять существующие ограничения по применению БПЛА на ОТИ в части беспилотных летательных аппаратов, применяемых совместно с пред-
ложенной системой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alsamhi, S. H., Ma, O., Ansari, M. S., Gupta, S. K. Collaboration of Drone and Internet of Public Safety Things in Smart Cities: An Overview of QoS and Network Performance Optimization. *Drones*, 2019, Vol. 3, No. 1, p. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones3010013>.
2. Amukele, T. K., Hernandez, J., Snozek, C. L. H., Wyatt, R. G., Douglas, M., Amini, R., Street, J. Drone Transport of Chemistry and Hematology Samples Over Long Distances. *American Journal of Clinical Pathology*, 2019, Vol. 148 (5), pp. 427–435. DOI: 10.1093/ajcp/aqx090.
3. Faramondi, L., Oliva, G., Ardito, L., Crescenzi, A., Caricato, M., Tesei, M., Muda, A., Setola, R. Use of Drone to Improve Healthcare Efficiency and Sustainability. MIPRO 2019, 42nd International Convention, Opatjia, Croatia, 20–24 May, 2019. SSRCI – Smart, Sustainable and Resilient Cities and Infrastructures. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Gabriele_Oliva/publication/334521353_Use_of_Drone_to_Improve_Healthcare_Efficiency_and_Sustainability/links/5d2f4e4d92851cf4408cc008/Use-of-Drone-to-Improve-Healthcare-Efficiency-and-Sustainability.pdf. Доступ 21.01.2020.
4. Lievin, B. A., Bugaev, A. S., Ivashov, S. I., Razevig, V. V. Distantly piloted aircrafts and the track security. *World of Transport and Transportation*, 2013, Vol. 11, No. 2, pp. 152–157. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/354/610>. Доступ 21.01.2020.
5. Innovative applications of drones for ensuring safety in transport. Horizon 2020 Website. [Электронный ресурс]: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/mg-2-8-2019>. Доступ 21.01.2020.
6. Goodchild, A., Toy, J. Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO₂ emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, Vol. 61, pp. 58–67. DOI: 10.1016/j.trd.2017.02.017.
7. Huttunen, M. T. Drone Operations in the Specific Category: A Unique Approach to Aviation Safety. *The Aviation & Space Journal*, 2019, Vol. 18, No. 2, pp. 2–21. [Электронный ресурс]: <http://www.aviationspacejournal.com/wp-content/uploads/2019/08/The-Aviation-Space-Journal-Year-XVIII-April-July-2019-1.pdf>. Доступ 17.02.2020.
8. Unmanned Aircraft Systems Advisory Group (UAS-AG). Официальный сайт ICAO. [Электронный ресурс]: [https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-\(UAS-AG\).aspx](https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-(UAS-AG).aspx). Доступ 17.02.2020.
9. Dourado, E., Hammond, S. Do Consumer Drones Endanger the National Airspace? Evidence from Wildlife Strike Data. Mercatus Center, George Mason University, Arlington and Fairfax, Virginia, March 2016. [Электрон-

ный ресурс]: <https://www.mercatus.org/system/files/Dourado-Wildlife-Strikes-MOP-v2.pdf>. Доступ 17.02.2020.

10. Small remotely piloted aircraft systems (drones): Mid-air collision study. Report by QinetiQ, Natural Impacts commissioned by the Department for Transport, the Military Aviation Authority and British Airline Pilots' Association, 2016. [Электронный ресурс]: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/628092/small-remotely-piloted-aircraft-systems-drones-mid-air-collision-study.pdf. Доступ 01.02.2020.
11. Schroeder, K., Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS ingestion into high-bypass engines. Part II: Drone parametric study. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017. DOI: 10.2514/6.2017-0187.
12. Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS Ingestion into High-Bypass Engines. Part I: Bird vs. Drone. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017. DOI: 10.2514/6.2017-0186.
13. Wild, G., Murray, J., Baxter, G. Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters. *Aerospace*, 2016, Vol. 3, Iss. 3, pp. 22–32. [Электронный ресурс]: https://miningquiz.com/pdf/Drone_Safety/Aerospace-Drons_UAV_txt.pdf. Доступ 01.02.2020.
14. Altawy, R., Youssef, A. M. Security, Privacy, and Safety Aspects of Civilian Drones: A Survey. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2016, Vol. 1, Iss. 2, Article No. 7, pp. 1–25. DOI: 10.1145/3001836.
15. Shvetsova, S. V., Shvetsov, A. V. Safety analysis for the transport of goods by unmanned aerial vehicles. *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 5, pp. 286–297. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-286-297>.
16. Coxworth, B. Jet-powered VTOL drone is like a quadcopter on steroids. *New Atlas*. [Электронный ресурс]: <https://newatlas.com/drones/ab5-jetquad-jet-powered-drone/>. Доступ 15.02.2020.
17. Watch: Cargo Air Vehicle Completes First Outdoor Flight. [Электронный ресурс]: <http://www.boeing.com/features/2019/05/cav-first-flight-05-19.page>. Доступ 15.02.2020.
18. Sciancalepore, S., Ibrahim, O. A., Oligeri, G., Di Pietro, R. Detecting Drones via Encrypted Traffic Analysis, Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning, Miami FL, USA, 15–17 May 2019. [Электронный ресурс]: https://cri-lab.net/wp-content/uploads/2019/05/Sciancalepore_WiseML2019_website.pdf. Доступ 27.02.2020. DOI: 10.1145/3324921.3328791.
19. Shvetsova, S. V., Shvetsov, A. V., Balalaev, A. S. Prevention of Acts of Unlawful Interference at Infrastructure Facilities. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 6, pp. 178–182. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/download/1561/1837>. Доступ 27.02.2020.
20. Equinox Innovative Systems. «DELTA 3C: Tri-Sector Cell Tower», 2017. [Электронный ресурс]: <https://t2m.io/UaF8ZYbq>. Доступ 15.02.2020.
21. Tethered Drone Systems. «Tethered Drone Systems: The Future of Tethered UAV Technology», 2019. [Электронный ресурс]: <https://t2m.io/eMSFwD5P>. Доступ 15.02.2020.
22. Aria Insights. «PARC: The Future of High-powered Commercial Drones». [Электронный ресурс]: <https://t2m.io/bufh6WRy>. Доступ 15.02.2020.
23. Elistair. «Orion: Persistent UAV for Surveillance and Communications», 2014. [Электронный ресурс]: <https://t2m.io/5LeDMh9S>. Доступ 17.02.2020. ●





Enhanced Security of Unmanned Aerial Vehicles Operations at Transport Infrastructure Facilities



Svetlana V. SHVETSOVA



Alexey V. SHVETSOV

Shvetsova, Svetlana V., Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Shvetsov, Alexey V., Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russia; North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia.*

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAV), also known as drones, are gaining more and more practical application in modern society, particularly as the tools of implementation of the concepts of «smart city», «smart health care», «smart industries», Internet of Things, 3D mapping, digital transport. But currently it is impossible to use of UAV at certain objects, comprising objects of transport infrastructure (OTI), primarily, airports, because of existing restrictions due to security threats arising during the UAV flight.

The authors of the present work have set a goal to offer a solution that allows to start operating UAV at transport infrastructure facilities that are currently prohibited for UAV flights.

To achieve the objective of the work, using analysis and synthesis, comparison and generalization, factors and conditions for safe use of UAV at OTI have been formulated, a method for increasing security of UAV flight has been

developed, followed by the suggestion on the UAV route control system.

The proposed system makes it possible to safely use UAVs at OTI by restraining their flight area strictly to the designated corridor, which eliminates a threat of a collision of UAV with other vehicles operated at OTI, dangerous elements of OTI, as well as with people at the object.

The system does not need electric power feeding, which makes it possible to implement the system without creating an auxiliary power supply infrastructure.

The practical application of the proposed system and, as a consequence, implementation of a greater number of opportunities for the use of UAV, are capable to generate fundamentally new technological processes and structures at transport facilities, which is one of the directions for creating the next generation transport infrastructure based on IoT and artificial intelligence.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, UAV, object of transport infrastructure, security enhancement.*

*Information about the authors:

Shvetsova, Svetlana V. – Ph.D. student at Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia, transport-safety@mail.ru.

Shvetsov, Alexey V. – Associate Professor of Vladivostok State University of Economics and Service (VSUES), Vladivostok, Russia; Associate Professor of North-Eastern Federal University (NEFU), Yakutsk, Russia, zit-otb@mail.ru.

Article received 01.03.2020, accepted 21.04.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 174.

Background. Unmanned aerial vehicles (UAV), also known as drones, are gaining more and more practical application in modern society, including in implementing such applications as «smart city», «smart health care», «smart industries» [1–5]. In addition, «drones and the Internet of Things (IoT) are working together to help develop security, 3D mapping, transportation, and more» [6]. But, currently «proliferation of opportunities provided by technologies and methods associated with unmanned aerial vehicles is constrained by the existing restrictions on the use of UAV at certain objects» [7], including certain objects of transport infrastructure (OTI), primarily, airports.

Currently, the use of unmanned aerial vehicles at certain transport facilities, primarily at airports, is legally prohibited in many countries of the world [7], including Russia, because of security threats that arise during the flight of UAV. Such threats include accidents and emergencies (ES) [8], which may arise in case of a collision of UAV with vehicles operated at OTI, dangerous goods located at the facility or dangerous technical elements of the transport infrastructure facility. Dangerous technical elements comprise technical installations and systems that use flammable and chemically hazardous substances, power supply systems, traffic control systems, etc.

The risk of collision of UAV with other vehicles or elements of the technical equipment can be regarded as low [7; 9; 15], however, the consequences of such an accident, according to studies [10–14], can be quite serious, especially if we take into account «that weight of professional drones now reaches tens of kilograms, while some models of drones run on liquid fuel» [15]. The fuel tank of AB5 Jet Quad turbojet drone [16], developed by Fusion Flight (USA), holds 19 liters of diesel fuel. AB5 Jet Quad is capable of carrying cargo weighing 18 kg, the drone itself weighs 23 kg, as a result, the total weight of a fueled AB5 Jet Quad drone carrying cargo will reach 60 kg.

In the near future, it is planned to start mass production of a new generation of civilian cargo drones with a carrying capacity of hundreds of kilograms. An example of such aircraft is the «helicopter» type CAV cargo UAV, developed by Boeing [17], capable of

carrying cargo weighing up to 227 kilograms. «CAV is 6,1 meters long, 5,3 meters wide and 1,5 meters high, and weighs 498,9 kilograms» [17].

In modern conditions, solving the problem of ensuring security issues linked to unmanned aerial vehicles is impossible without creating an appropriate methodological and technological apparatus. When forming the theory and methods enhancing security of UAV flights, it is necessary to apply an integrated approach, including a joint consideration of the results of scientific research and practical needs to ensure safety of both operated unmanned aerial vehicles and the security at transport infrastructure facilities where they are operated.

The *objective* of this study is to develop a method to enhance security of the flights of unmanned aerial vehicles and a technical solution for implementing it, jointly allowing to create necessary conditions for removing the existing restrictions on the use of UAV at OTI.

Results.

To achieve this goal, according to the authors, it is initially necessary to formulate the factors affecting the security of operation of unmanned aerial vehicles at transport infrastructure facilities, as well as a list of conditions for secure use of UAV at OTI.

Factors and conditions for safe use of UAV at OTI

The main factors affecting security of operation of unmanned aerial vehicles at transport infrastructure facilities can be divided into six groups.

1. Infrastructure factors:

- *proximity of traffic routes of other vehicles.*

The air corridors allocated for movement of UAV should not intersect in the same plane with routes (corridors) of movement of other vehicles operated at OTI;

- *minimum amount of free space for maneuvering.* The space for UAV maneuvering at OTI is limited by the existing routes of movement of other vehicles, as well as by buildings, structures and communications located at OTI.

2. Technological factors:

- *the technological process of a number of equipment used at OTI operates radio channels.*



UAV is an aircraft, which is controlled remotely by radio channel. In this regard, it is necessary to take into account the risk of failure in control of UAV due to the influence of other radio signals;

- *a number of OTI use equipment that generates radio interference.* When planning routes for movement of UAV, it is necessary to take into account that on the route of movement of UAV there should not be areas with such a level of radio interference, at which malfunctions in control of the aircraft are possible.

3. Regulation and legal factors:

- *owner of an unmanned aerial vehicle is responsible for causing damage to third parties by UAV.* When choosing a UAV route, it is necessary to take into account possible risks of collision not only with vehicles or OTI elements, but also with people on the object;

- *owner of an unmanned aerial vehicle is obliged to carry out the registration actions established by law and obtain the necessary permits.* The schedules and modes of movement of UAV must be agreed by the regulatory authorities.

4. Risk factors of unauthorized intervention and impact:

- *there is a risk of remote interception of the control of an unmanned aerial vehicle.* At the moment, there is no tool for guaranteed protection of UAV control channel against unauthorized interference and impacts from an offender [18]. It is necessary to take into account the risk of interception of control of the aircraft, including for the purpose of using UAV to commit an act of unlawful interference at OTI [19].

- *civil UAV are not protected against external physical impact.* It should be borne in mind that UAV can easily be damaged, for example, by a small object thrown in its direction by an offender. When planning routes and infrastructure for movement of UAV, it is necessary to consider that UAV should be inaccessible for direct physical impact from an offender.

Generalization of factors affecting operation security of unmanned aerial vehicles at transport infrastructure facilities makes it possible to formulate three fundamental conditions for safe use of UAV at OTI:

1) Area of possible movement of UAV must be within the boundaries of the designated air

corridor. This condition is due to the fact that currently there is no protection against the threat of uncontrolled changes in UAV flight trajectory. «A change in trajectory can occur both as a result of operator errors» [13], and deliberate unauthorized interference and impact on the part of an offender, including remote interception of UAV control. In addition, there is a threat of loss of control over UAV in case of technical malfunctions in it, after which UAV can also change its trajectory and collide with other vehicles operated at OTI, dangerous elements of OTI or people;

2) it is permissible to use only «helicopter» type UAV. The possibility of using only this type of UAV is due to the fact that UAV of other types, primarily «aircraft» ones, can move at high speed, and are not intended for maneuvering within limited built-up areas;

3) it is permissible to use only UAV with electric engines. The requirement on that type of thrust is due to the fact that accidents involving «liquid fuel» UAV have a risk of more severe consequences due to possible ignition of liquid fuel on board.

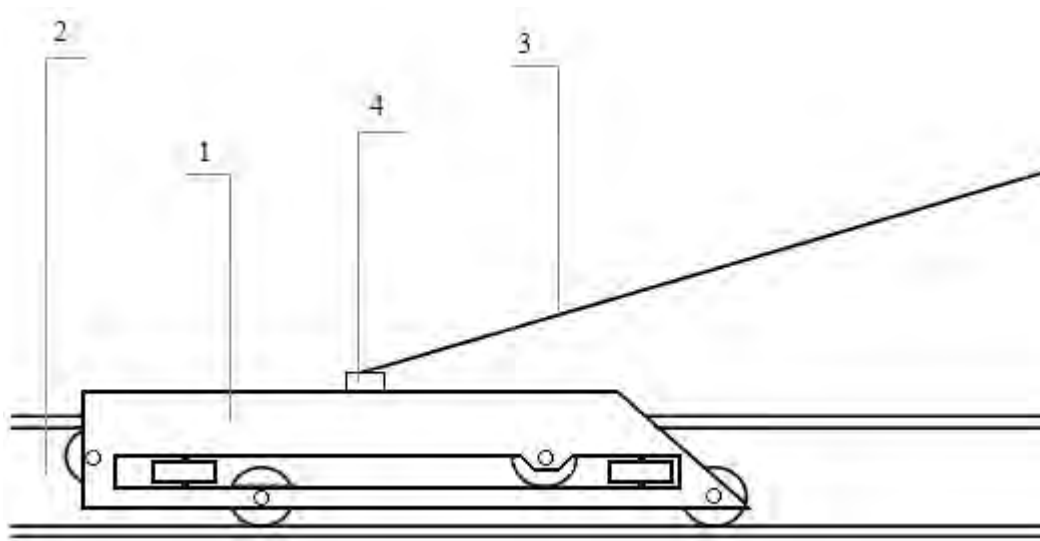
Ensuring security of operation of unmanned aerial vehicles at transport infrastructure facilities

The problem of safety of movement of unmanned aerial vehicles during operation at transport infrastructure facilities is directly related to stability of the boundaries of the designated (for UAV flights) air corridor (DAC), upon exiting which UAV may collide with other ground/air vehicles, elements of the technical equipment or people situated at OTI.

Stability of boundaries of the designated air corridor is a state in which UAV flight (from the take-off point to the landing point) is only possible within the boundaries of DAC.

Ensuring such stability is possible on the basis of creating conditions for blocking the object in question in the air corridor allocated for its movement, preventing thus emergencies associated with the object leaving the boundaries of the assigned air corridor. Technically, this task is reduced to preventing the possibility of UAV crossing DAC borders.

The problem formulated in such way, it seems expedient to provide constant communication between UAV and a non-free material point (NMT) located in the center of



Pic. 1. Route control system for unmanned aerial vehicles.

DAC circle and limited in movement by DAC axis.

In this case, the obtained connection should limit divergence of objects under consideration, at the distance exceeding a distance equal to the length of DAC radius minus UAV length and $\frac{1}{2}$ of NMT length that will allow physical retention of the UAV within the DAC boundaries.

For practical implementation of the proposed method for increasing safety of UAV operation, a system of the control of the routes of unmanned aerial vehicles has been developed.

The route control system (RCS) for unmanned aerial vehicles allows for safe use of UAV at OTI by limiting UAV movement area strictly to a designated air corridor. When developing the system, the formulated conditions for safe use of UAV at OTI were considered.

RCS description

The principle of operation of the proposed system is that the unmanned aerial vehicle cannot go beyond the air corridor designated for its movement. This restriction is respected due to the fact that UAV is attached with a retaining cable to a ground mobile platform installed on a monorail laid along a given route of UAV. At the same time, UAV retains the ability to fly, but its flight area is limited by the length of the monorail and the length of the holding cable.

The detailed design of the developed system is shown in Pic. 1.

The system consists of the following main elements: ground mobile platform 1, mounted on a monorail 2; holding cable 3 is attached to attachment 4 installed on the ground mobile platform at one end, the cable is attached to the same attachment as above but on-board the UAV at the other end.

UAV is attached to the RCS with a retaining cable. The optimal is the use of a spring-loaded retaining cable, such a cable has minimal sag, which reduces threat of it catching on various surrounding objects during UAV flight.

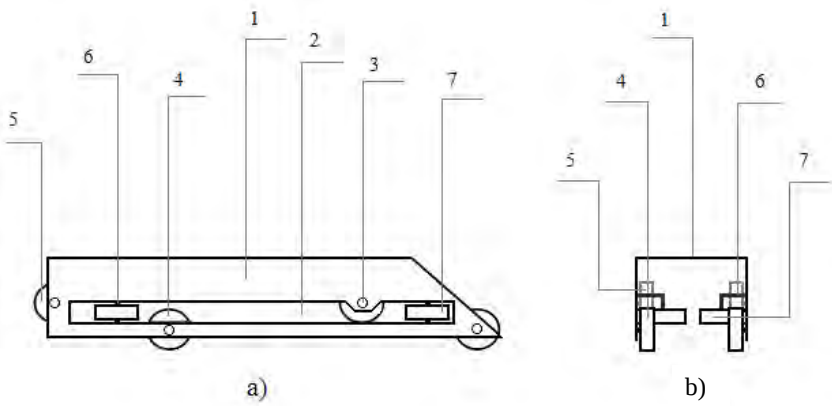
The basic element of the system is a ground mobile platform (element 1 of Pic. 1), designed in such a way as to create a minimum braking effect during UAV flight. This is achieved due to biaxial arrangement of the platform wheels. In total, the platform has 12 wheels, which are based on roller bearings.

The detailed design of the movable platform is shown in Pic. 2.

The mobile platform consists of the following elements: body 1 with holes 2 on the sides; eight horizontally located axles 3, on which four lower wheels 4 and four upper wheels 5 are installed; four vertically arranged axles 6, on which four side wheels 7 are installed. The material of the body of the mobile platform is aluminum alloy AD31.

The mobile platform is installed on the monorail (element 2 of Pic. 1).





Pic. 2. Ground mobile platform: a) left view, b) front view.

The design of the mobile platform allows it to move along the monorail, both forward and backward.

The monorail is laid along the established route of UAV. The monorail is assembled from separate sections, the number of which is determined by design length of the monorail. The monorail is mounted on support-brackets, which are fixed in turn on suitable external objects, for example, on buildings or structures located along the route of the monorail, or on screw piles specially installed in the soil.

The detailed design of the monorail is shown in Pic. 3.

The section of the monorail 1 is fixed by the longitudinal upper fastener 2 and the longitudinal lower fastener 3 to the adjacent section of the monorail 4 and by the corner fastener 5 to the support-bracket 6. The material of the monorail is aluminum alloy AD31.

System operating conditions

A monorail system can simultaneously operate a single mobile platform or a group of platforms. Only single UAV can be attached to each mobile platform.

When operating a group of mobile platforms on a single monorail, their movement can be carried out only in one selected direction with a safe interval between them, this is necessary to prevent UAV collisions.

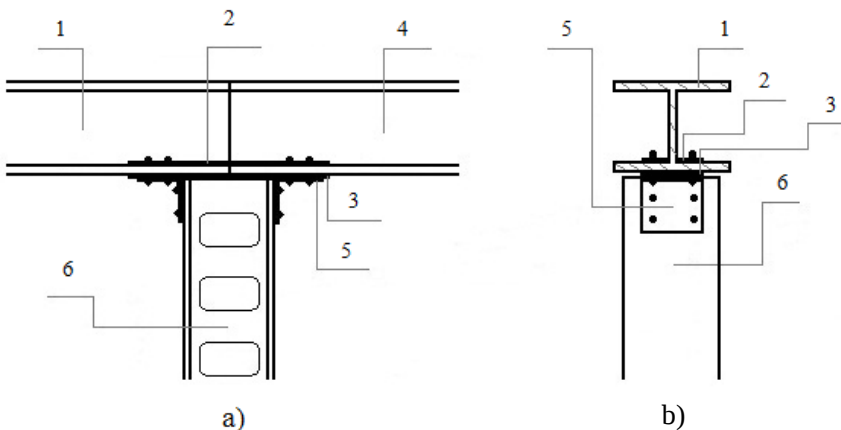
Safe interval (S_{int}) is determined according to the formula:

$$S_{int} = T_{res} + B_{dis} + L_{hc} \cdot 2, \quad (1)$$

where T_{res} is distance traveled by UAV from the moment the operator detects an obstacle in the path of UAV movement and until the moment when the operator applies emergency braking;

B_{dis} is stopping distance traveled by UAV during emergency braking;

L_{hc} is the length of the retaining cable.



Pic. 3. Monorail complete with support-bracket: a) left view, b) front view.

Table 1

Developments involving the use of tethered UAV

Developer	Maximum flight altitude of the drone	Continuous flight time of the drone
Equinox Systems [20]	150 m	30 days
TDS [21]	120 m	Unlimited
Aria Insights [22]	120 m	Unlimited
Elistair [23]	80 m	10 hours

Formula 1 allows us to calculate a safe interval for a given UAV speed, for this, their values are substituted into T_{res} and B_{di} indicators as the considered speed.

Application restrictions

The RCS is operated for applications involving movement of UAV along a certain route.

The UAV RCS is applicable at ground-based transport infrastructure facilities.

The RCS is designed to operate «helicopter» UAV according to the vertical take-off and landing scheme.

Experimental testing of the system

A full-scale experiment was carried out by means of a 15-minute flight of a UAV attached by a holding cable to a mobile platform mounted on a monorail. Flight speed and altitude, location of UAV relative to the monorail, as well as cable tension force were periodically changed by the operator. As a result of the experiment, it was found that the route control system for unmanned aerial vehicles ensures limitation of UAV movement area within the boundaries of the designated air corridor, while UAV attachment to the system does not significantly affect controllability and speed of UAV.

Directions of further research

The research is developed by the authors in two directions.

The first direction provides for development of the technology allowing the operator to control the UAV using communication by cable instead of radio channel. Monorail and then retaining cable attaching UAV to the mobile platform will serve as cable line for transmitting data. This method of UAV control will permit to protect the channel of UAV control against failures caused by radio interference, and will provide protection against remote interception of the UAV control by an offender, that will reduce vulnerability of the system to unauthorized interference and impact.

The second direction provides for development of the technology pf remote electric feeding of the UAV within the RCS. The monorail and then the retaining cable will serve as electric power supply line. This method of power supply will permit UAV to work in practically continuous mode and will also increase its load lifting capacity by installing more powerful electric engines. Remote power supply of the UAVs will permit to create long systems of route and zone flights of UAVs in cities and regions with a possibility of their further integration. Introduction of the systems of such type will permit to develop in the future global logistics networks, where freight UAV will serve as delivery vehicles.

Comparison with solutions already known in the world

At the moment, a number of developments are known in the world that provide for the use of tethered UAVs (Table 1).

The fundamental difference between the solutions described in Table 1 from the proposed system is that in them UAV is attached by a cable to a ground stationary base (station), after takeoff and reaching a given altitude, is in a static state and is used as a platform for placing equipment, for example, designed to transmit a 3G/4G/5G signals to ensure cellular coverage in emergency areas, until damaged cell towers are restored. The route flight of UAV in the described solutions is not possible. An additional difference between the considered solutions from the proposed system is that they are intended for remote power supply of UAV. There is no information about whether these solutions are capable of retaining UAV in a given flight sector, and this does not allow considering these solutions as a means of ensuring safety of UAV traffic.

Conclusions. The present research has resulted in development of a method for improving safety of unmanned aerial vehicles



and unmanned aerial vehicle route control system that implements it. The implementation of the system solves the problem of ensuring safety of movement of unmanned aerial vehicles during operation at transport infrastructure facilities, which in turn makes it possible to remove the existing restrictions on the use of UAV at OTI, in terms of unmanned aerial vehicles used in conjunction with the proposed system.

REFERENCES

1. Alsamhi, S. H., Ma, O., Ansari, M. S., Gupta, S. K. Collaboration of Drone and Internet of Public Safety Things in Smart Cities: An Overview of QoS and Network Performance Optimization. *Drones*, 2019, Vol. 3, No. 1, p. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones3010013>.
2. Amukele, T. K., Hernandez, J., Snozek, C. L. H., Wyatt, R. G., Douglas, M., Amini, R., Street, J. Drone Transport of Chemistry and Hematology Samples Over Long Distances. *American Journal of Clinical Pathology*, 2019, Vol. 148 (5), pp. 427–435. DOI: [10.1093/ajcp/aqx090](https://doi.org/10.1093/ajcp/aqx090).
3. Faramondi, L., Oliva, G., Ardito, L., Crescenzi, A., Caricato, M., Tesei, M., Muda, A., Setola, R. Use of Drone to Improve Healthcare Efficiency and Sustainability. MIPRO 2019, 42nd International Convention, Opatjia, Croatia, 20–24 May, 2019. SSRCI – Smart, Sustainable and Resilient Cities and Infrastructures. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Gabriele_Oliva/publication/334521353_Use_of_Drone_to_Improve_Healthcare_Efficiency_and_Sustainability/links/5d2f4e4d92851cf4408cc008/Use-of-Drone-to-Improve-Healthcare-Efficiency-and-Sustainability.pdf. Last accessed 21.01.2020.
4. Lievin, B. A., Bugaev, A. S., Ivashov, S. I., Razevig, V. V. Distantly piloted aircrafts and the track security. *World of Transport and Transportation*, 2013, Vol. 11, No. 2, pp. 152–157. [Electronic resource]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/354/610>. Last accessed 21.01.2020.
5. Innovative applications of drones for ensuring safety in transport. Horizon 2020 Website. [Electronic resource]: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/mg-2-8-2019>. Last accessed 21.01.2020.
6. Goodchild, A., Toy, J. Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO₂ emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, Vol. 61, pp. 58–67. DOI: [10.1016/j.trd.2017.02.017](https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.017).
7. Huttunen, M. T. Drone Operations in the Specific Category: A Unique Approach to Aviation Safety. *The Aviation & Space Journal*, 2019, Vol. 18, No. 2, pp. 2–21. [Electronic resource]: <http://www.aviationspacejournal.com/wp-content/uploads/2019/08/The-Aviation-Space-Journal-Year-XVIII-April-July-2019-1.pdf>. Last accessed 17.02.2020.
8. Unmanned Aircraft Systems Advisory Group (UAS-AG). Официальный сайт ICAO. [Electronic resource]: [https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-\(UAS-AG\).aspx](https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-(UAS-AG).aspx). Last accessed 17.02.2020.
9. Dourado, E., Hammond, S. Do Consumer Drones Endanger the National Airspace? Evidence from Wildlife Strike Data. Mercatus Center, George Mason University, Arlington and Fairfax, Virginia, March 2016. [Electronic resource]: <https://www.mercatus.org/system/files/Dourado-Wildlife-Strikes-MOP-v2.pdf>. Last accessed 17.02.2020.
10. Small remotely piloted aircraft systems (drones): Mid-air collision study. Report by QinetiQ, Natural Impacts commissioned by the Department for Transport, the Military Aviation Authority and British Airline Pilots' Association, 2016. [Electronic resource]: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/628092/small-remotely-piloted-aircraft-systems-drones-mid-air-collision-study.pdf. Last accessed 01.02.2020.
11. Schroeder, K., Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS ingestion into high-bypass engines. Part II: Drone parametric study. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017. DOI: [10.2514/6.2017-0187](https://doi.org/10.2514/6.2017-0187).
12. Song, Y., Horton, B., Bayandor, J. Investigation of UAS Ingestion into High-Bypass Engines. Part I: Bird vs. Drone. 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017. DOI: [10.2514/6.2017-0186](https://doi.org/10.2514/6.2017-0186).
13. Wild, G., Murray, J., Baxter, G. Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters. *Aerospace*, 2016, Vol. 3, Iss. 3, pp. 22–32. [Electronic resource]: https://miningquiz.com/pdf/Drone_Safety/Aerospace-Drons_UAV_txt.pdf. Last accessed 01.02.2020.
14. Altawy, R., Youssef, A. M. Security, Privacy and Safety Aspects of Civilian Drones: A Survey. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2016, Vol. 1, Iss. 2, Article No. 7, pp. 1–25. DOI: [10.1145/3001836](https://doi.org/10.1145/3001836).
15. Shvetsova, S. V., Shvetsov, A. V. Safety analysis for the transport of goods by unmanned aerial vehicles. *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 5, pp. 286–297. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-286-297>.
16. Coxworth, B. Jet-powered VTOL drone is like a quadcopter on steroids. New Atlas. [Electronic resource]: <https://newatlas.com/drones/ab5-jetquad-jet-powered-drone/>. Last accessed 15.02.2020.
17. Watch: Cargo Air Vehicle Completes First Outdoor Flight. [Electronic resource]: <http://www.boeing.com/features/2019/05/cav-first-flight-05-19.page>. Last accessed 15.02.2020.
18. Sciancalepore, S., Ibrahim, O. A., Oligeri, G., Di Pietro, R. Detecting Drones via Encrypted Traffic Analysis, Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning, Miami FL, USA, 15–17 May 2019. [Electronic resource]: https://cri-lab.net/wp-content/uploads/2019/05/Sciancalepore_WiseML2019_website.pdf. Last accessed 27.02.2020. DOI: [10.1145/3324921.3328791](https://doi.org/10.1145/3324921.3328791).
19. Shvetsova, S. V., Shvetsov, A. V., Balalaev, A. S. Prevention of Acts of Unlawful Interference at Infrastructure Facilities. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 6, pp. 178–182. [Electronic resource]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/download/1561/1837>. Last accessed 27.02.2020.
20. Equinox Innovative Systems. «DELTA 3C: Tri-Sector Cell Tower», 2017. [Electronic resource]: <https://t2m.io/UaF8ZYbq>. Last accessed 15.02.2020.
21. Tethered Drone Systems. «Tethered Drone Systems: The Future of Tethered UAV Technology», 2019. [Electronic resource]: <https://t2m.io/eMsFWd5P>. Last accessed 15.02.2020.
22. Aria Insights. «PARC: The Future of High-powered Commercial Drones». [Electronic resource]: <https://t2m.io/buflh6WRy>. Last accessed 15.02.2020.
23. Elistair. «Orion: Persistent UAV for Surveillance and Communications», 2014. [Electronic resource]: <https://t2m.io/5LeDMh9S>. Last accessed 17.02.2020.



ТРАНССИБ 190

Каковы были первые шаги, давшие жизнь великому строительству? Кто и как строил магистраль, насколько выросла смета и почему почти сразу же после запуска движения встал вопрос о реконструкции.



ГАЛЕРЕЯ ИМЁН 214

О. Е. Патон – к 150-летию со дня рождения. Всем известны его достижения на поприще сварки. Но все ли знают, насколько тесно он был связан с железными дорогами?

ПРЕСС-АРХИВ 225

Железнодорожная политика в 1910 году.

THE TRANS-SIBERIAN RAILWAY 202

What was the first step that gave birth to great construction? Who and how built the railroad, how the budget grew, and why the issue of reconstruction arose just after the first train passed along the Trans-Siberian Railway?

GALLERY OF NAMES 220

Dedicated to the 150th anniversary of O.E. Paton. Everybody knows about his innovative achievements in welding. But does anybody know about his close relationship with railways?

NEWS FROM THE ARCHIVES 234

Rail policy in 1910.





Строительство Великого Сибирского пути



Левин Дмитрий Юрьевич – Российская академия естествознания (РАЕ), Москва, Россия.*

Дмитрий ЛЕВИН

Строительство Великого Сибирского пути – героическая страница нашей страны. В статье рассматриваются главные вехи эпохальной стройки. В 1837 году в России ещё не было железных дорог, а уже начали поступать предложения по строительству Транссиба. Заинтересованное правительство неоднократно обсуждало этот вопрос. Показательно мнение министра финансов А. И. Вышнеградского: «Сибирская железная дорога

нужна, но в стране есть более важные вопросы». Положение кардинально изменилось в 1892 г. с назначением министром финансов С. Ю. Витте. Он нашёл необходимые деньги, фактически руководил стройкой и занимался переселением людей в Сибирь. Статья с помощью большого числа иллюстраций показывает беспрецедентный масштаб железнодорожного строительства в трудных природных условиях и в сжатые сроки.

Ключевые слова: Транссибирская магистраль, история транспорта, Комитет Сибирской железной дороги, изыскания, проектирование, строительство, переселение в Сибирь, искусственные сооружения, освоение месторождений.

*Информация об авторе:

Левин Дмитрий Юрьевич – доктор технических наук, академик РАЕ, Москва, Россия, levindu@yandex.ru.

Статья поступил в редакцию 10.10.2019, принята к публикации 17.01.2020.

For the English text of the article please see p. 202.



Рис. 1. Гравюра с фотографии цесаревича, везущего первую тачку земли на место закладки Уссурийской железной дороги. Фото: портал «Старый Владивосток». Источник: <https://primamedia.ru/news/493214/> [3].

Тема строительства Сибирской железной дороги (так скромно именовали в начале строительства Транссибирскую магистраль) настолько значительна, что ежегодно, особенно в юбилейные даты, этому событию посвящаются многочисленные публикации. Транссибирская магистраль внесена в знаменитую книгу Гинесса сразу по нескольким номинациям. До сих пор Трансиб – самая протяжённая двухпутная и полностью электрифицированная железная дорога в мире.

Первые проектные предложения по сооружению Трансиба начали поступать ещё в 1837 г. В 1857 г. начались изыскания различных районов Сибири и Дальнего Востока. С 1869 г. начали выбирать направления линий.

В 1872–1874 гг. проведены правительственные изыскания, которые определили три главных направления:

1. Кинешма–Вятка–Пермь–Екатеринбург (933 версты).
2. Нижний Новгород–Казань–Красноуфимск–Екатеринбург (1172 версты).
3. Алатырь–Уфа–Челябинск (1172 версты).

С 1875 г. направления Сибирской дороги стали регулярно обсуждать на заседаниях Комитета министров. В 1877 г. сеть железных дорог европейской части России достигла Урала. Александр II, а затем Александр III одобряли решения Комитета министров [1].

В 1886 г. Александр III написал резолюцию: «Уж сколько отчётов генерал-губернаторов Сибири я читал и должен с грустью и стыдом сознаться, что Правительство до сих пор почти ничего не сделало для удовлетворения потребностей этого богатого, но запущенного края! А пора, очень пора» [2].

Перед дальнейшим плаванием в восточные страны наследника-цесаревича (будущего Императора Николая II) 17 марта 1891 г. Александр III вручил ему рескрипт: «Повелеваю ныне приступить к постройке сплошной через всю Сибирь железной дороги, имеющей соединить обильные дарами природы Сибирские области с сетью внутренних рельсовых сообщений, Я поручаю Вам объявить также волю Мою по вступлении Вами вновь на Русскую землю после обозрения иноземных стран Востока. Вместе с тем возлагаю на Вас совершение во Вла-





Рис. 2. Схема железных дорог Сибири: 1 — дороги, построенные до 1900 г.; 2 — дороги, построенные с 1900 г. по 1916 г.; 3 — паромно-ледовые переправы; 4 — государственная граница [4].



Рис. 3. Схема Уссурийской железной дороги [3].

дивостоке закладки разрешённого к сооружению на счёт казны и непосредственным распоряжением Правительства Уссурийского участка великого Сибирского рельсового пути» [2].

19 мая 1891 г. наследник-цесаревич, высадившись во Владивостоке, исполнил рескрипт, совершив закладку (рис. 1) будущей Сибирской железной дороги (рис. 2). Так было положено начало Уссурийской железной дороги, которая связала Владивосток и Хабаровск (рис. 3).

Весной 1891 г. под руководством О. П. Вяземского начались работы на Уссурийской линии. Строительство шло медленно. Отпускаемых денежных средств не хватало.

К середине лета 1891 г. в Министерстве путей сообщений был подготовлены документы о сроках и порядке сооружения Сибирской железной дороги, а также финансовое обоснование. Документы были переданы министру финансов И. А. Вышнеградскому, который давал уклончивые ответы и не проявил инициативы в поиске необходимых денежных средств. И. А. Вышнеградский считал, что Сибирская железная дорога нужна, но в стране есть более важные вопросы.

Положение кардинально изменилось, когда 30 августа 1892 г. на пост министра финансов был назначен С. Ю. Витте (рис. 4). Он лично занялся поиском источников финансирования, при этом предложив разделить все работы на три очереди:

- Западно-Сибирский участок от Челябинска (рис. 5) до Оби (1328 вёрст) и Среднесибирский участок от Оби до Иркутска (1754 версты);

- участок Владивосток—Графская;
- соединительная ветвь между Уральской горнозаводской и Сибирской железными дорогами [5].

Винная монополия и обеспеченный золотом рубль позволили государству не прибегать к чрезвычайным методам финансирования. Предварительная смета включала 350 млн руб. В итоге, показавшаяся тогда грандиозной суммой, предварительная смета была превышена в три раза и составила почти 915 млн руб.

По предложению Сергея Витте был учреждён Комитет Сибирской железной дороги. В него вошли министры внутренних дел, государственных имуществ, финансов и путей сообщения и государственного контроля. Позже — военный министр, управляющий Морским министерством и действительный тайный советник, академик Н. Х. Бунге. 14 января 1893 г. наследник-цесаревич стал председателем этого комитета.

Комитет регулярно собирался и рассматривал текущие вопросы по сооружению железной дороги, сроки, ход работ. На одном из заседаний комитета был поставлен вопрос



Рис. 4. Сергей Юльевич Витте (1849–1915) [6].

о переселении крестьян из Европейской части в Сибирь (рис. 6). Император Александр III утвердил решение сибирского комитета, в котором была выражена идея «о польности переселения для общегосударственных интересов и идея о вреде искусственного затруднения этого переселения» [2].



Рис. 5. Вокзал станции Челябинск [4].



Рис. 6. Переселенческий посёлок близ станции Канск [4].



Рис. 7. Схема Западно-Сибирской железной дороги [6].

Транссиб оказал колоссальное воздействие на судьбу России. Официально известно, что «ежегодное число переселенцев в Сибирь, до 1880-х гг. не превышало двух тысяч человек. В начале последнего десятилетия XIX века число переселенцев достигло 50 тысяч, а с 1896 г. благодаря Сибирской железной дороге возросло до 200 тысяч человек, а за два с половиной года (с 1907 по июнь 1909 г.) в Сибирь приехало около 2 млн переселенцев [7]. Всё это движение шло преимущественно из центральных чернозёмных губерний Европейской России. С 1897 по

1914 г. население Сибири увеличилось с 4,6 до 7,6 млн человек, население Дальнего Востока — с 0,9 до 1,6 млн человек. Изменилась схема заселения. Вместо побережья рек и трактов началось преимущественное заселение местности вдоль магистрали и ответвлений от неё» [2].

Проект строительства первого участка Западно-Сибирской железной дороги (рис. 7) от Челябинска до Омска Комитет рассматривал в начале 1892 г. 8 мая 1892 г. его утвердил Александр III. 7 июля 1892 г. строительство стартовало.



Рис. 8. Станция Омск [6].



Рис. 9. Великий Сибирский путь. Станция Обь [6].

В начале 1893 г. была представлена вторая часть, и той же весной начались работы. Уже 30 августа 1894 г. было открыто временное движение до Омска (рис. 8), а укладка пути была доведена до Оби 19 августа 1895 г. (рис. 9). А 15 октября 1895 г. открылось временное движение по всей Западно-Сибирской железной дороге.

На Западно-Сибирской железной дороге под руководством начальника работ К. Я. Михайловского (рис. 10) возвели 274 искусственных сооружения, построили

десять депо и 38 пунктов водоснабжения. Вдоль дороги соорудили телеграфную линию на столбах, установленных по 20 штук на версту, т.е. по 9–10 на один километр, с натянутой в два ряда стальной проволокой сечением 5 мм. Этот стандарт был принят впоследствии на всём Транссибе [8].

Александр III скончался 20 октября 1894 года. Вступивший на престол Николай II оставил за собой звание председателя Комитета Сибирской железной дороги. 11 заседаний Комитета вплоть до конца





Рис. 10. Константин Яковлевич Михайловский (1834–1909) [6].

1897 г. проходили под личным председательством императора.

Строительство Средне-Сибирской железной дороги от Оби до Красноярска (711 вёрст) было начато в мае 1893 г., и 1 января 1898 г. этот участок был сдан в эксплуатацию. Новый мост через Енисей (рис. 11) стал первым в России и вторым на Евразийском материке по своим характери-

стикам. Величина пролётов составляла 145 м.

На остальных участках Средне-Сибирской железной дороги работы были начаты летом 1894 г. и в эксплуатацию сданы в 1899 г. (рис. 12).

По сравнению с Западной Сибирью работать здесь было труднее из-за более сурового климата. Рабочий период, т.е. тёплое время года, когда строительство можно было вести широким фронтом, составлял здесь всего сто дней в году (рис. 13). Строительство затруднялось и удорожалось из-за слабой заселённости и таёжной чащи. С. Ю. Витте подчёркивал, что производство работ было особенно затруднительно в тайге, непроходимой на громадном пространстве, за исключением редких охотничьих троп, и состоящей из густого смешанного леса с болотистым верхним слоем почвы, средней толщиной около одного аршина, покрытым мощной травянистой растительностью. К работам в тайге можно было приступить лишь после устройства дорог, состоящих из ряда положенных бок о бок брёвён; затем требовалось осушить верхние слои почвы при помощи сети водоотливных каналов и расчистить верхний слой валежника, хвои и листвы, перепутанных корнями деревьев и растений [2];

В этой местности трудно было найти лиц, которые взялись бы за выполнение



Рис. 11. Мост через Енисей [6].



Рис. 12. Прибытие первого поезда в Иркутск [3].



Рис. 13. Строительство Транссибирской железной дороги [6].

подрядов и поставок. Начальник работ Н. П. Меженинов (рис. 14) очень требовательно относился к подбору подрядчиков для выполнения сложных работ и предпочитал заключать договора только с теми, кто уже зарекомендовал себя с положительной стороны [9].

Томск при строительстве остался в стороне. Поэтому 29 июля 1895 г. было принято решение проложить железнодорожную ветку и к нему. Работы были начаты практически сразу, и менее чем через год (к 22 июля следующего года) проследовал первый поезд, и было открыто временное





Рис. 14. Николай Павлович Меженинов (1838–1915) [6].



Рис. 16. Александр Николаевич Пушечников (1850–1916) [3].

движение. 1 января 1898 г. ветвь Тайга—Томск (82 версты) (рис. 15) была сдана.

Участок от Иркутска до Байкала начали строить летом 1896 г. Руководил работами А. Н. Пушечников (рис. 16). Условия были невероятно сложными: наводнения от ливневых вод, вечная мерзлота, гористая местность. Поэтому приходилось менять отметки насыпей, количество и расположение отверстий водопропускных соору-

жений и положение самой трассы прямо на месте. В эксплуатацию этот отрезок Транссиба был принят через пять лет в 1901 г. [10].

После Русско-японской войны 1904–1905 г. связь Уссурийской линии с Забайкальской дорогой по Китайско-Восточной железной дороге стала ненадёжной из-за передачи Южной Маньчжурии Японии. Поэтому председатель



Рис. 15. Станция Тайга [6].



Рис. 17. Вагон-церковь на участке Бочкарево–Благовещенск, 1913 г. [3].

Совета Министров С. Ю. Витте предложил вновь вернуться к проекту Амурской железной дороги.

Амурскую магистраль было решено разделить на три участка: западный, средний и восточный. Строительство западного участка от Куэнги до Угрюма (636 км) стартовало в 1907 г. Управление строительством осуществлялось из Нерчинска, работами руководил Е. Ю. Подруцкий. Первым в 1913 г. по дороге проследовал поезд с вагоном-церковью (рис. 17). На каждой станции совершались молебны.

Средний участок длиной 675 км строили от ст. Керак до ст. Малиновка у реки Буреи. Это был, пожалуй, один из самых сложных участков, которым руководил В. В. Трегубов: непроходимая тайга и болота. Было решено использовать труд осуждённых. При осушении болот сооружалась временная деревянная «железная» дорога, представлявшая собой систему продольных и поперечных лежней. По ней возился грунт, который отсыпался на бревенчатые настилы. Периодически уже готовая дорога исчезала бесследно в топях, и работа начиналась по новой. Была создана сложная сеть отводных канав и каналов. По плану сюда же входило и строительство ветки на Благовещенск длиной 108 км. Весь

средний участок Амурской дороги был пущен в 1914 г.

Сооружение последнего участка дороги от Малиновки до Хабаровска (497 км) в 1912 г. начал М. С. Навроцкий, которого через несколько месяцев сменил А. В. Ливеровский. Он руководил строительством восточного участка четыре года. В отличие от других, восточный строился хозяйственным методом. На откуп предпринимателям отдали даже возведение моста через Амур (рис. 18). На этом участке удалось механизировать земляные работы: в работе использовались три одноковшовых и семь многоковшовых экскаваторов, изготовленных на Путиловском заводе. Впервые применялись грузовые автомобили. Земляное полотно на болотах стало возводиться новым оригинальным способом. Зимой, по льду, укладывали рельсы. Вдоль них отсыпали песчаный грунт. Весной, после осадки песка, стелили рельсовый путь и пускали многоковшовые экскаваторы. Они разрабатывали выемки и укладывали глину в тело насыпи до проектных отметок.

На восточном участке пришлось делать восемь тоннелей под два пути. Один из них длиной 1,5 км пробили через скалы Хингана; другой, длиной 820 м, оказался водобильным; третий, 420-метровый, прохо-



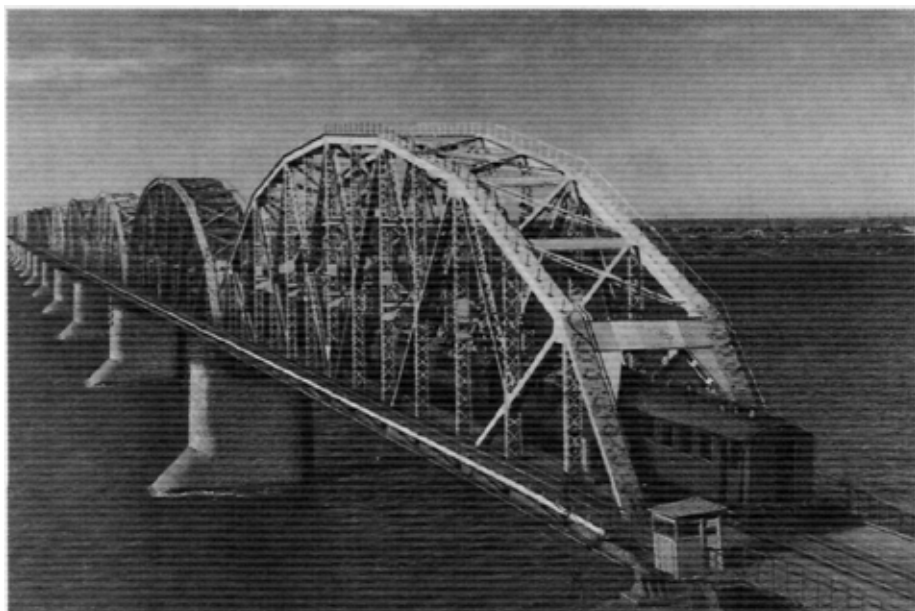


Рис. 18. Мост через Амур у Хабаровска [6].

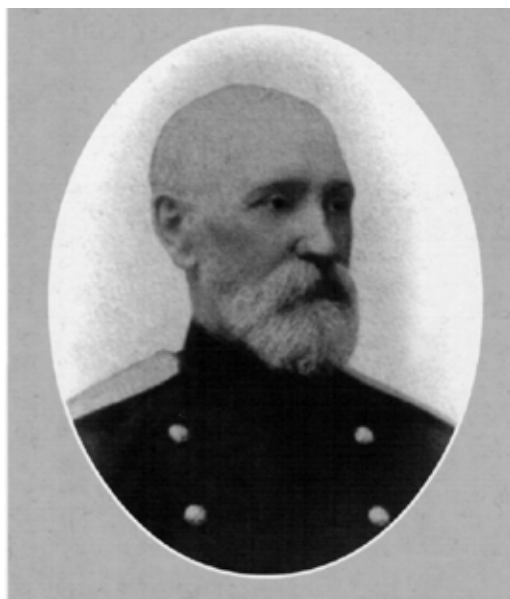


Рис. 19. Николай Павлович Петров (1836–1920) [8].

дил в толще с вечной мерзлотой; четвёртый — в грунтах с сернокислыми водами. Этими работами руководили А. Н. Пассек и В. Н. Писарев. Здесь тоже широко применялись новые приспособления и механизмы: пневмоперфораторы, камнедробилки, компрессоры и т.д. Последний участок Амурской дороги был сдан в эксплуатацию в 1915 году.

В названиях многих станций и разъездов Транссибирской железной дороги

увечены имена министра путей сообщения князя М. И. Хилкова (станция Хилкова), Приамурских генерал-губернаторов А. Н. Корфа (станция Корфовская) и Н. И. Гродекова (станция Гродеково) и др. Станции Курдюмовка, Розенгартовка, Свягино, Дермидотонтовка и др., разъезды Кнорринг, Дроздов, Краевский, Рыжев, Эбергард, Снарская, Кругликово и т.д. названы в честь инженеров путей сообщения [11].

У Сибирской железной дороги был один существенный недостаток — это одна колея. Она могла пропускать не более восьми пар поездов в сутки. В 1903 г. проф. Н. П. Петров (рис. 19) определил участки, которые ограничивали пропускную способность (Ачинск—Нижеудинск и Зима—Половина). Учёный предложил уменьшить уклоны за счёт обхода этих мест. Но оказалось, что этого недостаточно. После обсуждения проблемы было принято решение о строительстве второго пути. Технические условия реконструкции дороги разработал Н. П. Петров [12]. Работы начались в октябре 1904 г.

Строительство вторых путей по всей протяжённости Транссиба превратилось в коренное переустройство и резко повысило мощность магистрали. Реконструкция Транссибирской железной дороги была закончена в 1916 г. (рис. 20).



Рис. 20. Схема Транссибирской магистрали [8].

На Транссибе было сооружено около семи тысяч искусственных сооружений (тоннелей, мостов, виадуков, труб и подпорных стенок), в том числе на Западно-Сибирской — 1184, Средне-Сибирской — 1480, Кругобайкальской — 582, Забайкальской — 1183, Уссурийской — 359.

В период строительства Транссибирской магистрали Комитет Сибирской дороги проделал огромную работу по исследованию Сибири и Дальнего Востока. Вместе со строителями шли геологические экспедиции. Они открыли месторождения угля, железной руды, графита, нефрита. С. Ю. Витте, введивший в этот период золотой стандарт, особенно настаивал на широкомасштабных поисках золотых месторождений. Экспедиции обнаружили и нанесли на карты золотые россыпи в Северо-Восточной Сибири. Восточная Сибирь, прежде всего прииски Витима и Олёкмы, давали до 75 % добытого в России золота.

Некогда отсталые районы Сибири и Дальнего Востока, по которым проходила магистраль, получили шанс на быстрое развитие. Промышленность и сельское хозяйство стали увеличивать своё производство и расширили рынки сбыта. Города и деревни, которые находились вдоль магистрали, преображались на глазах [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Зензинов Н. А. От Петербург-Московской до Байкало-Амурской магистрали. — М.: Транспорт, 1986. — 215 с.
2. Транссибирская и Байкало-Амурская магистраль — мост между прошлым и будущим России. — М.: Издательство Центра «Транспорт», 2005. — 348 с.
3. История железнодорожного транспорта России. Т. 1: 1836–1917 гг. — СПб., 1994. — 336 с.
4. Левин Д. Ю. С. Ю. Витте — железнодорожник, выдающийся государственный деятель. — М.: УМЦ по образованию на ж.д. транспорте, 2020. — 376 с.
5. Калинин В. П. Великий Сибирский путь. — М.: Транспорт, 1991. — 247 с.
6. Почтовые карточки. Строительство Транссибирской магистрали. — М.: Издательство «Железнодорожное дело», 2001.
7. Ламин В. А., Пленкин В. Ю., Ткаченко В. Я. Глобальный трек: развитие транспортной системы на востоке страны. — Екатеринбург: УрО РАН, 1999. — 197 с.
8. Саблер С. В., Сосновский И. В. Сибирская железная дорога в её прошлом и настоящем. — СПб, 1903. — 460 с.
9. Казимиров В. Н. Великий Сибирский путь. — Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1984. — 142 с.
10. Циммерман Э. По Великой Сибирской железной дороге: путевые заметки // Вестник Европы. — 1903. — № 2.
11. Сапилов Е. В. Из истории сооружения Сибирской железнодорожной магистрали (к 100-летию завершения строительства). — М.: 2001. — 137 с.
12. Сигалов М. Р., Ламин В. А. Железнодорожное строительство в практике хозяйственного освоения Сибири. — Новосибирск, 1988. — 130 с.
13. Rehbein, E. Der Bahn Der Transsibirischen Eisenbahn eine eisenbahntechnische Pionierleistung, Eisenbahn — Jahrbuch, 1982, Berlin, pp. 118–127. [Электронный ресурс]: <https://www.ebay.de/itm/Eisenbahn-Jahrbuch-1982-VEB-Transpress-DDR-/120728289733>. Доступ 17.01.2020.





Construction of the Great Siberian Route



Levin, Dmitry Yu., Russian Academy of Natural Sciences (RAE), Moscow, Russia.*

Dmitry Yu. LEVIN

ABSTRACT

The construction of the Great Siberian Route is a heroic page of Russia. The article examines the main milestones of epoch-making construction. In 1837, there were no railways in Russia yet, and proposals for construction of the Trans-Siberian Railway had already begun to be heard. The government has discussed this issue on several occasions. The opinion of the Minister of Finance A. I. Vyshnegradsky is indicative:

«The Siberian railway is needed, but the country has more important issues». The situation changed dramatically in 1892 with appointment of S. Yu. Witte as Minister of Finance. He found necessary funding, supervised the construction site and resettled people to Siberia. The article, illustrated by several photos of the time, shows the unprecedented scale of railway construction in difficult natural conditions and under tight deadlines.

Keywords: *Trans-Siberian Railway, history of transport, Committee of the Siberian Railway, surveys, design, construction, resettlement to Siberia, artificial structures, field development.*

*Information about the author:

Levin, Dmitry Yu. – D.Sc. (Eng), corresponding member of RAE, Moscow, Russia, levindu@yandex.ru.

Article received 10.10.2019, accepted 17.01.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 190.

Topic of construction of Siberian railway (this is how the modern Trans-Siberian Railway was modestly called at first) is so significant that every year, especially on anniversary dates, numerous publications are devoted to this event. The Trans-Siberian Railway is included in the famous Guinness Book in several nominations at once. Until now, the Trans-Siberian Railway is the longest double-track and fully electrified railway in the world.

The first design proposals for construction of the Trans-Siberian Railway began to arrive back in 1837. In 1857, surveys began in various regions of Siberia and the Far East. From 1869 the directions of the lines began to be chosen.

In 1872–1874 government surveys were carried out, which identified three main directions:

1. Kineshma–Vyatka–Perm–Yekaterinburg (933 versts).
2. Nizhny Novgorod–Kazan–Krasnoufimsk–Yekaterinburg (1172 versts).
3. Alaty–Ufa–Chelyabinsk (1173 versts).

Since 1875, the directions of the Siberian railway have been regularly discussed at the meetings of the Committee of Ministers. In 1877, the railway network of the European part

of Russia reached the Urals. Alexander II and then Alexander III approved the decisions of the Committee of Ministers [1].

In 1886, Alexander III wrote a resolution: *«How many reports of the governors-general of Siberia I have read and I must confess with sadness and shame that the Government has so far done almost nothing to meet the needs of this rich but neglected region! And it's time, very time»* [2].

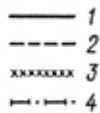
On March 17, 1891, Alexander III handed over to the heir-tsarevich (future Emperor Nicholas II) a rescript: *«I command now to begin construction of a continuous railway across all Siberia, which has to connect Siberian regions, abundant gifts of nature, with a network of internal railway communications, I instruct you to announce also My will upon your entry into the Russian land again after observing the foreign countries of the East. At the same time, I am entrusting you with commissioning in Vladivostok of laying of the permitted for construction at the expense of the treasury and the direct order of the Government of Ussuriysk section of the great Siberian railway route»* [2].

The command of this rescript was executed on May 19, 1891, when, having landed in Vladivostok, the heir-Tsarevich laid the



Pic. 1. An engraving from a photograph of the Tsarevich carrying the first wheelbarrow of land to the place where Ussuriysk railway was laid. Photo: portal «Old Vladivostok». Source: <https://primamedia.ru/news/493214> [3].





3 – ferry and ice crossings; 4 – state border [4].



Pic. 3. Scheme of Ussuriysk railway [3].



Pic. 4. Sergey Yulievich Witte (1849–1915) [6].

foundation stone there (Pic. 1) of the future Siberian railway (Pic. 2). This was the beginning of Ussuriysk railway, which runs from Vladivostok to Khabarovsk (Pic. 3).

In the spring of 1891, work began on Ussuriysk line under the leadership of

O. P. Vyazemsky, but due to a lack of funds released, construction proceeded slowly.

In July 1891, a note was prepared at the Ministry of Railways, which determined time and procedure for construction of Siberian railway, as well as the required loans. The note



Pic. 5. Terminal of the station Chelyabinsk [4].

was forwarded to the Minister of Finance I. A. Vyshnegradskiy, who gave evasive answers and did not show initiative in finding the necessary funds. I. A. Vyshnegradskiy believed that Siberian railway was needed, but the country had more important issues.

The situation changed dramatically when S. Yu. Witte was appointed to the post of Minister of Finance on August 30, 1892 (Pic. 4). He showed energy and initiative in finding sources of financing for construction of Siberian railway, and proposed to divide all work into three stages. First of all, to build West Siberian section from Chelyabinsk (Pic. 5) to the Ob (1328 versts) and Central Siberian section from the Ob to Irkutsk (1754 versts), to complete construction of Vladivostok–Grafskaya section and to build a connecting branch between Ural Gornozavodskaya and Siberian railways [5].

Establishment of wine monopoly and introduction of a gold-backed ruble allowed the state, thanks to the resulting budget surplus, not to resort to emergency financing methods. At the beginning of construction, the treasury had an amount of 1 million rubles, while the preliminary estimate included 350 million rubles. The seemingly grandiose amount was eventually exceeded three times and amounted to almost 915 million rubles.

Sergey Witte proposed to establish a special supreme body – the Committee of Siberian Railway – from the ministers of the interior, state property, finance and communications and the state controller. Later, the Committee included the Minister of War, the head of the Naval Ministry and the actual privy counselor, Academician N. Kh. Bunge.

On January 14, 1893, by the rescript of Alexander III, the heir-Tsarevich was appointed chairman of the Committee of Siberian railway.

The committee met regularly and considered the issues of establishing the Office for construction of railway, timing of surveys and construction, the progress of work. At one of the Committee's meetings, the question of resettlement of peasants from European Russia to Siberia was raised in principle (Pic. 6). Emperor Alexander III approved the journal of Siberian Committee, which expressed the idea of usefulness of resettlement for national interests and the idea of the harm of artificially hindering this resettlement [2].

The Transsib had a tremendous impact on the fate of Russia. It is officially known that the annual number of immigrants to Siberia, until the 1880s did not exceed two thousand people. At the beginning of the last decade of 19th century, the number of immigrants reached 50 thousand, and since 1896, thanks to Siberian





Pic. 6. Resettlement settlement near the station Kansk [4].



Pic. 7. Scheme of West Siberian railway [6].

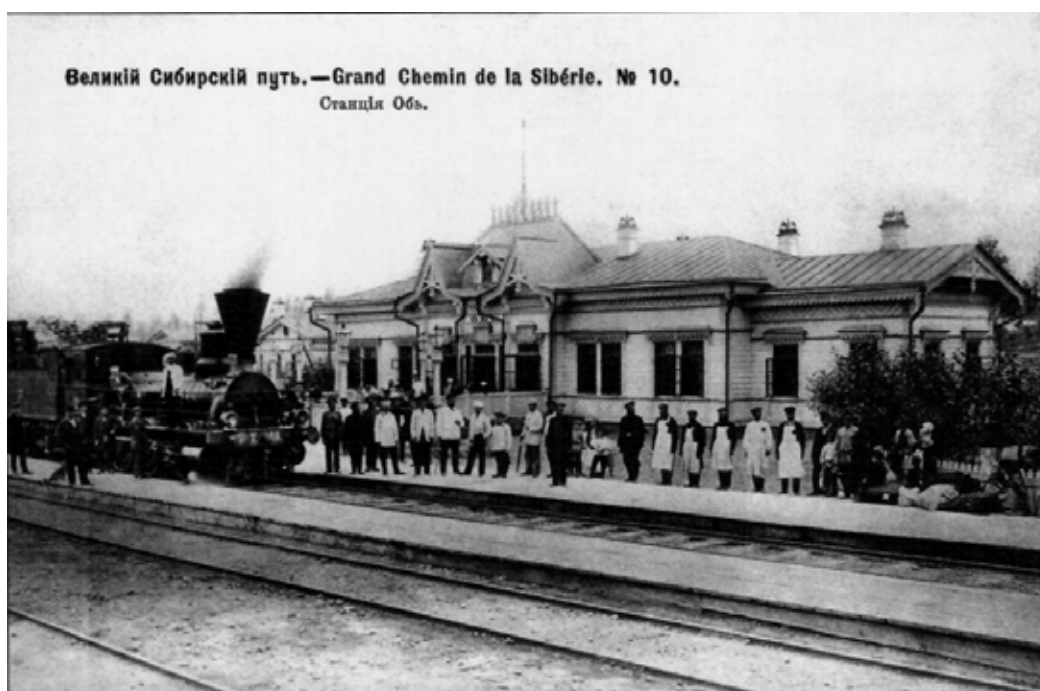
railway, it increased to 200 thousand, and in two and a half years (from 1907 to June 1909) about 2 million immigrants arrived in Siberia [7]. All this movement came mainly from the central chernozem provinces of European Russia. From 1897 to 1914, the population of Siberia increased from 4,6 to 7,6 million people, the population of the Far East – from 0,9 to 1,6 million. The settlement scheme has changed. Instead of the coast of rivers and highways, the predominant settlement of the area began along the highway and branches from it [2].

The project of the first section of West Siberian railway (Pic. 7) from Chelyabinsk to Omsk was considered by the Committee at the beginning of 1892. On May 8, 1892, it was approved by Alexander III, and on July 7, 1892, construction began.

At the beginning of 1893, the project of the second part of West Siberian railway was presented, and in the same spring, work began on the second part. Already on August 30, 1894, temporary traffic was opened to Omsk (Pic. 8), and laying of the track was brought to the Ob (Pic. 9) on August 19, 1895. Already on



Pic. 8. Omsk station [6].



Pic. 9. Great Siberian Route. Ob station [6].

October 15, 1895, temporary traffic was opened throughout West Siberian railway.

On West Siberian railway, under the leadership of the chief of works, K. Ya. Mikhailovsky (Pic. 10), 274 artificial structures were erected, ten depots and 38 water supply points were built. A telegraph line was

built along the railway on poles, set at 20 per mile, i.e. 9–10 per kilometer, with a steel wire with a cross section of 5 mm stretched in two rows. This standard was subsequently adopted throughout the Trans-Siberian Railway [8].

After the death of Alexander III, Nicholas II, who ascended the throne, retained the title of





Pic. 10. Konstantin Yakovlevich Mikhailovsky (1834–1909) [6].

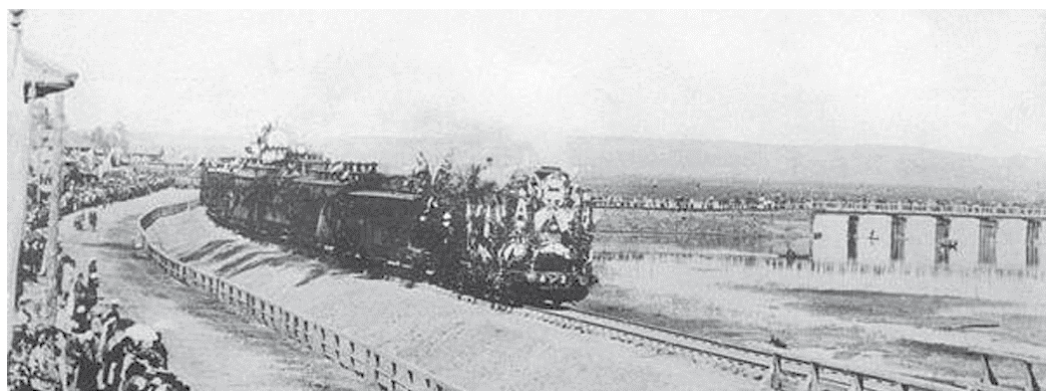
chairman of Siberian Railway Committee. 11 meetings of the Committee until December 1897 were held under the personal chairmanship of Nicholas II.

The construction of Central Siberian railway on the section from the Ob to Krasnoyarsk (711 versts) was started in May 1893 and on January 1, 1898 this section was put into operation. The bridge across the Yenisei (Pic. 11) was called the bridge of the century, because it was the first in Russia and the second on the Eurasian continent in terms of spans – 145 m. Work on remaining sections of Central Siberian Railway began in summer of 1894 and was commissioned in 1899 (Pic. 12).

Compared to Western Siberia, it was more difficult to work here because of the harsher climate. Working period, i.e. warm season, when construction could be carried out on a wide front, was here only a hundred days a year



Pic. 11. The bridge across the Yenisei [6].



Pic. 12. Arrival of the first train to Irkutsk [3].



Pic. 13. Construction of the Trans-Siberian railway [6].

(Pic. 13). Construction became more difficult and more expensive due to low population density and taiga thickets. S. Yu. Witte emphasized that the work was especially difficult in the taiga, impassable over a vast area, with the exception of rare hunting trails, and consisting of a dense mixed forest with a marshy topsoil, an average thickness of about one arshin, covered with powerful herbaceous vegetation. Work in the taiga could only be started after construction of roads consisting of a row of logs laid side by side; then it was necessary to drain the upper layers of the soil using a network of drainage channels and clear the upper layer of dead wood, needles and foliage, entangled by the roots of trees and plants [2].

It was difficult to find persons in this area who would undertake execution of contracts and supplies. The work supervisor, N. P. Mezheninov (Pic. 14), was very demanding about selection of contractors for complex work and preferred to conclude contracts only with those who had already proven themselves on the positive side [9].

During construction of Central Siberian Railway, Tomsk remained on the sidelines. On July 29, 1895, it was allowed to build a branch to Tomsk. Work began immediately, and on July 22, 1896, the first train followed the branch,



Pic. 14. Nikolay Pavlovich Mezheninov (1838–1915) [6].

and temporary traffic was opened. On January 1, 1898, Taiga–Tomsk branch (82 versts) (Pic. 15) was put into operation.

In the summer of 1896, headed by A. N. Pushechnikov (Pic. 16), work began on the section from Irkutsk to Lake Baikal. It was





Pic. 15. Taiga station [6].



Pic. 16. Alexander Nikolaevich Pushechnikov (1850–1916) [3].

difficult to work in difficult environmental conditions. Floods from storm water, permafrost, mountainous terrain – all this made it necessary to quickly change the

position of the route, the marks of embankments, the number and location of openings of culverts. This part of the Transsib was accepted into permanent operation in 1901 [10].

After the Russo-Japanese War of 1904–1905 the connection of Ussuriysk line with the Trans-Baikal railway along Chinese-Eastern Railway became unreliable due to transfer of South Manchuria to Japan. Therefore, the Chairman of the Council of Ministers S. Yu. Witte proposed to return to the project of Amur railway again.

Amur main line was divided into three sections: western, middle and eastern. In 1907, work began on the western section from Kuenga to Ugryum (636 km). The construction management of this section was based in Nerchinsk, which was headed by E. Yu. Podrutzky. Construction of the western section was completed in 1913. A train with a church-car was the first to travel along the railway (Pic. 17). Prayers were held at all stations.

Construction of a middle section 675 km long – from st. Kerak to st. Robin by the Bureya River – led by V. V. Tregubov. Deaf taiga and vast swamps seriously impeded work in this part of the Transsib. The labor of convicts was used here. When passing the swamps, a temporary railway was first built on a wooden base,



Pic. 17. Church-car on the section Bochkarevo–Blagoveshchensk, 1913 [3].

representing a system of longitudinal and transverse slopes. The soil was tumbling along it, which was poured onto the log floors. Often, whole links of the finished road disappeared without a trace in the marshes, and work was resumed again. In these conditions, it was necessary to create a complex network of ditches and canals. The plans for construction of the section included construction of a 108 km branch to Blagoveshchensk. In 1914, the entire middle section of Amur railway was commissioned.

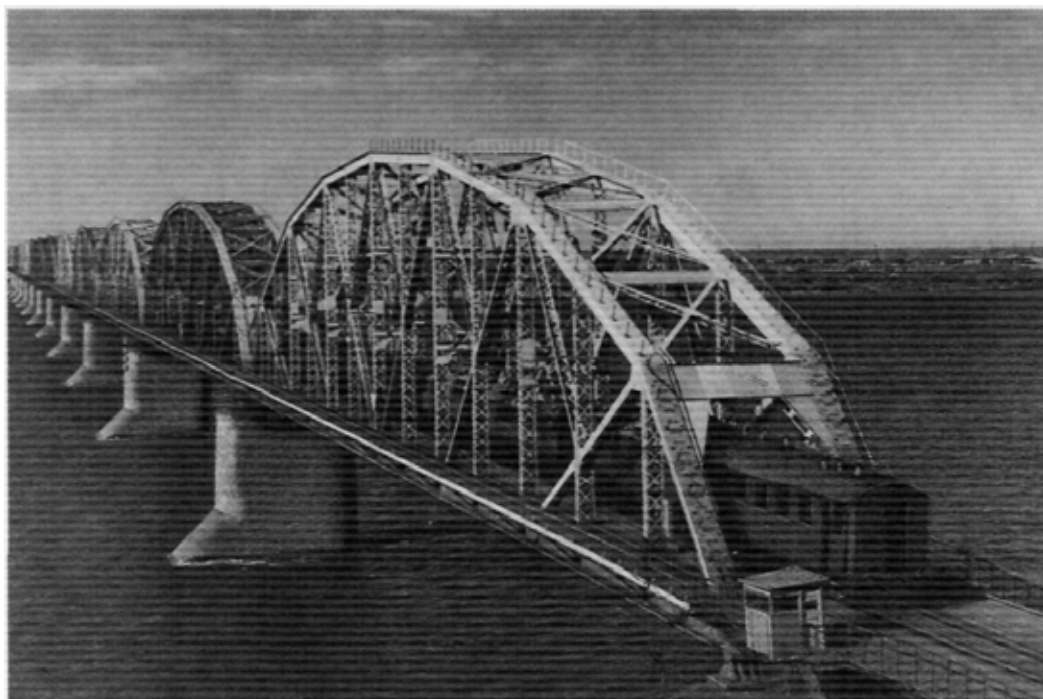
The last part of the railway was the eastern section with a length of 497 km – from Malinovka to Khabarovsk. The construction of the line in 1912 was started by M. S. Navrotsky, but a few months later he was replaced by A. V. Liverovsky, who headed construction for four years. The eastern section, unlike others, was built using the economic method. The entrepreneurs were given the responsibility of building a bridge across the Amur (Pic. 18). A. V. Liverovsky succeeded in mechanizing earthworks on a large scale. In this case, three single-bucket and seven multi-bucket excavators were used, manufactured at Putilov plant. For transportation of soil and other materials, trucks were used for the first time. On many kilometers of shallow bogs, roadbed

was erected in an original way. In winter, rails were laid here on the ice, and then sandy soil was poured along this winter road. In spring, after settling, a rail track was laid on it and multi-bucket excavators were launched, which excavated excavations on both sides of the track, laying suitable clay soil into the body of embankment to design marks.

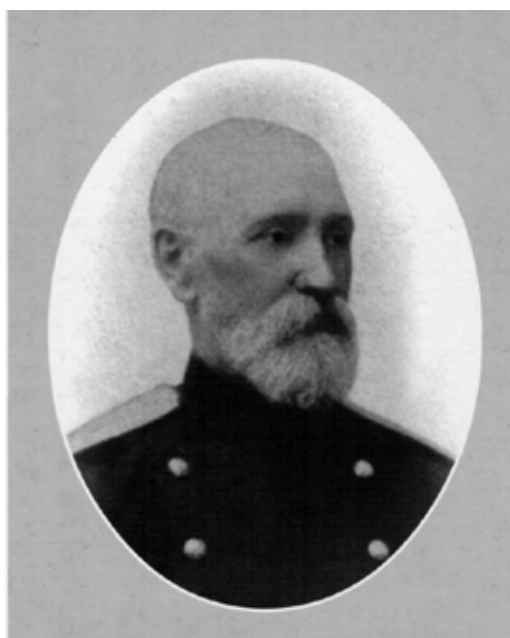
On the section, eight tunnels had to be built for two tracks. One of them, 1,5 km long, was pierced through the rocks of Khingan; the other, 820 m long, turned out to be watery; the third, 420 meters high, passed through the strata of rocks with permafrost; the fourth – in soils with aggressive sulfuric acid waters. The manufacturers of works on construction of tunnels were A. N. Passek and V. N. Pisarev, who widely used new devices and mechanisms in construction: compressors, pneumatic perforators, rock crushers, etc. In 1915, the last section of Amur railway was commissioned.

In the names of many stations and sidings of the Trans-Siberian Railway, the names of the Minister of Railways, Prince M. I. Khilkov (station of Khilkov), Amur general-governors A. N. Korf (station Korfovskaya) and N. I. Grodekov (station Grodekovo) etc. Stations Kurdyumovka, Rozengartovka, Sviyagino, Dermidontovka, etc., passing





Pic. 18. Bridge across the Amur near Khabarovsk [6].



Pic. 19. Nikolay Pavlovich Petrov (1836–1920) [8].

points Knorring, Drozdov, Kraevsky, Ryzhev, Eberhard, Snarskaya, Kruglikovo, etc. named after railway engineers [11].

A significant drawback of Siberian railway was one track, which is why it could not pass

more than eight pairs of trains per day. In 1903 professor N. P. Petrov (Pic. 19) surveyed Siberian railway and identified the mountainous sections Achinsk–Nizhneudinsk and Zima–Polovina, which limited the carrying capacity. He substantiated the need to reduce slopes by bypassing difficult places. However, these reconstruction measures were not enough. In October 1904, a decision was made to build a second main track on Siberian railway. The technical conditions for reconstruction of the railway were developed by N. P. Petrov [12]. The works began in October 1904.

And ten years after construction of the railway in Siberia, construction of second tracks on the Trans-Siberian (1907–1910) began, which turned into a radical reconstruction of the existing line and made it possible to dramatically increase the capacity of the main line. The direction has completely become double-track. The construction of the Trans-Siberian Railway was completed in 1916 (Pic. 20).

About seven thousand artificial structures (tunnels, bridges, viaducts, pipes and retaining walls) were built on the Transsib, including West Siberian – 1184, Central Siberian – 1480,



Fig. 20. Scheme of the Trans-Siberian main line [8].

Circum-Baikal – 582, Transbaikal – 1183, Ussuriisk – 359.

During construction of the Trans-Siberian Railway, the Committee for Siberian Railway did a great job of exploring Siberia and the Far East. Geological expeditions went along with the builders. They discovered deposits of coal, iron ore, graphite, jade. S. Yu. Witte, who introduced the gold standard during this period, especially insisted on large-scale prospecting for gold deposits. Expeditions discovered and mapped gold deposits in North-East Siberia. Eastern Siberia, primarily Vitim and Olekma mines, yielded up to 75 % of the gold mined in Russia.

The construction of the main line contributed to rapid development of the once backward regions of Siberia and the Far East. Industry and agriculture received a powerful incentive to increase production and expand the sales market. The towns and villages through which the highway passed were transformed [13].

REFERENCES

1. Zenzinov, N. A. From Petersburg-Moscow to Baikal-Amur Mainline [Ot Peterburg-Moskovskoi do Baikalo-Amurskoi magistrali]. Moscow, Transport publ., 1986, 215 p.
2. Trans-Siberian and Baikal-Amur main lines – a bridge between the past and the future of Russia [Transsibirskaya i Baikal-Amurskaya magistrali – most mezhdu proshlym i budushchim Rossii]. Moscow, Publishing house of the center «Transport», 2005, 348 p.

3. History of railway transport in Russia [Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii]. Vol. 1: 1836–1917. St. Petersburg, 1994, 336 p.
4. Levin, D. Yu. S. Yu. Witte – a railway worker, an outstanding statesman [S. Yu. Witte – zheleznodorozhnik, vydayushchiysya gosudarstvennyi deyatel']. Moscow, FGBU DPO «Educational and methodological center for education in railway transport», 2020, 376 p.
5. Kalinichev, V. P. The Great Siberian Route [Velikiy Sibirskiy Put']. Moscow, Transport publ., 1991, 247 p.
6. Postcards. Construction of the Trans-Siberian railway [Pochtovie kartochki. Stroitelstvo Transsibirskoi magistrali]. Moscow, Zheleznodorozhnoe delo, 2001.
7. Lamin, V. A., Plenkin, V. Yu., Tkachenko, V. Ya. Global track: development of the transport system in the east of the country [Globalniy trek: razvitie transportnoi sistemy na vostoke strany]. Yekaterinburg, UrO Ran, 1999, 197 p.
8. Sabler, S. V., Sosnovsky, I. V. Siberian railway in its past and present [Sibirskaya zheleznyaya doroga v ee proshlom i nastoyashchem]. St. Petersburg, 1903, 460 p.
9. Kazimirov, V. N. The Great Siberian Route [Velikiy Sibirskiy Put']. Irkutsk, East-Siberian publishing house, 1984, 142 p.
10. Zimmerman, E. On the Great Siberian Railway: travel notes [Po Velikoi Sibirskoi zheleznoi doroge: putevie zametki]. Vestnik Evropy, 1903, Iss. 2.
11. Sapilov, E. V. From the history of construction of Siberian railway (to the 100th anniversary of completion of construction) [Iz istorii sooruzheniya Sibirskoi zheleznodorozhnoi magistrali (k 100-letiyu zaversheniya stroitelstva)]. Moscow, 2001, 137 p.
12. Sigalov, M. R., Lamin, V. A. Railway construction in the practice of economic development of Siberia [Zheleznodorozhnoe stroitelstvo v praktike khozyaystvennogo osvoeniya Sibiri]. Novosibirsk, 1988, 130 p.
13. Rehbein, E. Der Bahn Der Transsibirischen Eisenbahn eine eisenbahntechnische Pionier-leistungp, Eisenbahn-Jahrbuch, 1982, Berlin, pp. 118–127. [Electronic resource]: <https://www.ebay.de/itm/Eisenbahn-Jahrbuch-1982-VEB-Transpress-DDR-/120728289733>. Last accessed 17.01.2020. ●





Евгений Оскарович Патон (к 150-летию со дня рождения)



Григорьев Николай Дмитриевич – кандидат технических наук, Москва, Россия.*

Николай ГРИГОРЬЕВ

Статья посвящена Евгению Оскаровичу Патону – выдающемуся советскому учёному, обладавшему блестящим инженерным талантом. Именно он создал уникальную школу мостостроения. Самое известное творение Евгения Оскаровича носит его имя, – это знаменитый мост Патона в Киеве.

Е. О. Патон – автор более 300 научных трудов и нескольких теоретических курсов по мостостроению и сварке: «Расчёт сквозных ферм с жёсткими узлами», «Железные мосты» в 4 томах, «Деревянные железнодорожные мосты», «Автоматическая сварка голым электродом под слоем флюса», фундаментальный учебник «Курс мостов» в 5 томах и другие. Организатор и главный редактор журнала «Автоматическая сварка» (1949–

1953). По многим его учебникам учатся до сих пор.

Имя выдающегося учёного носят НИИЭС ВУАН в Киеве (с 1945), цельнометаллический 1542-метровый мост через Днепр в Киеве (с 1953), малая планета, улицы в Днепропетровске, Львове, Херсоне, Нижнем Тагиле, Омске, Макеевке. В Киеве здания Киевского политехнического института Е. О. Патону установлен памятник (2002), на фасаде главного корпуса КПИ, на фасаде здания института электросварки и на доме, в котором жил – мемориальные доски. Также мемориальная доска установлена в городе Днепропетровск на здании завода металлоконструкций им. И. В. Бабушкина.

Ключевые слова: мостостроение, электросварка, электросварка под флюсом, мост Патона, автоматизированная сварка, электросварочная дуга, сварочный шов.

*Информация об авторе:

Григорьев Николай Дмитриевич – кандидат технических наук, Москва, Россия, 9165688074@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 13.02.2019, принята к публикации 28.12.2019.

For the English text of the article please see p. 220.

Учёный в области мостостроения и электросварки, академик АН Украинской ССР Евгений Оскарович Патон родился 5 марта (20 февраля по старому стилю) 1870 г. в Ницце в семье русского консула [1–6].

Согласно архивным документам Департамента Герольдии Правительствующего Сената, он происходил из старинного дворянского рода, а вдобавок ко всему, крестными родителями у него были... «Его Императорское Высочество великий князь Вячеслав Константинович и Её Императорское Высочество княгиня Александра Иосифовна, место которой заступила фрейлина графиня Келлер»...

Сами Патоны объясняли редчайшую фамилию тем, что предков — корабельных мастеров — вывез из Голландии Петр I. Поскольку до революции Патоны перед фамилией имели частицу «фон», указывающую на дворянское происхождение у немцев, то, скорее всего, их род происходит из Германии. Мать будущего учёного — Екатерина Дмитриевна происходила из семьи штабс-ротмистра Шишкова. О рождении её сына, наречённого Евгением, имеется запись в метрических книгах православной церкви в Ницце (эту церковь у самого подножия Альп так и называли «русской») за 1870 год за № 2: «Свидетельство дано 1870 года февраля двадцатого дня (по новому стилю 5 марта) у российского консула отставного полковника гвардии Оскара Петровича Патона, лютеранского вероисповедания, и законной его жены Екатерины Дмитриевны, православного вероисповедания, — оба первым браком — родился сын Евгений, который того же года марта двадцать девятого дня был крещён священником Владимиром Левицким и псаломщиком Феодосием Гуляевым...».

Мальчик получил блестящее домашнее образование. Кроме родного русского языка он еще изучил французский, немецкий и английский, что потом ему при научных исследовательских работах очень пригодилось. «В семье царя строгая дисциплина. Нас, детей, в семье было семеро — пять братьев и две сестры. Больше всего отец не терпел лени и праздности. Девочкам ещё давались поблажки, но с мальчиков в семье спрашивали по всей строгости. Отец требовал, чтобы дома все говорили между собой



Рис. 1. Евгений Оскарович Патон.
5 марта 1870 г. – 12 августа 1953 г.

по-русски, но он же настоял, чтобы все мы, кроме родного языка, изучили ещё французский, английский и немецкий. За это я был благодарен отцу и через десятки лет» — вспоминал о своём детстве академик.

Старшие мальчики Патонов учились в Петербурге в Пажеском корпусе, так и Евгению была приготовлена служба при дворе, или, в крайнем случае, занятия помещичьим хозяйством в родительском имении в Денисковичах под Новозыбковым. Однако консул Оскар Петрович поддержал интерес сына к точным наукам. В Германии Евгения отдали прямо в седьмой класс реальной гимназии. Сначала была учёба в Штутгарте, потом в Бреслау, куда Оскара Петровича перевели из Ниццы также консулом. В выпускном классе и начались главные семейные баталии. Мать продолжала настаивать на Пажеском корпусе, а отец поддерживал сына, которого «более всего в жизни хотел... проектировать мосты»!

В 1892–1893 годах юноша служил по призыву в Российской армии в артиллерийских частях Киевского военного округа в звании фейерверкер (звание младшего командного состава в артиллерии, унтер-офицер).

Документы из германских архивов свидетельствуют о том, что Евгений Патон был



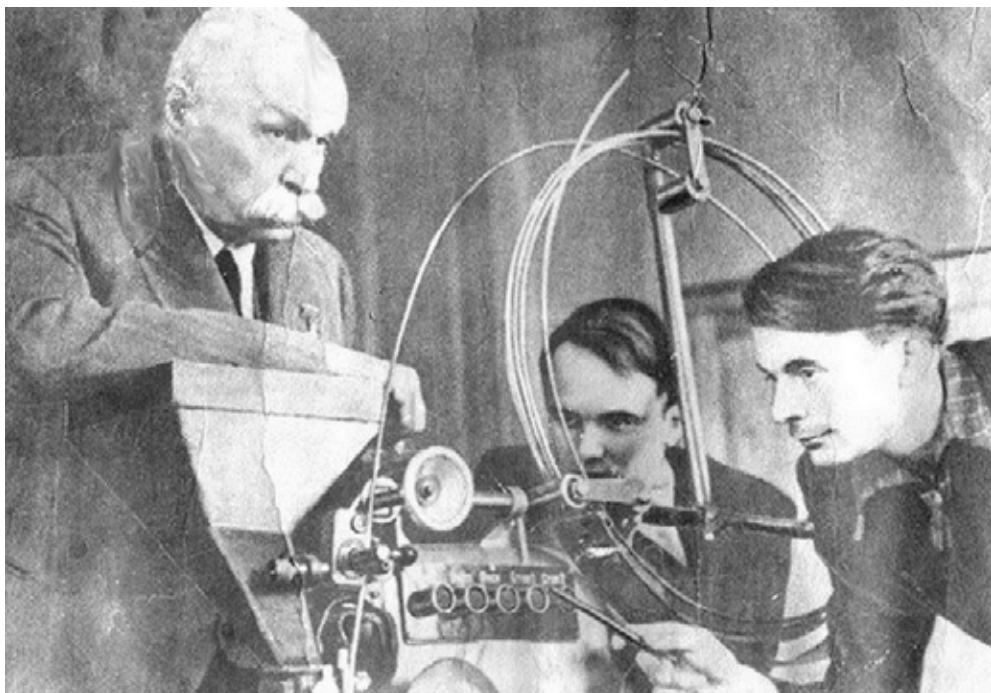


Рис. 2. Евгений Оскарович Патон в сварочной лаборатории.

«внесён в список учеников и слушателей Королевской Саксонской технической высшей школы». Именно там была самая серьёзная мостостроительная школа. На инженерном отделении Королевской Саксонской технической высшей школы с 1888 года он слушал лекции таких известных профессоров, как Цойнер, Моор, Френкель. Но в конце учёбы Патон пишет в Петербург: *«позвольте защищать диплом дома, в Императорском Институте путей сообщения»*. Но Петербург для получения серебряного значка русского инженера предложит Патону снова сесть на три года за студенческую скамью.

Прославленный профессор Вильгельм Френкель, заведовавший в Королевской школе кафедрой мостостроения и статике строительных сооружений, предложит Патону должность своего ассистента в техническом бюро, которое занимается перестройкой главного дрезденского вокзала — г-ну инженеру Патону доверили самостоятельное проектирование металлических конструкций (*«в количестве 62 500 пудов»* — уточняет один из архивных документов 1901 года).

На Рождество 1891 года Евгению Патону надлежало отбыть военную повинность.

Отец посоветовал: *«Тебе полезнее подышать воздухом Родины!»* — консул больше всего боялся, чтобы дети не выросли иностранцами...

В 1896 г. Патон получил диплом Санкт-Петербургского института (ныне университета) инженеров путей сообщения по специальности «Сооружение мостов». Здесь же и стал преподавать [7]. С 1896 г. работал в техническом отделе Петербурго-Московской (ныне Октябрьской) железной дороги, а в 1907 г. возглавил технический отдел службы пути Московско-Ярославско-Архангельской (ныне Северной) железной дороги. В 1899 г. его пригласили преподавателем в Московское инженерное училище путей сообщения (ныне Российский университет транспорта), которое было открыто в 1896 г. [8; 9]. После успешной защиты докторской диссертации в 1901 г. и издания двухтомного учебника, его назначили на должность экстраординарного (сверхштатного) профессора и инспектором училища.

В 1904 г. Евгений Оскарович переезжает в Киев, где его назначают деканом инженерного факультета и заведующим кафедрой мостов Киевского политехнического института, где полностью и рас-

крывается талант инженера Патона. Во время Первой мировой войны молодой учёный активно работает с военными. Благодаря ему русские инженерные войска получили специальные разборные мосты — как шоссейные, так и железнодорожные. В политехническом институте преподавал вплоть до 1938 г.: в 1904—1912 годах декан инженерного факультета, в 1905—1929 годах — заведующий кафедрой мостов, 1935—1939 заведующий кафедрой сварки. В 1921—1931 годах он был также начальником Киевской мосто-испытательной станции.

Учёный первым начал разрабатывать проекты стальных разборных мостов, победивших на международном конкурсе проекты французского инженера строителя мостов и виадуков А. Г. Эффеля, автора знаменитой башни. Эти мосты получили название мостов Патона. По его проектам в 1896—1929 годах было построено свыше 50 железных клёпанных шоссейных и железнодорожных мостов. Он заложил основы школы мостостроения (целесообразное проектирование, удешевление проектов и строительства мостов за счёт новаций в конструктивных формах и экономичности использования металлов) и проводил научные исследования в области прочности, устойчивости и динамики мостов. За выдающиеся заслуги в области мостостроения [10] его в 1929 г. избрали действительным членом Всеукраинской академии наук (ВУАН, теперь НАН Украины), в 1935—1953 годах — членом Президиума ВУАН (АН УССР), в 1945—1952 годах — вице-президентом АН УССР.

В 1928 г. Патон приступил к изучению проблем электрической сварки металлов, используемой в то время при ремонте железных мостов, так как его работами в области прочности и надёжности неразъёмных соединений металлов [11] была теоретически и экспериментально доказана высокая техническая и экономическая эффективность замены клёпанных металлоконструкций сварными.

Первое пристанище для своих экспериментов Евгений Патон получает на киевском заводе «Большевик», где уже работал сварочный цех. Лаборатория Патона состоит всего из одного инженера-электрика и сварщика-энтузиаста. Идея заняться



Рис. 3. Евгений Оскарович Патон с макетом танка Т-34.

электросваркой вызвала в академической среде лёгкое недоумение. Многие считали, что тема узкая, не для видного учёного, а для рядового инженера. Но АН УССР выделяет три комнаты в подвале бывшей гимназии.

Изобретатель настаивает, что должен работать рука об руку с промышленностью! «...Электросварочная лаборатория должна не выпускать пухлые научные отчёты, а по-настоящему помогать промышленности осваивать новые способы сварки металла. Я предупреждал их, что придётся много бывать на заводах, помогать там справляться с трудностями освоения сварки, готовить для заводов кадры, драться со сторонниками клёпки...» — писал Евгений Оскарович в мемуарах. И работа лаборатории была теснейшим образом связана с производством. Все разработки сразу же передавались на производство. На Днепропетровском заводе металлоконструкций сбылась давняя мечта Евгения Патона, — предприятие приступило к выпуску балок для мостов цельносварочной конструкции. Так два главных дела жизни Евгения Оскаровича соединились в одно.

Харьковский завод «Серп и молот» прислал в лабораторию на испытания каркасы двух молотилок — клёпанный и сварной. По итогам испытаний харьковчане перешли целиком на сварку. Кроме этого, лаборатория Патона отказывается от закупок импортного научного оборудования —



решено строить свои испытательные стенды и машины.

Электросварочную лабораторию и Электросварочный комитет Евгений Патон возглавлял с 1929 по 1934 годы. В 1930 годы он усовершенствовал дуговую электросварку металлическим электродом, изобретённую в 1888 г. русским инженером Н. Г. Славяновым [12], и опубликовал первые монографии, в которых обобщил основные принципы расчёта и проектирования сварных конструкций, сформулировал основные положения по технологическим основам электродуговой сварки. Занимался вопросами, связанными со сварными соединениями и конструкциями, с их прочностью и эксплуатационной надёжностью, оптимальной формой, с реакцией на статические и динамические нагрузки, свойствами электросварочной дуги и сварочного шва, механизацией и автоматизацией электросварочных работ и т.д. В 1932 г. под его руководством была разработана автоматическая сварочная головка [13] для электросварки открытой дугой. Им был создан поточный метод электросварочных работ и их технологии в особых условиях разной сложности, были разработаны промышленные поточные электросварочные линии.

В 1934 г. на базе Электросварочной лаборатории и Электросварочного комитета учёным был организован первый в мире научно-исследовательский институт электросварки (НИИЭС) ВУАН, который с 1945 г. носит имя Патона, и был его директором в 1934—1953 годах. Особенностью НИИЭС была всё та же тесная связь с производством. Новейшие научные методы электросварки и созданное в НИИЭС оборудование немедленно внедрялись в народное хозяйство, что позволяло в кратчайшие сроки решать проблемы практического применения электросварки. В 1940 г. он стал заслуженным деятелем науки УССР и изобрёл новый способ электросварки под флюсом, который в дальнейшем стал основным при прокладке газопроводов, производстве вагонов, котлов, балок для мостов и других конструкций. В 1941 г. за разработку метода и аппаратуры скоростной автоматической электросварки ему была присуждена Государственная премия первой степени.

22 июня 1941 года Евгений Патон (учёному уже за 70 лет) встретил в поезде — он направлялся на Уральский танковый завод в командировку. Учёный должен был организовать сварку броневых листов стали. Узнав о начале войны, Евгений Оскарович прямо из вагона отправил письмо Сталину: *«Родина в опасности, и я хочу свои последние силы отдать её защите»*. По рекомендации учёного Киевский институт электросварки эвакуировали в Нижний Тагил и размещён на Уралвагонзаводе № 183, где НИИЭС уже была внедрена автоматическая сварка в производстве грузовых вагонов из конструкционных низкоуглеродистых сталей.

Созданные ещё до войны танки Т-34 и КВ по большинству параметров превосходили немецкие аналоги. Главная задача, которую поставили перед собой в институте Патона, — достичь прочности сварного шва, превосходящую прочность самой броневой плиты. До того момента советские танки варили вручную, что требовало участия специалиста-сварщика очень высокой квалификации. Да и сам процесс был очень долгим и трудоёмким. Автоматизированная сварка должна была снизить требование к квалификации рабочего и ускорить процесс. Эвакуированный институт, по сути, превратился в один из цехов танкового завода.

Технология автоматической сварки под флюсом в 1942 году была внедрена в производство танков, авиабомб, других боеприпасов. Её применение в пять—восемь раз ускорило сварочное производство и параллельно снизило требования к квалификации сварщика. Аппаратом Патона мог пользоваться даже подросток. Процесс производства танков невиданно ускорился, прочные сварочные швы выдерживали удары бронебойных снарядов. До самого конца войны никто в мире не смог повторить эту технологию! Автоматический сварочный аппарат Патона можно смело поставить в галерею оружия Победы вместе с легендарными «Катюшей», штурмовиком Ил-2 и Т-34. За годы войны общая длина «патоновского шва» составила шесть тысяч километров!

Чтобы представить степень надёжности патоновских бронированных богатырей, достаточно привести слова директора эва-

куированного в Нижний Тагил из Харькова танкового завода № 183 Юрия Максарева: «Понадобилось расширить территорию «Уралвагонзавода» под цеха для новой, мирной продукции. А возле проходной стоял памятник — танк, «тридцатьчетверка» № 35000. 26 мая победного 1945 года, именно в тот день, когда завод был награждён четвёртым боевым орденом, она сошла с конвейера просто на пьедестал. В 1975-м танк этот расконсервировали от заводского смазочного масла, заправили горючим. И своим ходом, будто только что, а не три десятилетия тому назад сошёл он с конвейера, ветеран Т-34 поднялся на новый пьедестал возле новой проходной».

За вклад в укрепление обороноспособности страны в трудных условиях военного времени в 1943 г. Патону было присвоено звание Героя Социалистического Труда. В 1944 г. он вернулся из эвакуации в Киев, возглавил восстановление НИИЭС, занимался вопросами усовершенствования процесса автоматизации электросварки и исследованиями по созданию научных основ электросварки, а также электросварки в углекислом газе. В 1946 и 1950 годах был избран депутатом Верховного Совета СССР. В 1946–1953 годах им комплексно разрабатывались физико-металлургические и тепловые основы электросварки, научные основы механизации и автоматизации электросварочных процессов, создавалась теория прочности сварных конструкций и соединений, решались проблемы электросварного мостостроения, внедрения электросварки в промышленность, возглавлялись работы по проектированию и изготовлению первых цельносварных мостов с применением автоматической электросварки. В 1953 г. был сдан в эксплуатацию цельнометаллический автомобильный мост через р. Днепр в Киеве длиной 1542 м, который был создан без единой заклёпки и стал носить имя мост Патона. Всего по его проектам было построено свыше 100 сварных металлических шоссейных и железнодорожных мостов. Коллектив НИИЭС решил проблему автоматической электросварки под флюсом вертикальных швов. Он внёс большой вклад в создание новых промышленных способов производства металлических труб, судов, железнодорожных вагонов,

шахтных вагонеток, строительство магистральных трубопроводов, негабаритных резервуаров, доменных конструкций, корпусов баллистических межконтинентальных и спутниковых ракет и других объектов, а изобретение электрошлаковой сварки решило проблему производства конструкций из заготовок практически неограниченной толщины.

Евгений Оскарович Патон умер 12 августа 1953 г. на 84 году жизни, похоронен в Киеве на мемориальном Байковом кладбище. После смерти издательством АН УССР были опубликованы избранные его научные труды [14; 15]. Он автор более 300 фундаментальных печатных научных трудов, организатор и редактор журнала «Автоматическая сварка», награждён 5 орденами и многочисленными медалями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лёшин Б. В. Патон Евгений Оскарович // Большая Советская энциклопедия. — Т. 19. — М.: Советская энциклопедия, 1975. — С. 280–281.
2. Чарницкая Л. П. Патон Евгений Оскарович // Новая Российская энциклопедия. — Т. XII (2). — М.: Энциклопедия, 2014. — С. 352.
3. Патон Евгений Оскарович // Советский энциклопедический справочник. — М.: Советская энциклопедия, 1985. — С. 973.
4. Патон Евгений Оскарович // Железнодорожный транспорт. Энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. — С. 551.
5. Чеканов А. А. Евгений Оскарович Патон. 1870–1953. — М.: изд-во АН СССР, 1963. — 182 с.
6. Патон Евгений Оскарович: Воспоминания. — М.: Молодая гвардия, 1958. — 364 с.
7. Минин Г. А., Апатцев В. И. Петербургский институт инженеров железнодорожного транспорта (ПИИТ) // Железнодорожный транспорт. Энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. — С. 301–302.
8. Минин Г. А., Апатцев В. И. Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) // Железнодорожный транспорт. Энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. — С. 240–241.
9. Тимошин А. А. Железнодорожное образование // Железнодорожный транспорт. Энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. — С. 134.
10. Носарев А. В. Искусственные сооружения // Железнодорожный транспорт. Энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. — С. 170.
11. Патон Е. О. Опытное сравнение электросварочных и клёпанных прикреплений продольных балок к поперечным. — М.: Транспечать НКПС, 1930. — 28 с.
12. Григорьев Н. Д. Спасённые звонят колокола // Мир транспорта. — 2014. — № 2. — С. 244–256.
13. Патон Е. О. Автоматическая сварка в судостроении. — М.: Оборонгиз, 1934. — 40 с.
14. Патон Е. О. Избранные труды. — Т. 1. — Киев: Издательство АН УССР, 1959. — 579 с.
15. Патон Е. О. Избранные труды. — Т. 2. — Киев: Издательство АН УССР, 1961. — 449 с. ●





Evgeny O. Paton (to the 150th anniversary of the birth)



Grigoriev, Nikolay D., Ph.D. (Eng), Moscow, Russia.*

Nikolay D. GRIGORIEV

ABSTRACT

The article is dedicated to Evgeny Oskarovich Paton, an outstanding Soviet scientist with brilliant engineering talent. It was he who created a unique school of bridge building. The most famous creation of Evgeny Oskarovich bears his name – the famous Paton Bridge in Kiev.

E. O. Paton is the author of more than 300 scientific papers and several theoretical courses on bridge building and welding: «Calculation of end-to-end trusses with rigid joints», «Iron bridges» in 4 volumes, «Wooden railway bridges», «Automatic bare electrode welding under a layer of flux», fundamental textbook «Course of bridges» in 5 volumes and

others. Organizer and editor-in-chief of the journal «Automatic welding» (1949–1953). Many of his textbooks are still being used in the study process.

The beginning of Evgeny Paton's professional, research and teaching career was directly related to transport and railways, teaching at the then MIIT, where the future great scientist headed the department «Bridges and Tunnels» (founded in 1896). It was there that Evgeny Oskarovich worked until 1904. Paton's laboratory has survived to this day and even continues to be used in teaching, and documents and photographs related to the scientist are carefully kept in the university museum.

Keywords: bridge construction, electric welding, electric submerged arc welding. Paton bridge, automated welding, electric arc, welding seam.

*Information about the author:

Grigoriev, Nikolay D. – Ph.D. (Eng), Moscow, Russia, 9165688074@yandex.ru.

Article received 13.02.2019, accepted 28.12.2019.

For the original Russian text of the article please see p. 214.

A scientist in the field of bridge building and electric welding, academician of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Evgeny Oskarovich Paton was born on March 5 (February 20, old style), 1870 in Nice, in the family of the Russian consul [1–6].

According to the archival documents of the Heraldry Department of the Governing Senate, he came from an old noble family, and on top of that, his godparents were ... *«His Imperial Highness Grand Duke Vyacheslav Konstantinovich and Her Imperial Highness Princess Alexandra Iosifovna, whose place was taken by the maid of honor Duchess Keller...»*.

The Patons themselves explained the rarest surname by the fact that the ancestors – ship craftsmen – were taken out of Holland by Peter I. Since before the revolution the Patons had a particle «von» before the surname, indicating a noble origin among the Germans, most likely their family originates from Germany. The mother of the future scientist, Ekaterina Dmitrievna, came from the family of the staff captain Shishkov. About the birth of her son, named Evgeny, there is an entry in the birth registers of the Orthodox Church in Nice (this church at the very foot of the Alps was called «Russian») for 1870 under No. 2: *«The certificate was given in 1870 on February 20th day (March 5 new style) that the Russian consul, retired Colonel of the Guards Oscar Petrovich Paton, of the Lutheran religion, and his legal wife Ekaterina Dmitrievna, of the Orthodox faith, both by their first marriage, had a son, Evgeny, who was baptized by the priest Vladimir Levitsky and the psalmist in the same year of March 29th day by Feodosiy Gulyaev...»*.

The boy received an excellent education at home. In addition to his native Russian language, he also studied French, German and English, which later came in handy for his scientific research work. *«There was strict discipline in the family. There were seven of us children in the family – five brothers and two sisters. Most of all, my father did not tolerate laziness and idleness. The girls were still given concessions, but the boys in the family were asked to the fullest extent. Father demanded that everyone speak Russian to each other at home, but he also insisted that all of us, in addition to our native language, also learn French, English and German. For this I was grateful to my father,*



**Pic. 1. Evgeny Oskarovich Paton.
5 March 1870–12 August 1953.**

and dozens of years later», the academician recalled about his childhood.

The older Patons boys studied in St. Petersburg in the Corps of Pages, and so Evgeny was prepared to serve at the court, or, in extreme cases, to engage in landlord farming on his parent's estate in Deniskovichy near Novozybkov. However, the consul Oskar Petrovich supported his son's interest in the exact sciences. In Germany, Evgeny was sent straight to the seventh grade of a real gymnasium. First there was a study in Stuttgart, then in Breslau, where Oskar Petrovich was transferred from Nice as a consul. In the senior class, the main family battles began. The mother continued to insist on the Corps of Pages, and the father supported his son, whom *«most of all he wanted in life... to design bridges»*!

In 1892–1893, the young man served on conscription in the Russian army in the artillery units of Kiev military district with the rank of fireworker (the rank of junior command personnel in artillery, non-commissioned officer).

Documents from German archives indicate that Evgeny Paton was *«included in the list of students and listeners of the Royal Saxon Technical School»*. It was there that the most serious bridge-building school was located. At



the engineering department of the Royal Saxon Technical School since 1888, he attended lectures by such famous professors as Zeuner, Moor, Frenkel. But at the end of his studies, Paton wrote to St. Petersburg: *«Let me defend my diploma at home, at the Imperial Institute of Railways»*. But Petersburg, in order to receive a silver badge of a Russian engineer, will offer Paton to sit down again for three years at the student's bench.

The renowned professor Wilhelm Frenkel, who headed the department of bridge construction and statics of building structures at the Royal School, will offer Paton the position of his assistant in the technical bureau, which is engaged in reconstruction of the main Dresden railway station – Mr. engineer Paton – clarifies one of the archival documents of 1901).

On Christmas Day 1891, Evgeny Paton was to serve his military service. Father advised: *«It is more useful for you to breathe the air of the Motherland!»* – the consul was most of all afraid that the children would grow up as foreigners.

In 1896, Paton received a diploma of St. Petersburg Institute (now a university) of railway engineers with a degree in Bridge Construction. Here he began to teach [7]. From 1896 he worked in the technical department of Petersburg–Moscow (now Oktyabrskaya) railway, and in 1907 he headed the technical department of the track service of Moscow–Yaroslavl–Arkhangelsk (now Northern) railway. In 1899 he was invited to teach at Moscow Engineering School of Railways (now Russian University of Transport), which was opened in 1896 [8; 9]. After successfully defending his D.Sc. thesis in 1901 and publishing a two-volume textbook, he was appointed to the post of extraordinary (supernumerary) professor and inspector of the school.

In 1904, Evgeny Oskarovich moved to Kiev, where he was appointed dean of the engineering faculty and head of the department of bridges of Kiev Polytechnic Institute, where the talent of engineer Paton was fully revealed. During the First World War, the young scientist actively works with the military. Thanks to him, the Russian engineering troops received special collapsible bridges – both road and railway. He taught at Polytechnic Institute until 1938: in 1904–1912, dean of the Faculty of Engineering, in 1905–1929 – head of the department of bridges, 1935–1939 head of the department of

welding. In 1921–1931 he was also the head of Kiev bridge testing station.

The scientist was the first to develop designs for steel folding bridges, which won the designs of the French engineer, builder of bridges and viaducts, A.G. Eiffel, the author of the famous tower, at an international competition. These bridges are called Paton bridges. According to his designs, over 50 riveted iron road and railway bridges were built in 1896–1929. He laid the foundations for the school of bridge building (expedient design, cheaper projects and construction of bridges due to innovations in structural forms and the economic use of metals) and conducted scientific research in the field of strength, stability and dynamics of bridges. For outstanding services in the field of bridge building [10], in 1929 he was elected a full member of the All-Ukrainian Academy of Sciences (VUAN, now the National Academy of Sciences of the Ukraine), in 1935–1953 – a member of the Presidium of VUAN (Academy of Sciences of the Ukrainian SSR), in 1945–1952 – vice-President of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR.

In 1928, Paton began to study the problems of electric welding of metals, which was used at that time in repair of iron bridges, since his work in the field of strength and reliability of permanent metal joints [11] theoretically and experimentally proved high technical and economic efficiency of replacing riveted metal structures with welded ones.

Evgeny Paton got his first haven for his experiments at Kiev plant «Bolshevik», where a welding shop already worked. Paton's laboratory consists of just one electrical engineer and an enthusiastic welder. The idea of doing electric welding caused slight bewilderment in the academic environment. Many believed that the topic was narrow, not for a prominent scientist, but for an ordinary engineer. But the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR allocates three rooms in the basement of the former gymnasium.

The inventor insists that he must work hand in hand with industry! *«...The electric welding laboratory should not produce puffy scientific reports, but really help the industry to master new methods of metal welding. I warned them that I would have to go to factories a lot, help them cope with the difficulties of mastering welding, train personnel for factories, fight riveting supporters...»*. – Evgeny Oskarovich wrote in

his memoirs. And the work of the laboratory was closely related to production. All developments were immediately transferred to production. At Dnepropetrovsk plant of metal structures, Evgeny Paton's long-standing dream came true – the enterprise has begun to produce beams for all-welded bridges. So two main affairs of Evgeny Oskarovich's life merged into one.

Kharkov plant «Hammer and Sickle» sent to the laboratory for testing the frames of two threshers – riveted and welded. According to the results of the tests, the Kharkovites switched entirely to welding. In addition, Paton's laboratory refuses to purchase imported scientific equipment – it was decided to build its own test benches and machines.

Evgeny Paton headed Electric Welding Laboratory and Electric Welding Committee from 1929 to 1934. In the 1930s, he improved electric arc welding with a metal electrode, invented in 1888 by the Russian engineer N. G. Slavyanov [12], and published the first monographs, in which he summarized the basic principles of calculation and design of welded structures, formulated the basic provisions on the technological foundations of electric arc welding... He dealt with issues related to welded joints and structures, with their strength and operational reliability, optimal shape, reaction to static and dynamic loads, properties of an electric welding arc and a weld seam, mechanization and automation of electric welding, etc. In 1932, under his leadership, an automatic welding head [13] was developed for open arc electric welding. He created an in-line method of electric welding and their technologies in special conditions of varying complexity, developed industrial flow electric welding lines.

In 1934, on the basis of Electric Welding Laboratory and Electric Welding Committee, the scientist organized the world's first research institute for electric welding (NIIES) VUAN, which has been named after Paton since 1945, and was its director in 1934–1953. A feature of NIIES was the same close connection with production. The newest scientific methods of electric welding and equipment created at NIIES were immediately introduced into the national economy, which made it possible to solve the problems of practical application of electric welding in the shortest possible time. In 1940, he became an Honored Scientist of

the Ukrainian SSR and invented a new method of electric submerged-arc welding, which later became the main one in laying gas pipelines, manufacturing cars, boilers, beams for bridges and other structures. In 1941 he was awarded the State Prize of the first degree for development of the method and equipment for high-speed automatic electric welding.

On June 22, 1941, Evgeny Paton (a scientist over 70 years old) met on the train – he was heading to Ural Tank Plant on a business trip. The scientist had to organize welding of armor plates of steel. Upon learning of the beginning of the war, Evgeny Oskarovich sent a letter to Stalin right from the car: «*The Motherland is in danger, and I want to give my last strength to its defense*». On the recommendation of the scientist, Kiev Institute of Electric Welding was evacuated to Nizhny Tagil and placed at Uralvagonzavod No. 183, where NIIES had already introduced automatic welding in production of cargo cars from structural low-carbon steels.

T-34 and KV tanks created even before the war were superior to their German counterparts in most parameters. The main task set before themselves at Paton Institute was to achieve strength of the welded seam that exceeds strength of the armor plate itself. Until that moment, Soviet tanks were welded manually, which required participation of a highly qualified welder. And the process itself was very long and time consuming. Automated welding was supposed to reduce the requirement for worker qualifications and speed up the process. The evacuated institute, in fact, turned into one of workshops of the tank factory.

The technology of automatic submerged-arc welding in 1942 was introduced into production of tanks, air bombs, and other ammunition. Its use has accelerated welding production five to eight times and, at the same time, has reduced the requirements for the qualifications of a welder. Even a teenager could use Paton's apparatus. The production process of tanks has accelerated unprecedentedly, strong welds withstood the impact of armor-piercing shells. Until the very end of the war, no one in the world could repeat this technology! Paton's automatic welding machine can be safely put into the Victory Weapon Gallery together with the legendary Katyusha, Il-2 and T-34 attack aircraft. During the war years, the total length of «Patonov seam» was six thousand kilometers!



To imagine the degree of reliability of Paton's armored warriors, it is enough to quote the words of Yuri Maksarev, director of tank plant No. 183 evacuated to Nizhniy Tagil from Kharkov: *«It was necessary to expand the territory of Uralvagonzavod for workshops for new, peaceful products. And near the entrance there was a monument – a tank, «thirty-four» No. 35000. On May 26, 1945, the victorious year, on the very day when the plant was awarded the fourth military order, it left the assembly line simply on a pedestal. In 1975, this tank was reactivated from the factory lubricating oil and refueled with fuel. And under its own power, as if it had just rolled off the assembly line, and not three decades ago, the veteran T-34 climbed to a new pedestal near the new entrances».*

For his contribution to strengthening the country's defense capability in difficult wartime conditions in 1943, Paton was awarded the title of Hero of Socialist Labor. In 1944, he returned from evacuation to Kiev, headed the restoration of NIIES, was engaged in improving the process of automation of electric welding and research on creating the scientific foundations of electric welding, as well as electric welding in carbon dioxide. In 1946 and 1950 he was elected to the Supreme Soviet of the USSR. In 1946–1953, he comprehensively developed physical, metallurgical and thermal foundations of electric welding, scientific foundations of mechanization and automation of electric welding processes, created a theory of strength of welded structures and joints, solved the problems of electric-welded bridge construction, the introduction of electric welding into industry, led the design and manufacture of the first all-welded bridges using automatic electric welding. In 1953, an all-metal road bridge across the river Dnieper was put into operation in Kiev with a length of 1542 m, which was created without a single rivet and began to bear the name of Paton bridge. In total, over 100 welded metal road and railway bridges were built according to his designs. The NIIES team solved the problem of automatic submerged arc welding of vertical seams. He made a great contribution to creation of new industrial methods for production of metal pipes, ships, railway cars, mine cars, construction of main pipelines, oversized tanks, blast furnace structures, hulls for ballistic inter-continental and satellite missiles and other

objects, and invention of electroslag welding solved the problem of producing structures from workpieces of practically unlimited thickness.

Evgeny Oskarovich Paton died on August 12, 1953 at the age of 84, was buried in Kiev at the memorial Baikovo cemetery. After his death, the publishing house of Academy of Sciences of the Ukrainian SSR published his selected scientific works [14; 15]. He is the author of over 300 fundamental scientific papers, organizer and editor of the journal «Automatic Welding», and has been awarded 5 orders and numerous medals.

REFERENCES

1. Lyoshin, B. V. Paton Evgeny Oskarovich. Great Soviet Encyclopedia, Vol. 19. Moscow, Soviet encyclopedia, 1975, pp. 280–281.
2. Charnitskaya, L. P. Paton Evgeny Oskarovich. New Russian Encyclopedia, Vol. XII (2). Moscow, Encyclopedia, 2014, p. 352.
3. Paton Evgeny Oskarovich. Soviet encyclopedic reference book. Moscow, Soviet encyclopedia, 1985, p. 973.
4. Paton Evgeny Oskarovich. Railway transport. Encyclopedia. Moscow, Great Russian Encyclopedia, 1994, p. 551.
5. Chekanov, A. A. Evgeny Oskarovich Paton. 1870–1953. Moscow, publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, 182 p.
6. Paton Evgeny Oskarovich: Memories. Moscow, Molodaya gvardiya, 1958, 364 p.
7. Minin, G. A., Apatsev, V. I. Petersburg Institute of Railway Engineers (PIRET). Railway Transport. Encyclopedia. Moscow, Big Russian Encyclopedia, 1994, pp. 301–302.
8. Minin, G. A., Apatsev, V. I. Moscow Institute of Railway Transport Engineers (MIIT). Railway Transport. Encyclopedia. Moscow, Great Russian Encyclopedia, 1994, pp. 240–241.
9. Timoshin, A. A. Railway education [Zheleznodorozhnoe obrazovanie]. Railway transport. Encyclopedia. Moscow, Great Russian Encyclopedia, 1994, p. 134.
10. Nosarev, A. V. Artificial structures [Iskusvennie sooruzheniya]. Railway transport. Encyclopedia. Moscow, Great Russian Encyclopedia, 1994, p. 170.
11. Paton, E. O. Experimental comparison of electric welding and riveted attachments of longitudinal beams to transverse ones [Opytnoe sravnenie elektrosvarochnykh i klepannykh prikreplenii prodolnykh balok k poperechnym]. Moscow, Transpechat NKPS, 1930, 28 p.
12. Grigoriev, N. D. Saved bell-ringing (dedicated to 160th anniversary of birth of Nikolay Slavyanov). *World of Transport and Transportation*, 2014, Vol. 12, Iss. 2, pp. 244–256.
13. Paton, E. O. Automatic welding in shipbuilding [Avtomaticheskaya svarka v sudostroenii]. Moscow, Oborongiz publ., 1934, 40 p.
14. Paton, E. O. Selected Works. Vol. 1. Kiev, Publishing house of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1959, 579 p.
15. Paton, E. O. Selected Works. Vol. 2. Kiev, Publishing house of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1961, 449 p.



О путях развития железных дорог (1910)



110 лет назад для профессионального железнодорожного сообщества остро стоял вопрос о соотношении коммерческих и государственных интересов в деятельности железных дорог страны. Делались попытки классифицировать отдельные дороги в этих целях по направлениям и предназначению. Затрагивались проблемы соотношения монопольного и конкурентного аспектов. Поднимался вопрос о строгом контроле за выделяемыми на строительство новых железных дорог средствами, об извлечении прибыли или её направлении на инвестиции в будущее развитие, о справедливых тарифах. Отдельно была поставлена проблема, выражаясь современным языком, связанности территорий: увеличивать ли провозную способность существующих магистральных, или же строить новые второстепенные дороги там, где их ещё вообще нет. Обращает на себя внимание и отдельно поднятая проблема о повышении внимания к экономической подготовке специалистов как условию успешной коммерческой работы железных дорог: как служащих — в сети железнодорожных училищ, так и будущих руководителей в институтах, чтобы «в рассадниках железнодорожных инженеров, дающих контингент начальников железных дорог, — студентам давалась полная экономическая подготовка к их будущей деятельности».

Ключевые слова: история транспорта, железные дороги, тарифы, доходность, подготовка специалистов.

Редакция выражает признательность сотрудникам библиотеки Российского университета транспорта за помощь в подготовке материала.

Железнодорожное дело, являясь одной из отраслей государственного хозяйства, есть ли предприятие чисто коммерческое?

Поставленный нами заголовком вопрос имеет тем большую важность, что его решение определяет тот угол зрения, под которым следует рассматривать результаты эксплуатации железных дорог вообще, а наших в особенности.

Железнодорожное дело представляет собой специализированный извозный промысел монопольного характера, а потому оно может казаться лишь чисто коммерческим делом, значение которого определяется исключительно рублём, т.е. прямым барышом. Таковым оно и было бы, если бы не существовала неустранимая монопольность этого рода предприятия, обусловливаемая как рельсовой колёй, проводимой лишь в разрешаемых направлениях, так и своим особым государственным значением и неизбежным значительным ограничением самоуправления.

С другой стороны, не все рельсовые линии могут быть подводимы под одну общую категорию предприятий, предназначенных служить лишь удобными путями сообщения между промышленными, торговыми, производительными и населёнными центрами, что давало бы им право на исключительно коммерческий характер. Есть рельсовые пути, которые имеют ещё более серьёзное значение, уже чисто государственного характера: служить требованиям государственной обороны, стратегическим задачам, а также вызывать к жизни и развивать местную сельскохозяйственную, торгово-промышленную и заводскую производительность, реагируя, в то же время, на улучшение государственного хозяйства и усиление средств государственного казначейства.

Сопоставляя между собою эти разные услуги, оказываемые стране железными дорогами, естественно приходится подразделить последние на:

1) железные дороги как бы чисто коммерческого значения, а потому и могущие



представлять собою предприятия некоторого коммерческого характера, вне зависимости от их владельца, казны или частного общества;

2) железные дороги исключительно государственного значения, т.е. такие, которые должны содержаться временно или постоянно, если не полностью, то главным образом за счёт казны.

Сказанное относится собственно до эксплуатации всех железных дорог; что же касается их сооружения, т.е. выбора направления (изыскания), составления расценки их стоимости (расценочная ведомость) и производства самой постройки, то хотя это и не может быть не согласуемо с коммерческими соображениями (в смысле достижения дешевизны), но исходя из того кардинального положения, что все монопольные пути сообщения составляют неотъемлемую собственность государства, — сооружение железных дорог не должно рассматриваться, как предприятие коммерческое. Иметь коммерческий характер ещё не значит быть и предприятием коммерческим. Коммерческие предприятия соблюдают интересы собственников, иначе они являлись бы благотворительными учреждениями; государственные же предприятия, наоборот, на первый план выдвигают интересы страны, и третьих лиц. По отношению частных дорог следует иметь ещё в виду, что эти предприятия условно уступаемы частным лицам или обществам в срочное пользование под строгим контролем (будущего?) хозяина дороги — правительства. Точно так же и концессионное эксплуатирование такого предприятия частным обществом хотя и является, как уже сказано, делом чисто коммерческого характера, но должно, по нашему мнению, производиться при обязательном участии самой казны, и притом не в смысле гарантийного покрытия недоборов по эксплуатационным сборам, а в смысле его непосредственного участия как в основном капитале, так и личным участием своих представителей в администрировании самого концессионного предприятия, что уже имеет место по отношению некоторых частных дорог: Владикавказской, Рязанско-Уральской, Юго-Восточной, Бульгуминской и Первого Общества подъездных железных путей.

Долгое время почти все наши железные дороги строились как бы на коммерческих основаниях, иначе говоря, концессионных, когда многие строители, при сооружении дороги, не считаясь с условиями будущей эксплуатации, пользовались в широкой степени предельными уклонами и предельными радиусами и, в целях сокращения количества земляных работ в свою пользу, не останавливались перед вредным для эксплуатации удлинением линии и бесполезными преждевременными затратами. При казённых постройках ту же цель преследовали подрядчики за счёт слабого (по разным мотивам) надзора со стороны руководивших и начальствовавших лиц. Затем с окончанием постройки дороги, по принятию её в эксплуатацию с допускаемыми недоделками, эксплуататорам только что выстроенной линии неизбежно приходилось затрачивать новые средства на её, порой, капитальную перестройку. В результате получалось, что основной капитал, вложенный в сооружение дороги, значительно возрастал, а вместе с ним увеличивалось и количество процентов, ежегодно причитающихся на затраченный капитал; это, в свою очередь, плачевно отражалось на общей доходности сети железных дорог.

Малодоходность, но не бездоходность, так как таковая не существует, наших железных дорог, а также неудовлетворительность системы их хозяйства, являются прямым результатом, уже давно устаревших, всеобщих воззрений на значение железных дорог, а также ещё более является следствием существующей железнодорожной политики, не приспособленной к современному складу железнодорожной жизни и её требованиям. Смело можно сказать, что положение нашего железнодорожного дела станет совершенно иным, если Правительство в этом отношении будет держаться следующих оснований.

Сооружение новых рельсовых дорог, а также дальнейшее развитие существующих линий производить под строгим непосредственным контролем казны, применительно к условиям каждой местности, считаясь со всеми её характеристиками, и в особенности соображаясь с требованиями будущей эксплуатации в полном её развитии, ограничиваясь при этом началь-

ным осуществлением лишь неотложных затрат, иначе говоря, сначала расходовать лишь столько, сколько необходимо для удовлетворения неотложных требований ожидаемой, первоначальной деятельности дороги, согласно предварительно установленному общему плану предстоящей деятельности этой линии.

Затем всякая могущая при сооружении дороги, образоваться экономия должна всецело поступать в запасной фонд, вместе с неизрасходованными суммами по недоделкам сооружений. Такой «запасный фонд» никоим образом не должен служить к усилению текущих эксплуатационных средств дороги, а всецело предназначаться, с наросшими на него процентами, к поступлению, по мере выясняющейся, надобности, — на расходы по развитию дороги и её оборудования. Это положение должно одинаково относиться как к казённым, так и к частным дорогам.

Эксплуатированию железных казённых и частных дорог общего значения следует придать чисто коммерческий характер; временное исключение должно быть допускаемо лишь для линий преимущественно стратегического значения, и то до тех пор, пока валовой доход не начнёт покрывать их эксплуатационные расходы; когда же такой момент наступит, то и чисто стратегические линии не должны быть изъяты из коммерческого характера эксплуатации.

Потребность образования при эксплуатации железных дорог отдельной коммерческой службы с её многочисленными агентами явилась вследствие выяснения, наконец, того важного значения, какое имеет служба движения вообще, а её коммерческая отрасль в особенности. В настоящее страдное для железнодорожного хозяйства время, во многих случаях, допускается как по отношению железнодорожных агентов, так и их руководителей, довольствоваться простым переименованием их в коммерческие агенты и коммерческие службы с соответствующими начальниками, в расчёте на уже приобретённый ими некоторый навык к коммерческим операциям, но жизненная практика показывает, что одного такого переименования далеко не достаточно. При этом необходимо установить, раз навсегда, что именно мы назы-

ваем коммерческим характером железнодорожной эксплуатации.

Основное правило всякого коммерческого дела — это получать доход на затраченный капитал и увеличивать оборот последнего, не ограничиваясь необходимыми расходами, а затрачивая, когда требуется, даже *à fond perdu*, новые средства для наибольшего развития своей коммерческой деятельности, при сознании, что такая затрата не только вернётся обратно, но ещё и принесёт хорошие плоды. Конечно, для этого необходимо иметь надлежащую сметливость, полное знание своего дела и обладать достаточным оборотным капиталом, собственным или же заимствованным.

Из этого положения уже ясно видно, какого рода серьёзным требованиям должны удовлетворять деятели-руководители по железнодорожной коммерческой части, а также видно, что каждая самостоятельная дорога должна обладать достаточными свободными средствами или кредитами для своих временных коммерческих оборотов. Такое требование наиболее существенно для дорог частных обществ, уставы коих не предвидят образования такого капитала, а потому некоторые дороги *volens nolens* вынуждены были прибегать к временному заимствованию из своих текущих кассовых средств, т.е. из расчётных сумм с другими дорогами, что при громадном денежном обороте, доходящем для всей Имперской сети до трёх миллиардов рублей в год, представляется соблазнительным, и даже в некоторых случаях неизбежным. Следует заметить, что такая неизбежность предусмотрена законодателем, установившим за такое заимствование 8 % пеню в пользу казны.

Для создания коммерческих агентов, которые могли бы стоять на высоте своего положения, необходима предварительная их теоретическая подготовка и надлежащая практическая осведомлённость.

Вот тут-то и возникает серьёзный вопрос: лиц, изучивших коммерческие науки в существующих коммерческих школах и высших курсах, имеется немало, и среди них должны встречаться люди с широким кругозором, с правильным углом зрения, с достаточной наблюдательностью, и с аналитическим умом, но их железно-



дорожная осведомлённость будет почти всегда ограничена узким местным районом их общения.

Причину же такой ограниченной осведомлённости следует искать в трудности приобретения опытных знаний и практического механизма, а также с другой стороны, этому содействует отсутствие таких статистических отчётов, которые давали бы своевременно, а не запоздало на несколько лет, ясную и фактическую картину и бесспорный материал всех железнодорожных операций по движению, и, наконец, причину надо искать также в отсутствии у нас, до настоящего времени, достаточного числа практических по службе движения школ, так как только в последние годы, сперва частная предприимчивость, сознав насущную потребность организации таких школ, первоначально в Петербурге, а затем в Москве, открыла курсы для железнодорожных агентов службы движения; в Киеве, при Киевском коммерческом институте открылись, с сентября 1909 года, высшие курсы для кандидатов в железнодорожные коммерческие агенты. Все эти курсы платные, но могущие поставлять теоретически подготовленных, говорим: теоретически подготовленных, так как, при слишком краткосрочной практической подготовке, последняя едва ли может идти в серьёзный счёт, — далеко не в состоянии удовлетворить настоящее требование знающих агентов этой службы. Поэтому ввиду назревшей потребности, Учебный отдел Министерства путей сообщения уже выработал план и программу движенческих железнодорожных училищ и таких же курсов, а так как этому вопросу министр путей сообщения, С. В. Рухлов, придаёт важное значение в деле упорядочения нашего железнодорожного дела, то является полное основание верить в успешное развитие таких училищ, долженствующих поднять ценз наших железнодорожных агентов.

Коммерсант, устанавливая цену на свой товар, вводит в расчёт: во что ему этот товар или работа обошлись, прибавляет накладные расходы, связанные с приобретением, хранением и сохранностью товаров, и добавляет ещё свой ожидаемый барыш, размер которого ставить в зависимость от существующего рынка и скорости оборота капитала; при этом он имеет конечной

целью наибольший и скорейший сбыт, т.е. привлечение наиболее значительного числа покупателей. Такой коммерсант является в роли полного хозяина, действующего в пределах своих коммерческих способностей, размера капитала и личного кредита.

Далеко не так обстоит этот вопрос в современном железнодорожном деле: там политики и конкуренции не существует. Тарифные ставки устанавливаются по соображениям, совершенно чуждым действительной стоимости перевозки самой дороге, и вовсе не будет преувеличением сказать, что тарифные ставки определяются «академически», преследуя, за редким исключением, лишь одно понижение провозной платы ради случайных интересов третьих лиц, не говоря уже о льготных тарифах, не вызываемых интересами самой дороги.

Что тарифные ставки должны сообразоваться с разными государственными требованиями, по отношению перевозок некоторых массовых грузов первой необходимости, — это не подлежит никакому оспариванию, но пределы размеров минимальных тарифов обязательно должны регулироваться той действительной стоимостью, в какую обходится дороге или сети, сама перевозка этих грузов; на это обстоятельство было обращено внимание ещё бывшей Комиссией тайного советника Ивашинцева.

Конечно, могут являться и такие редкие моменты железнодорожной жизни, когда, за отсутствием транзитных и местных грузов, подвижной состав дороги пребывает в бездействии и, когда, следовательно, выгоднее произвести какую-либо работу за уменьшенную до убытка плату, дабы покрыть часть своих непроизводительных расходов, но это исключительные конкретные случаи, значение которых с большой осторожностью должна определять сама дорога, считаясь с износом своего подвижного состава и другими возможными последствиями при установлении временного льготного тарифа. И в таких случаях, решающим регулятором должна быть коммерческая сообразительность ответственного начальника дороги. Вообще же, в зависимости от характера и ценности перевозимых грузов, дифференциальность размеров тарифных ставок должна бы под-

лежать своему обоснованию на процентном отношении количества данного перевозимого груза к общему годовому, итоговому, эксплуатационному расходу дороги, и только в период значительного отсутствия обратных грузов усиление этой дифференциальности может быть допускаемо, до известной степени, за счёт понижения таких ставок, применительно к размеру расходов, лишь зависящих от движения. Точно так же следовало бы принять за правило, чтобы, при установлении всякого рода льготных тарифов в целях непосредственных интересов железной дороги, твёрдо помнить, что в деле транспортных предприятий одинаково имеют значение конечные результаты как зависящих от движения расходов, так и не зависящих от него; разница же взаимных отношений обоих этих расходов заключается в том, что когда первые, т.е. зависящие от движения расходы, с повышением трафика увеличиваются на единицу работы дороги; вторые, т.е. не зависящие от движения расходы, хотя и будучи расходами фиксированными, с увеличением трафика пропорционально понижаются в своём соотношении; впрочем, оговариваем, что это понижение возможно лишь до известного предела, переступление которого вызывает уже обратный результат. Следует заметить, что в последнее время расходы, не зависящие от движения, сильно возрастают из года в год, не урегулированные никаким мерилем.

Коренную причину такого повсеместного как у нас, так и на иностранных железных дорогах, возрастания расходов, не зависящих от движения, следует видеть:

Во-первых, в неразрешении, до настоящего времени, вопроса о том, что государству выгоднее делать: развивать ли свою рельсовую сеть сооружением новых магистралей и стягивать её петли постройкой второстепенных дорог? Или же затрачивать почти миллиардные суммы на увеличение подъёмной и пропускной способности, а также на более полное оборудование уже существующих линий, оставляя громадные площади страны без всякой железнодорожности?

И, во-вторых, одной из причин возрастания расходов, не зависящих от движения, следует также видеть в продолжающемся прогрессивном, повсеместном

требовании улучшения жизненных условий вообще, как результат политических передрыг нынешнего века, передрыг, не подсечённых в самом начале своего возникновения и, до сих пор, нигде ещё не нашедших полного своего ликвидации.

Для определения технических и хозяйственных коэффициентов работы железной дороги и сравнительной оценки результатов эксплуатации разных дорог, общеприняты измерительными единицами: паровозо-, поездо- и осе-вёрсты, и по отношению означенных коэффициентов эти измерители имеют своё решающее значение во многих случаях, но делать на основании их сравнительные выводы, без возможности впадения в крупные погрешности, более чем трудно; так, например, значение поездо-версты зависит от числа вагонов, входящих в состав поезда, которые бывают и в 5, и в 45 вагонов, а осевёрсты — от числа осей в циркулирующих вагонах — четырёхосных при тележках, и трёх- и двусосных без тележек; даже и паровозо-верста также требует дополнительных указаний: рабочий, холостой, маневрирующий, дополнительный и т.д. Поэтому для определения коммерческой работы дороги, правильнее считать — нормальными измерителями пассажиро- и пудо-версту, так как эти данные представляют прямые и точно определённые указания полезной коммерческой работы всех дорог, получающих свой доход от провоза пассажиров и грузов с единицы пути, ими пройденного.

Если показываемая средняя годовая стоимость паровозо-, поездо- и осевёрсты не даёт полного представления о полезной коммерческой работе железной дороги, то ещё более затемняет представление об этой работе — показание в статистических материалах лишь средней годовой стоимости пассажиро- и пудо-версты, одно общее для целой сети железных дорог, так как эти последние измерители, для каждой отдельной дороги, вполне самостоятельные и часто резко отличаются между собою. В доказательство приведём, для примера, некоторые данные нашей Имперской сети, по отчётам за 1906 год как казённых, так и частных дорог.



I. Средний расход на пассажиро-версту выразился:

а) на казённых дорогах:

Балтийско-Псковско-Рижской	1,18 коп.;
Самаро-Златоустовской	0,48 коп.;
Бискунчакской	0,28 коп.;
Забайкальской	3,71 коп.;
Сибирской	0,30 коп.

б) на частных дорогах:

Белгород-Сумской	2,35 коп.;
Варшавско-Венской	1,46 коп.;
Владикавказской	0,81 коп.;
Московско-Казанской	0,64 коп.;
Первого Общества подъездных путей	1,24 коп.

Средний же расход на пассажиро-версту для всей рельсовой сети за 1906 год исчисляется:

для Европейской России в 0,79 коп.;

для Азиатской России в 0,69 коп.

II. Средний расход на пудо-версту за 1906 г. выразился:

а) на казённых дорогах:

Закавказской	0,025 коп. = 1/40 коп.;
Николаевской	0,020 коп. = 1/50 коп.;
Риго-Орловской	0,0166 коп. = 1/60 коп.;
Екатерининской	0,0142 коп. = 1/70 коп.;
Забайкальской	0,0476 коп. = 1/21 коп.;
Средне-азиатской	0,0179 коп. = 1/58 коп.

б) на частных дорогах:

Рязанско-Уральской	0,0212 коп. = 1/47 коп.;
Московско-Виндавской	0,0140 коп. = 1/71 коп.;
Белгород-Сумской	0,0104 коп. = 1/46 коп.;
Первого Общества подъездных путей	0,0333 коп. = 1/30 коп.

Средний же расход на пудо-версту за 1906 год исчислен:

для Европейской России в 0,0158 коп. = 1/63 коп.;

для Азиатской России в 0,256 коп. = 1/39 коп.

Характерность колебаний этих данных указывает на то, что и установка минимальных тарифных ставок должна согласоваться с условиями каждой отдельной дороги, что принятие одной средней величины для измерителя собственных расходов всех дорог сети неправильно и, без дополнительного указания наибольших и наименьших таковых расходов отдельных дорог, вводит в заблуждение, и что поэтому необходимо, установленный ещё 15 лет тому назад, измеритель в 1/125 коп. с пудо-версты, для собственной стоимости, повысить и на будущее время подвергать периодической проверке, иначе окажется, что фактически и существует в некоторых случаях, что иные массовые грузы (уголь, руда, лес) дороги перевозят, неосознанно, себе в убыток, а это, в свою очередь, приводит дорогу к малопродуктивности. Конечно, нам возразят, что

такая мера повысит стоимость провоза дешёвых грузов и усложнит расчёты провозных плат, и что всюду, в Европе, стремятся к уменьшению числа тарифных ставок. На это мы ответим следующее:

Нерациональность существующей железнодорожной тарифной системы привела к тому, что в настоящее время на всех Европейских сетях замечается крайне тревожное понижение доходности, чему немало способствует стремление, в угоду производителям и потребителям, понижать до крайности провозные платы, не сообразуясь с коммерческими условиями данной железной дороги, тогда как в Америке, где, при протяжении рельсовой сети в 361 тысячу километров главного пути, находящихся во владении 2313 частных обществ, самостоятельно устанавливающих, по

своему личному усмотрению, умеренные* тарифные ставки, — результаты эксплуатации за 1906 год были следующие:

Акционеры получили в среднем дивиденды на свои акции:

в 1904 г.	6,09 %;
в 1905 г.	5,78 %;
в 1906 г.	6,03 %.

Основной строительный капитал равняется сумме в 75 766 191 686 франков, что составляет на 1 километр пути 219 569 фр. или 89 364 руб. на версту**. Акционерный капитал равняется 46,69 %, а облигационный разного наименования 53,31 % основного капитала.

Следует, однако, заметить, что дивиденды получили не все, а лишь некоторые акционерные общества, составляющие по отношению общего капитала всей американской сети:

в 1904 г.	57,47 % всего количества выпущенных;
в 1905 г.	62,84 % акций, остальные же акционеры;
в 1906 г.	66,54 % ничего не получи- ли.

Сумма дивидендного капитала, выданного акционерам, равнялась:

в 1904 г.	1 157 093 455 фр.;
в 1905 г.	1 237 415 306 фр.;
в 1906 г.	1 418 539 065 фр. = 523 058 550 р.

Приведённые нами, выше, данные среднего годового расхода на пассажиро- и пудоверсту на нашей Имперской сети казённых и частных железных дорог довольно определённо устанавливают действительную стоимость перевозок для каждой указанной дороги, понижать же эту повёрстную стоимость, без особой косвенной выгоды для себя, дорогам, в смысле коммерческих тенденций, не имеется логического основания. Если же в государственных интересах, в исключительных случаях, дороги бывают вынуждены понижать, для данного груза на определённое время, размер тарифных ставок, в ущерб своим прямым интересам, то таковая жертва обязательно должна быть приносима лишь за счёт государственного казначейства, но никак не за счёт самой дороги, безразлично казённой или частной. В действительности же желез-

нодорожная практика наблюдает явления совершенно обратного характера.

Пока на этом остановимся и перейдём к следующему положению железнодорожной политики, от которой следовало бы отрешиться в целях подъёма нашего железнодорожного дела и установления правильного хозяйства, присущего благоустроенному, коммерчески эксплуатируемому предприятию.

Железнодорожное хозяйство, по своему характеру и результатам, настолько тесно связано с государственными экономическими интересами, что когда приходится слышать всеобщее огульное и даже официозного оттенка обвинение наших железных дорог во всеобщем отсутствии хозяйственного порядка, и притом вследствие всякого рода злоупотреблений со стороны железнодорожных агентов и их присных, то невольно зарождается вопрос: а что, если бы все эти заподозренные агенты превратились в безусловно честнейших людей, неспособных позариться ни на одну казённую копейку, то железнодорожное хозяйство улучшилось ли бы?, а эксплуатационные расходы уменьшились ли бы в значительной степени? На такой вопрос смело и безошибочно можно ответить следующее:

До тех пор, пока само правительство не придёт железным дорогам на помощь в смысле освобождения их путём законодательных мер и административных распоряжений:

1) от современных вампиров, высасывающих с железных дорог переплатежи по многомиллионным поставкам, в виде многочисленных синдикатов и трестов разного наименования, подымающих стачечно, ради личной наживы, — цены на массовые предметы первой необходимости железных дорог;

2) от разных претендующих, не останавливающихся перед подкупами, фальшами и всевозможными злоупотреблениями, в целях наживы за счёт железнодорожных порядков и допускаемых случайностей;

3) от хищников, паразитов, высасывающих, на основании законной обставленности у железных дорог всякого рода вознаграждения под различными предлогами трудно оспариваемыми.

До тех пор и железнодорожная администрация, будь то частная или казённая, будет находиться вне возможности что-либо сделать серьёзно, для понижения эксплуатационных убытков.

* Закон обуславливает лишь умеренность тарифов в интересах публики.

** На 20 % дешевле, чем у нас.



С другой стороны, безответственность некоторых высших и средних агентов, покрываемых в своих незакономерных действиях санкцией разных комитетов и комиссий, также совершенно безответственных, в силу своей коллегиальности, а равно и неприменение принципа фискальной ответственности самих распорядителей кредитов за убытки, причинённые дороге их малорациональными распоряжениями, вызывающими громадные непроизводительные расходы, тоже немало способствуют тому, что антикоммерческая хозяйственность некоторых наших дорог не только держится стойко, но ещё возрастает из года в год.

Но наиболее сильными рычагами, могущими воздействовать на улучшение железнодорожного хозяйства и на постановку его на действительно благоустроенную коммерческую ногу, по нашему мнению, были бы:

1) настойчивое внушение всем железнодорожным агентам, в особенности высшей инстанции, что потеря времени есть значительное преступление, которое должно строго преследоваться;

2) чтобы в рассадниках железнодорожных инженеров, дающих контингент начальников железных дорог, — студентам давалась полная экономическая подготовка к их будущей деятельности;

3) убеждение тех, кого следует, в том, что краснбайство, связи и протекция, выдвигающая некоторых лиц, затемняют скромных, деятельных сведущих, а потому более полезных, агентов.

Затем, если каждого начальника железной дороги, всё конечно, при условии предоставления ему необходимых широких полномочий, под строгим отчётом за последствия своих распоряжений, — возвести в положение местного главного, ответственного коммерческого деятеля, что было бы безусловно рационально, то центральная администрация являлась бы хозяином всей железнодорожной сети, управляемой как бы агентами (по коммерческому выражению, приказчиками) на отчёте; тогда не стали бы проявляться такие неестественного характера факты, как, напр., внезапное превращение доходной дороги в бездоходную, за счёт вновь возведённых соседних линий диагонального, т.е. более краткого расстояния. Тогда такой хозяин сети, предвидя изменяющиеся условия выгодности направления грузов, не оставил бы дорогу,

утратившую большую часть своих грузов, передачей их на другую, — работать самостоятельно и сознательно в убыток, а присоединил бы её, но уже, как линию местного значения и служащую, как разгрузочно-обходная, к той дороге, которая наиболее оттянула её работу; и это было бы поступлено по коммерчески, а то, сейчас, мы видим, например, следующую картину, извлекаемую нами из записки председателя Особой высшей комиссии по исследованию железнодорожного дела в России, инженер-генерала Н. П. Петрова.

	Данные по сведению Государственного контроля (руб.)	Данные по сметам Министерства путей сообщения (руб.)
На Риго-Орловской дороге за 1906 год		
Валовой доход	24 000 059	18 854 997
Эксплуатационные расходы	14 319 774	12 874 571
Чистый доход	9 680 285	5 980 426
Обязательные платежи	5 964 159	5 964 159
Чистый остаток	3 716 126	16 267
На Сызрано-Вяземской дороге за 1906 год		
Валовой доход	24 086 081	12 593 265
Эксплуатационные расходы	15 221 434	13 991 260
Чистый доход	8 864 647	Дефицит 1 397 995
Обязательные платежи	3 989 250	3 989 250
Чистый остаток	4 875 397	Дефицит 5 387 245

Примечание: Отчёты Государственного контроля, вносящего в свои отчёты собственную мерку, иногда расходятся с отчётами самой дороги.

Но так как на усиление и улучшение этих дорог из Государственного Казначейства затрачен дополнительный капитал, на первую из приведённых 52 473 358 р., а на вторую 27 198 112 р., то означенный чистый остаток принёс Государственному казначейству:

По Риго-Орловской дороге за 1906 г. 7,88 %, тогда как по смете на 1909 г. ожидается всего лишь 0,03 %.

По Сызрано-Вяземской дороге за 1906 г. 17,9 %, а по смете на 1909 г. никакой оплаты не предвидится.

Такие результаты, явившиеся вследствие оттяжки грузов на новые диагональные дороги, прямо указывают на то, как следовало бы поступить настоящему коммерческому хозяину дела. И приведённые нами примеры не единичны.



Существует твёрдо установившееся мнение, что казённые дороги хуже эксплуатируются, чем частные, иначе говоря, частные дороги много лучше ведут своё дело. С этим мы не согласны; некоторая автономность частных дорог, действительно, даёт возможность местным управлениям последних лучше и сознательнее администрировать своё предприятие, тогда как по отношению казённых дорог, удалённая централизация администрации сильно тормозит проявление живой и чуткой деятельности местной администрации этих дорог. Будучи поставлена в одинаковые условия с частными дорогами, деятельность казённых дорог не будет отличаться от деятельности частных дорог, которые ныне возвышаются лишь за счёт казённых железных дорог; на частных дорогах самоуправление обосновано на доверии, чего на казённых не существует. Малая хозяйственность почти всюду одинакова, по причине свойственности этого недостатка славянской натуре вообще.

Выяснив, таким образом, условия коммерческого значения вообще и коммерческой деятельности железных дорог, и дав отрицательный ответ на поставленный в заголовке вопрос, переходим к рассмотрению вопроса, следует ли признавать за всеми железными дорогами казёнными и частными государственное значение? На этот вопрос можно ответить лишь утвердительно, так как коммерческий характер деятельности железнодорожных предприятий касается собственно их жизни и питания, каковые эти дороги должны извлекать из непосредственной своей деятельности, но, по результатам этой самой деятельности, отзывающейся на всех проявлениях

государственной жизни страны как в стратегическом, так и в культурно-экономическом отношении, — государственное значение железных дорог неотъемлемо от них. Мы уже имели случай указать, в одном из наших экскурсов^{***}, что современный колоссальный размер государственной росписи доходов зиждется именно на деятельности железных дорог; государственное хозяйство без путей сообщения, и главное, — рельсовых, не может не только считаться благоустроенным, но, при современных политических условиях, не могло бы существовать вовсе. В силу сего, прямая задача правительства, в собственных своих интересах, не останавливаясь ни перед какими жертвами, содействовать всеми мерами развитию и преуспеванию в России наибольшего количества железнодорожности, не только магистрального, но и второстепенного значения, памятуя неустанно, что:

Страна, изобилующая железными дорогами, будет всегда наиболее культурной и наиболее сильной.

С развитием сети железных дорог, упорядочением её обставленности и со стягиванием её петель, возвысится и рост производительных сил Государства и народного богатства, а это, в свою очередь, уравнивая противоположные страсти, гарантирует внутренний покой, внешний мир и процветание страны.

Энаэсь.
(Железнодорожное дело. — 1910. —
№ 23. — С. 127–132) •

^{***} Железнодорожное хозяйство перед Общественным судом: «Железнодорожное дело», 1909 г., № 41.



DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-225-241>

On the Ways of Development of Railway Business (1910)



110 years ago, the professional railway community conducted sharp discussion on the ratio of commercial and state interests in domestic railway activity. There were attempts to use that criterion to classify the existed railways by directions and main business purposes. The discussion also referred to the aspects of monopolism and competition, strict government control over the costs of rail construction, distribution of dividends or their investment in future development, fair tariffs. The problem of, in modern terms, connectivity of territory touched upon the choice between enhancing transit capacity of main railroads and constructing of new less important railways in the regions where they have not been built yet.

Quite particular topic referred to the need to pay more attention to training of economic skills of employees as to condition of successful commercial activity of railways. It concerned training of technical employees in railway vocational schools, and of the future executives in higher schools, provided that «in the nurseries of railway engineers who provide a contingent of heads of railways, students are given complete economic preparation for their future activities».

Keywords: history of transport, railways, tariffs, profitability, railway construction, railway training.

The editors are grateful to the staff of the library of Russian University of Transport for their help in preparing the material.

Railway business, being one of the branches of the state economy, is it a purely commercial enterprise?

The question posed by our title is all the more important because its solution determines the point of view from which the results of operation of railways in general, and ours in particular, should be considered.

The railway business is a specialized transport business of a monopoly nature, and therefore it may seem only a purely commercial business, the value of which is determined exclusively by ruble, i.e. direct profit. It would have been like that if there had not been an unavoidable monopoly of this kind of enterprise, which is conditioned by both rail track, which runs only in permitted directions, and by its special state significance and inevitable significant restriction of self-government.

On the other hand, not all rail lines can be brought under one general category of enterprises intended to serve only as convenient routes of communication between industrial,

commercial, productive and population centers, which would give them the right to an exclusively commercial nature. There are rail tracks that are of even more serious importance, already of a purely state nature: to serve the requirements of national defense, strategic tasks, as well as to bring to life and develop local agricultural, commercial, industrial and factory productivity, while responding at the same time to improvement of state economy and strengthening of funds of the state treasury.

Comparing with each other these different services provided to the country by railways, it is naturally necessary to subdivide the latter into:

a) railways, as it were, of purely commercial importance, and therefore capable of representing enterprises of a certain commercial nature, regardless of their owner, treasury or private society;

b) railways of exclusively national importance, i.e. those that should be kept temporarily or permanently, if not completely, then mainly at the expense of the treasury.

The foregoing applies to actual operation of all railways; as for their construction, i.e. choice of direction (research), drawing up a price for their cost (price list) and production of the building itself, although this cannot be inconsistent with commercial considerations (in the sense of achieving cheapness), but based on the cardinal position that all monopoly routes of communication constitute the inalienable property of the state – construction of railways should not be regarded as a commercial enterprise. To have a commercial character does not mean to be a commercial enterprise either. Commercial enterprises respect the interests of their owners, otherwise they would be charitable institutions; state-owned enterprises, on the other hand, prioritize the interests of the country and third parties. In relation to private roads, it should also be borne in mind that these enterprises are conditionally assignable to individuals or societies for fixed-term use under the strict control (future?) of the road owner – the government. In the same way, the concession exploitation of such an enterprise by a private company, although, as already mentioned, is a matter of a purely commercial nature, but, in our opinion, should be carried out with obligatory participation of the treasury itself, and moreover not in the sense of guaranteeing coverage of shortfalls in operating fees, but in the sense of its direct participation both in the fixed capital and personal participation of its representatives in administration of the concession enterprise itself, which already takes place in relation to some private roads: Vladikavkaz, Ryazan-Ural, South-Eastern, Bugulma and the First Society of Access Railways.

For a long time, almost all of our railways were built, as it were, on commercial grounds, in other words, on concession grounds, when many builders, when constructing a road, regardless of conditions of future operation, used to a wide extent the limiting slopes and limiting radii and, in order to reduce the number of earth work in their favor, did not stop at the detrimental to operation of lengthening the line and useless premature costs. With state-owned buildings, the contractors pursued the same goal at the expense of weak (for various reasons) supervision on the part of leaders and

superiors. Then, with completion of construction of the road, after its acceptance into operation with allowable imperfections, exploiters of the newly built line inevitably had to spend new funds on its, at times, major restructuring. As a result, it turned out that the fixed capital invested in construction of the road increased significantly, and with it the number of interest annually owed to the capital spent increased; this, in turn, had a deplorable effect on overall profitability of the railway network.

The low profitability, but not the non-profitability, since such does not exist, of our railways, as well as the unsatisfactory system of their economy, are a direct result of long-outdated general views on importance of railways, and is also even more a consequence of the existing railway policy, which is not adapted to the modern way of railway life and its requirements. We can safely say that the situation in our railway business will become completely different if the Government in this respect adheres to the following grounds.

Construction of new railways, as well as further development of existing lines, should be carried out under the strict direct control of the treasury, in relation to the conditions of each locality, taking into account all its characteristics, and in particular in accordance with the requirements of future operation in its full development, while limiting itself to initial implementation of only urgent costs, in other words, first spend only as much as necessary to meet the urgent requirements of the expected, initial activity of the road, according to the previously established general plan for the forthcoming activity of this line.

Then, any savings that may be generated during construction of the road should be entirely transferred to the reserve fund, along with the unspent amounts for the incomplete work of structures. Such a «reserve fund» should in no way serve to strengthen the current operating facilities of the road, but to be entirely intended, with interest accrued on it, to receive, as it becomes clear, the need – for the costs of developing the road and its equipment. This provision should apply equally to both public and private roads.

The exploitation of public and private railways of general importance should be



given a purely commercial character; a temporary exception should be allowed only for lines of predominantly strategic importance, and then until gross income begins to cover their operating costs; when such a moment comes, then purely strategic lines should not be removed from the commercial nature of exploitation.

The need for formation in operation of railways for a separate commercial service with its many agents was due to clarification, finally, of the significance of the traffic service in general, and its commercial branch in particular. In the present difficult time for the railway industry, in many cases, it is allowed, both in relation to railway agents and their leaders, to be content with simply renaming them into commercial agents and commercial services with corresponding superiors, relying on some skill they have already acquired in commercial operations. But life practice shows that such renaming alone is far from enough. At the same time, it is necessary to establish, once and for all, what exactly we call the commercial nature of railway operation.

The basic rule of any commercial business is to receive income on the capital spent and increase the turnover of the latter, not limiting ourselves to the necessary expenses, but spending, when required, even *fond perdu*, new funds for maximum development of their commercial activities, with the knowledge that such an expense is not only will come back, but it will also bear good fruit. Of course, it is necessary to have proper sharpness, complete knowledge of your business and have sufficient working capital, either your own or borrowed.

From this provision it is already clear what kind of serious requirements should be met by the leaders in the railway commercial part, and it is also clear that each independent road must have sufficient free funds or credits for its temporary commercial turnover. Such a requirement is most essential for the roads of private companies, whose statutes do not foresee formation of such capital, and therefore some roads *nolens volens* were forced to resort to temporary borrowing from their current cash resources, that is, from the calculated amounts with other roads, which, with a huge monetary turnover, reaching for the entire Imperial network up to three

billion rubles a year, seems tempting, and even in some cases inevitable. It should be noted that such an inevitability is provided for by the legislator, who established an 8 % penalty for such borrowing in favor of the treasury.

To create commercial agents who can stand at the height of their position, their preliminary theoretical training and proper practical awareness are required.

This is where a serious question arises: there are many people who have studied commercial sciences in existing commercial schools and higher courses, and among them there should be people with a broad outlook, with the right angle of view, with sufficient observation, and with an analytical mind, but their railway awareness will almost always be limited to their narrow local communication area.

The reason for such limited awareness should be sought in difficulty of acquiring experience and a practical mechanism, and on the other hand, this is facilitated by the lack of such statistical reports that would give a clear and factual picture and indisputable material of all railways in a timely manner, and not several years late, operations for movement, and, finally, the reason must also be sought in the absence, up to the present time, of a sufficient number of practical schools in the service of movement, since only in recent years, at first, private enterprise, realizing the urgent need to organize such schools, initially in St. Petersburg and then in Moscow, opened courses for railway traffic agents; in Kiev, at Kiev Commercial Institute, in September 1909, higher courses for candidates for railway commercial agents were opened. All these courses are paid, but they can supply theoretically trained, we say: theoretically trained, since, with too short-term practical training, the latter can hardly go into serious consideration, — it is far from being able to satisfy the real demand of knowledgeable agents of this service. Therefore, in view of the urgent need, the Educational Department of the Ministry of Railways has already developed a plan and program for movement railway schools and similar courses, and since the Minister of Railways, S. V. Rukhlov, attaches great importance to this issue in streamlining our railway business, it is there is good reason to believe in successful development of such

schools, which should raise the qualifications of our railway agents.

The merchant, setting the price of his product, takes into account: what this product or work cost him, adds overhead costs associated with acquisition, storage and safety of goods, and adds his expected profit, the amount of which is dependent on the existing market and capital turnover rate; at the same time, he has the ultimate goal of the greatest and fastest sales, i.e. attracting the most significant number of buyers. Such a merchant is in the role of a complete owner, acting within the limits of his commercial abilities, the amount of capital and personal credit.

This is far from the case in the modern railway business: politics and competition do not exist there. Tariff rates are set for reasons completely alien to the actual cost of transportation by the road itself, and it is not at all an exaggeration to say that rates are determined «academically», pursuing, with rare exceptions, only one reduction in the carriage charge for random interests of third parties, not to mention preferential tariffs not caused by the interests of the road itself.

That tariff rates should be consistent with different state requirements, in relation to transportation of certain bulk goods of basic necessity – this is not subject to any dispute, but the limits of the size of the minimum tariffs must necessarily be regulated by the actual cost, which costs the road or network, the very transportation of these goods; this circumstance was drawn to the attention of the former Commission of Privy Councilor Ivashintsev.

Of course, there may be such rare moments of railway life when, due to the absence of transit and local cargo, rolling stock of the road is inactive and, therefore, it is more profitable to perform any work for a fee reduced to a loss in order to cover part of its unproductive expenses, but these are exceptional specific cases, the significance of which should be determined with great care by the road itself, taking into account wear and tear of its rolling stock and other possible consequences when setting a temporary preferential tariff. And in such cases, the commercial acumen of the responsible road manager should be the decisive regulator. In general, depending on the nature and value of the transported goods, the difference in size

of tariff rates should be subject to its justification on the percentage of the amount of this transported cargo to the total annual, final, operating cost of the road, and only in the period of significant absence of return cargoes, strengthening of this differential can to be admissible, to a certain extent, by lowering such rates, in relation to the amount of expenses that only depend on movement. In the same way, it should be taken as a rule that, when establishing any kind of preferential tariffs for direct interests of the railway, it should be firmly remembered that in the matter of transport enterprises, the final results of both costs dependent on movement and not dependent on it are equally important; the difference in the mutual relations of both these costs is that when the first, i.e. traffic-dependent costs, with increasing traffic, increase per unit of road work; the second, i.e. traffic-independent costs, although being fix costs, with an increase in traffic, proportionally decrease in their ratio; however, we stipulate that this decrease is possible only up to a certain limit, overstepping of which already causes the opposite result. It should be noted that in recent years, costs that do not depend on movement are growing strongly from year to year, not regulated by any measure.

The root cause of such a ubiquitous increase in costs that do not depend on traffic, both here and on foreign railways, should be seen:

Firstly, in non-solution, until now, of the question of what is more profitable for the state to do: should it develop its rail network by building new highways and tighten its loops by building secondary roads? Or spend almost billions of dollars on increasing the lifting and carrying capacity, as well as on more complete equipment of existing lines, leaving the vast areas of the country without any railway?

And, secondly, one of the reasons for the increase in costs that do not depend on movement should also be seen in the continuing progressive, widespread demand for improving living conditions in general, as a result of the political troubles of the present century, troubles that were not cut at the very beginning of their occurrence and, before until now, which have not yet found their complete liquidation anywhere.

To determine technical and economic coefficients of operation of the railway and comparative assessment of the results of operation



of different roads, it is generally accepted measuring units: steam locomotive, train and axle versts, and in relation to the indicated coefficients, these meters have their decisive importance in many cases, but based on their comparative conclusions, without the possibility of falling into large errors, is more than difficult; so, for example, the value of a train-mile depends on the number of cars that make up the train, which are in both 5 and 45 cars, and the axle versts depend on the number of axles in circulating cars — four-axle with bogies, and three- and two-axle without bogies; even a steam locomotive verst also requires additional instructions: working, idle, maneuvering, additional, etc.

Therefore, in order to determine the commercial operation of a road, it is more correct to consider it as normal meters of passenger and

food-versts, since these data represent direct and precisely defined indications of the useful commercial work of all roads that receive their income from transportation of passengers and goods per unit of distance traveled by them.

If the displayed average annual cost of a steam locomotive, train and axle-mile does not give a complete picture of the useful commercial work of the railway, then it further obscures the idea of this work — indication in statistical materials of only the average annual cost of passenger and food-versts, one common to the whole network of railways, since these latter gauges, for each individual road, are completely independent and often differ sharply from each other. As proof, we will cite, for example, some data from our Imperial network, according to reports for 1906 of both state and private roads.

I. Average expenses per passenger-verst are represented as:

a) on state roads:

Baltic–Pskov–Riga	1,18 kopecks;
Samara–Zlatoust	0,48 kopecks;
Biskunchakskaya	0,28 kopecks;
Zabaikalskaya	3,71 kopecks;
Siberian	0,30 kopecks.

b) on private roads:

Belgorod–Sumy	2,35 kopecks;
Warsaw–Vienna	1,46 kopecks;
Vladikavkaz	0,81 kopecks;
Moscow–Kazan	0,64 kopecks;
First Society of Access Roads	1,24 kopecks.

The average expenses per one passenger-verst for the entire rail network for 1906 are calculated: for European Russia as 0,79 kopecks;

for Asian Russia as 0,69 kopecks.

II. Average expenses per one food-verst* for 1906 are expressed as:

a) on state roads:

Zakavkazskaya	0,025 kopecks = 1/40 kopecks;
Nikolaev	0,020 kopecks = 1/50 kopecks;
Riga–Oryol	0,0166 kopecks = 1/60 kopecks;
Ekaterininskaya	0,0142 kopecks = 1/70 kopecks;
Zabaikalskaya	0,0476 kopecks = 1/21 kopecks;
Middle Asian	0,0179 kopecks = 1/58 kopecks.

b) on private roads:

Ryazan–Ural	0,0212 kopecks = 1/47 kopecks;
Moscow–Vindavskaya	0,0140 kopecks = 1/71 kopecks;
Belgorod–Sumy	0,0104 kopecks = 1/46 kopecks;
First Society of Access Roads	0,0333 kopecks = 1/30 kopecks.

Average expenses per one food-verst for 1906 are calculated:

for European Russia as 0,0158 kopecks = 1/63 kopecks;

for Asian Russia as 0,256 kopecks = 1/39 kopecks.

* Pood is equal to 16 kg, verst is equal to 1066 m (or 1,066 km).

The character of fluctuations in these data indicates that setting of the minimum tariff rates must be consistent with the conditions of each individual road, that the adoption of one average value for the meter of own costs of all roads in the network is incorrect and, without additional indication of the highest and lowest such costs of individual roads, introduces delusion, and that is why it is necessary, set 15 years ago, a meter in 1/125 kopecks from pood-verst, for its own value, to increase and subject it to periodic verification for the future, otherwise it turns out that in fact it exists in some cases, that other bulk cargoes (coal, ore, timber) are transported by roads, unconsciously, at a loss, and this, in turn, leads the road to low profitability. Of course, we will be objected that such a measure will increase the cost of transporting cheap goods and complicate calculation of freight charges, and that everywhere, in Europe, they are striving to reduce the number of tariff rates. To this we answer the following:

The irrationality of the existing railway tariff system has led to the fact that at present on all European networks there is an extremely alarming decrease in profitability, which is greatly facilitated by the desire, for the sake of producers and consumers, to lower freight charges to the extreme, not complying with the commercial conditions of this railway, then as in America, where, with the length of the rail network of 361 thousand kilometers of the main track, owned by 2313 private companies, independently setting, at their own discretion, moderate* tariff rates, the results of operation for 1906 were as follows:

Shareholders received on average dividends on their shares:

in 1904	6,09 %;
in 1905	5,78 %;
in 1906	6,03 %.

The basic construction capital is equal to the sum of 75 766 191 686 francs, which is 219 569 francs per kilometer of travel or 89 364 rubles per verst**. The share capital is 46,69 %, and the bond capital of various names is 53,31 % of the share capital.

It should be noted, however, that not all received dividends, but only some joint stock

* The law stipulates only moderation of tariffs in the interests of the public.
 ** 20 % cheaper than ours.

companies, which in relation to the total capital of the entire American network:

in 1904	57,47 % of the total number of issued shares;
in 1905	62,84 % shares, the rest shareholders;
in 1906	66,54 % received nothing.

The sum of dividend capital given to the shareholders, was equal to:

in 1904	1 157 093 455 francs;
in 1905	1 237 415 306 francs;
in 1906	1 418 539 065 francs = 523 058 550 rubles.

The data given by us, above, of the average annual expenses per passenger and pood-verst on our Imperial network of state and private railways quite definitely sets the actual cost of transportation for each specified road, while lowering this verst cost, without much indirect benefit for itself, to the roads, in terms of commercial trends, there is no logical basis. If, in the public interest, in exceptional cases, the roads are forced to lower, for a given cargo for a certain time, the size of tariff rates, to the detriment of their direct interests, then such a sacrifice must necessarily be made only at the expense of the state treasury, but not at the expense of the road itself, whether public or private. In reality, however, railway practice observes phenomena of a completely opposite nature.

For now, let us dwell on this and move on to the next provision of railway policy, which should be abandoned in order to improve our railway business and establish the correct economy inherent in a well-maintained, commercially exploited enterprise.

The railway economy, by its nature and results, is so closely connected with state economic interests that when one hears a general indiscriminate and even official shade accusation of our railways in the general absence of economic order, and moreover, as a result of all kinds of abuse on the part of railway agents and their associates, then the question involuntarily arises: what if all these suspected agents turned into undoubtedly honest people, unable to covet a single state penny, would the railway economy improve? and operating costs would decrease significantly? To such a question, the following can be boldly and unmistakably answered:

Until the government itself comes to the aid of the railways in the sense of freeing them





through legislative measures and administrative orders:

a) from modern vampires who suck overpayments of multimillion-dollar deliveries from the railways, in the form of numerous syndicates and trusts of various names, raising strikes for personal gain – prices for massive necessities of railways;

b) from various applicants who do not stop at bribery, falsehoods and all kinds of abuses, for the purpose of profit at the expense of railway orders and admitted accidents;

c) from predators, parasites, sucking, on the basis of legal furnishings at the railways, all kinds of remuneration under various pretexts that are difficult to dispute.

Until then, the railway administration, whether private or state-owned, will be beyond the ability to do anything seriously to reduce operating losses.

On the other hand, the irresponsibility of some top and middle agents, who are covered in their illegal actions by sanction of various committees and commissions, also completely irresponsible, due to their collegiality, as well as non-application of the principle of fiscal responsibility of managers of loans themselves for losses caused to the road by their unreasonable orders, causing enormous unproductive costs, also contribute to the fact that the anti-commercial economy of some of our roads not only holds firm, but is still growing from year to year.

But the most powerful levers that could influence improvement of the railway economy and put it on a really comfortable commercial footing, in our opinion, would be:

a) persistent suggestion to all railway agents, especially the highest instance, that time loss is a significant crime that must be strictly prosecuted;

b) that in the nurseries of railway engineers who provide a contingent of heads of railways, students are given complete economic preparation for their future activities;

c) convincing those who follow that rhetoric, connections and patronage, which put forward some individuals, obscure modest, active knowledgeable, and therefore more useful agents.

Then, if every head of the railway, of course, subject to granting of the necessary broad powers, under strict accountability for the consequences of their orders, is elevated to the position of a local chief, responsible commercial figure, which would be absolutely rational, then the central administration would be the master of the whole the railway network, managed as if by agents (in commercial terms, clerks) on the report; then such unnatural facts as, for example, a sudden transformation of a profitable road into a non-profitable one, due to the newly erected adjacent diagonal lines, i.e. shorter distance. Then such an owner of the network, foreseeing the changing conditions of profitability of the direction of goods, would not leave the road, which had lost most of its goods, by transferring them to another – to work independently and deliberately at a loss, but would connect it, but already, as a line of local importance and serving, as an unloading-bypass, to the road that most delayed its work; and this would have been done commercially, otherwise, now, we see, for example, the

following picture, extracted by us from a note by the chairman of the Special Higher Commission for the Study of Railway Business in Russia, engineer-general N. P. Petrov.

	Data on the information of the State Audit Office ¹ (rub.)	Data on the estimates of the Ministry of Railways (rub.)
On Riga—Oryol road for 1906		
Gross income	24000 059	18 854 997
Operating expenses	14 319 774	12 874 571
Net income	9680 285	5980 426
Obligatory payments	5964 159	5964 159
Net income	3716 126	16 267
On Syzran—Vyazma road for 1906		
Gross income	24086 081	12 593 265
Operating expenses	15 221 434	13 991 260
Net income	8864 647	Deficit 1 397 995
Obligatory payments	3989 250	3989 250
Net balance	4875 397	Deficit 5 387 245

¹The reports of the State Audit Office, which makes its own standard in its reports, sometimes differ from the reports of the road itself.

But since additional capital was spent from the State Treasury to strengthen and improve these roads from the State Treasury, for the first of the above 52 473 358 rubles, and for the second 27 198 112 rubles, then the indicated net balance brought the State Treasury:

On Riga—Oryol road for 1906 7,88 %, while according to the estimate for 1909, only 0,03 % is accepted.

On Syzran—Vyazma road for 1906 17,9 %, and according to the estimate for 1909 no payment is expected.

Such results, which appeared as a result of pulling of loads onto new diagonal roads, directly indicate how the real commercial owner of the business should have done. And the examples given by us are not isolated.

There is a well-established opinion that public roads are less well maintained than private ones, in other words, private roads are much better at doing business. We disagree with this; some autonomy of private roads, in fact, makes it possible for the local administrations of the latter to better and more consciously administer their enterprise, while in relation to state roads, remote centralization of the administration greatly inhibits manifestation of the lively and sensitive activity of the local administration of these roads. Being placed in the same conditions as private roads, the activities of state roads will not differ from the

activities of private roads, which now rise only at the expense of state railways; on private roads, self-government is based on trust, which does not exist on public roads. Small economy is almost the same everywhere, due to the peculiarity of this shortcoming to the Slavic nature in general.

Having thus clarified the conditions of commercial importance in general and the commercial activity of railways, and having given a negative answer to the question posed in the title, we proceed to consider the question of whether all railways should be recognized as state and private state importance? This question can only be answered in the affirmative, since the commercial nature of the activities of railway enterprises concerns their own life and nutrition, which roads should derive from their direct activities, but, according to the results of this very activity, responding to all manifestations of the country's state life as in a strategic and culturally and economically — the state importance of railways is inalienable from them. We have already had the opportunity to point out, in one of our excursions^{***}, that the colossal size of the state's income list today is based precisely on the activities of railways; a state economy without means of communication, and most importantly, railways, cannot not only be considered comfortable, but, under modern political conditions, could not exist at all. By virtue of this, the direct task of the government, in its own interests, without stopping at any sacrifices, is to promote by all measures the development and prosperity in Russia of the greatest number of railways, not only mainline, but also of secondary importance, remembering tirelessly that:

A country teeming with railways will always be the most cultured and strongest.

With development of the railway network, ordering of its furnishings and its tightening in a loop, the growth of productive forces of the State and the national wealth will also rise, and this, in turn, balancing opposite passions, guarantees internal peace, external peace and prosperity of the country.

Enaes.
(Zheleznodorozhnoe Delo [Railway Business], 1910, No. 23, pp. 127–132) •

^{***} Railway facilities before the Public Court: «Zheleznodorozhnoe delo», 1909, No. 41.





Этот год в истории транспорта: 1910
The year in the history of transport: 1910

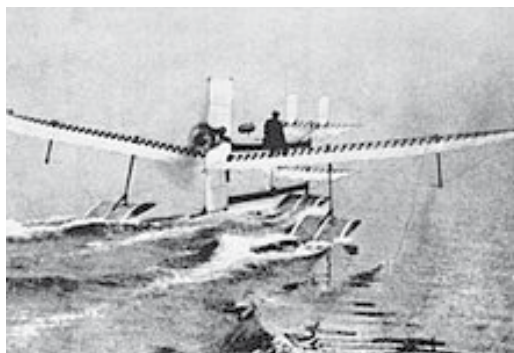


Фото: © Музей Бискароссы (коллекция семьи Фабр) / Photo: © musée de Biscarosse (collection famille Fabre).

ПЕРВЫЙ ВЗЛЁТ САМОЛЁТА С ВОДЫ

28 марта 1910 года впервые самолёт взлетел с водной поверхности на своём моторе.

В этот день марсельский авиаконструктор Анри Фабр на озере Бер близ его родного города оторвал от воды свой самолёт «Гидравион» (Hydravion). Кстати, в момент полёта самолёт оставался безымянным и был назван так уже по прошествии времени.

А. Фабр пролетел около 500 метров на высоте 5 метров, в этот же день совершил ещё 3 полёта, а за неделю налетал 5,6 км.

Самолёт Фабра не был специально сконструированным гидросамолётом, это был модифицированный и адаптированный вариант «сухопутной» конструкции. Имен-

но поэтому памятная дата относится, строго говоря, к первому взлёту с воды самолёта за счёт тяги собственного двигателя.

Самолёт был оборудован двигателем «Гном» мощностью в 50 л.с., сконструированным братьями Сегэн, размах крыльев составлял 14 метров при длине фюзеляжа 8,5 метров. Взлётная масса составляла около 475 кг, максимальная скорость 89 км/ч.

Дополнительные источники:

<https://www.kommersant.ru/doc/3255439>

<https://www.ville-martigues.fr/loisirs/culture/archives-communales/le-saviez-vous/1er-vol-en-hydravion-h-fabre> ●

FIRST PLANE TO TAKE-OFF FROM WATER

On March 28, 1910, the plane took off from water under its own power.

That day Henri Fabre, engineer from Marseilles, took off his Fabre Hydravion at at Étang de Berre, Martigues, Bouches-du-Rhône. By the way, at that moment the plane was unnamed, and was called so later.

H. Fabre flew for about 500 metres at the altitude of 5 m, then the same day he flew the floatplane successfully three more times, and within a week he had flown a distance of 5,6 km.

The plane was not purposely designed seaplane, it was modified and adapted version of «inland» aircraft. That is why, strictly speaking, the memorable date refers to the first

take-off of a plane of water under its own power, and not to the first seaplane.

The plane was equipped with Gnome motor of 50 h.p., designed by Seguin brothers, wingspan was of 14 m, the fuselage was 8,5 m long. The take-off weight was of about 475 kg, and maximum speed attained 89 km/h.

Further sources:

<https://www.kommersant.ru/doc/3255439>

(in Russian).

<https://www.ville-martigues.fr/loisirs/culture/archives-communales/le-saviez-vous/1er-vol-en-hydravion-h-fabre> (in French) ●



МАГЛЕВ 244

Впервые обобщены все термины в сфере магнитной левитации.

АВТОРЕФЕРАТЫ 248

- Динамические параметры пролётных строений балочных мостов.
- Выбор параметров тяговых электрических машин с учётом подобию электромагнитных процессов.
- Эффективность системы охлаждения тепловозного дизеля с использованием индивидуального привода водяных насосов.
- Имитационные модели для анализа безопасности полётов в системе управления воздушным движением.
- Алгоритмы для распознавания команд речевого интерфейса кабины пилота.
- Живучесть литых деталей подвижного состава с технологическими дефектами.

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ 255

Научные и учебные издания российских и международных издательств.



КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ • BIBLIO-DIRECTIONS



MAGLEV 246

The terminology of magnetic levitation has been compiled together.

SELECTED ABSTRACTS OF PH.D. THESIS 252

- Dynamic parameters of span structures of girder bridges.
- Selection of parameters of traction electric engines considering the similarity of electromagnetic processes.
- Efficiency of cooling system of locomotive diesel engine using individual water pump drive.
- Simulation models for the analysis of flight safety in the air traffic control system.
- Algorithms to recognize commands of the cockpit speech interface.
- Vitality of the cast parts of rolling stock with technological defects.

NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION 256

New manuals and scientific editions offered by Russian and international publishing houses.





Весь Маглев по алфавиту...



Шелихова Алла Киямовна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

Алла ШЕЛИХОВА

Зайцев А. А., Шматченко В. В., Плеханов П. А., Роевков Д. Н., Иванов В. Г. Магнитолевитационные транспортные системы: Англо-русский словарь-справочник / Под ред. доктора экономических наук, профессора А. А. Зайцева. – СПб.: Изд-во «Наука», 2020. – 272 с. – ISBN 978-5-02-039736-1.

Рецензируемый словарь – это первая попытка издать словарь-справочник, который включает в себя термины, применяемые при разработке, производстве и эксплуатации магнитолевитационных транспортных си-

стем. При этом собственно термины сопровождаются определениями и пояснениями.

Словарь-справочник структурирован по 16 тематическим разделам и включает в общей сложности 513 терминов и определений. Каждый раздел посвящён определенной предметной области магнитолевитационных транспортных систем: от физики магнитной левитации до эксплуатации и технического обслуживания.

Издание адресовано специалистам транспортных, производственных и научных организаций, которые заинтересованы в развитии маглева.

Ключевые слова: транспорт, маглев, магнитная левитация, левитировать, словарь, словарь-справочник, термины, понятия, определения, стабильность терминологии, понятийный аппарат науки.

*Информация об авторе:

Шелихова Алла Киямовна – руководитель издательства «Транспорт РУТ», член редакционного совета журнала «Мир транспорта», Российский университет транспорта, Москва, Россия, shelikhova.alla@yandex.ru.

Рецензия поступила 28.05.2020, принята к публикации 18.06.2020.

For the English text of the review please see p. 246.

Известный британский лингвист, самый выдающийся преподаватель английского языка в мире Рэндольф Квирк, как-то описывая сложившиеся «словарные» стереотипы, перефразировал Библию: «*Вначале было не слово, а словарь*». Словари для учёного — это своеобразный нормативный кодекс, «лингвистическая Библия».

Надеюсь, никто не станет оспаривать и другую аксиому: словарь — это древнейшее и самое значимое достижение мировой лингвистики. «Бум словарей», который наблюдается сегодня во всём мире, начался ещё в середине XX века. Тогда стало понятно, что любой словарь — это не просто толстая книга, в которой в порядке алфавита разъясняются непонятные слова, что на самом деле словарь — это проводник науки и культуры.

В 90-е годы прошлого века в Великобритании один из опросов показал, что самой популярной книгой у англичан является не кулинарный справочник и даже не Библия. У 90 % британских семей в те годы на книжных полках стоял, по крайней мере, один толковый словарь. На втором месте шла Библия с 80 %, и только на третьем — поваренные книги с почётными 70 %.

Зачем вообще нужен словарь? Задача любого словаря — отразить реально действующие термины и понятия. Именно в терминологии концентрируется главный смысл любого явления, тем более научного. Словарь фиксирует и систематизирует значения слов, их историю, передаёт будущим поколениям накопленные знания. И здесь не важно, идёт ли речь о лингвистике, филологии или технических науках...

Очевидно, что словарь отражает изменения в понятийном аппарате науки, но его роль в стабильности терминологии тоже нельзя недооценивать. Слово, включённое в словарь, начинает новую, совершенно другую жизнь. Замена одного слова на другое в науке не так безобидна, как кажется на первый взгляд. Например, выбор правильного слова для поиска научных публикаций — сегодня краеугольная проблема. Любая научная работа имеет смысл, если заинтересованные этой темой учёные могут найти работу и использовать её в своём исследовании. Поэтому от правильного употребления терминов и понятий порой может зависеть даже судьба научного открытия.

Новый термин, который включают в словарь, — это всегда «источник проблемы». С рождением нового слова появляется новое направление в науке.

Например, термин «маглев» по меркам мировой истории появился не так давно и «подразумевает магнитную левитацию транспортных средств...».

Великая тайна левитации в XX веке перестала быть тайной. В 1911 году, как считается, российские учёные в лабораторных условиях Омского института продемонстрировали, что транспорт без крыльев и колёс возможен, а в 1945 году московский учёный Владимир Аркадьев заставил «левитировать» небольшой магнит над сверхпроводящим свинцовым диском.

Магнитная левитация реальна и отвечает всем законам физики. А термин, её обозначающий, уже на слуху даже у обывателей. Очевидно, что этим новым направлением занимаются многие страны, публикуется много работ на тему левитации. Поэтому проблема и необходимость стандартизации лексики в российских и зарубежных работах витают в воздухе.

Появления англо-русского словаря-справочника под редакцией доктора экономических наук, профессора А. А. Зайцева «Магнитолевитационные транспортные системы» ждали многие. Словарь создавался в научно-образовательном инженерном кластере «Российский Маглев». Издан в Санкт-Петербургском издательстве «Наука». Как написал рецензент книги, президент Международного управляющего комитета маглев (ИМВ) Йоханнес Ключспис: «*В мире немного стран, обладающих столь значительным потенциалом для выгодного внедрения поездов технологии маглев, каким обладает Россия... Продолжение исследований потребует общего понимания основных физических и технологических концепций. Для начала учёным надо принять общую терминологию по ключевым аспектам... Стандартизация и установление норм являются главными требованиями*».

По лингвистическим меркам этот словарь не самый большой. Он включает в себя всего 513 терминов и понятий, применяемых при разработке, изготовлении и эксплуатации магнитолевитационных транспортных систем, с определениями и пояснениями. Но для новой области знаний — это уже много! И это важный шаг для международной научной дискуссии, которая должна «говорить» на одном языке, чтобы понимать друг друга. Очень показательно, что именно российские учёные вносят основной вклад в создание такого словаря. Несомненно, что он поможет задать правильные вопросы и найти лучшие ответы на международном уровне.

Специальный словарь станет помощником не только состоявшимся экспертам, он поможет в обучении и подготовке новых кадров. Как любой словарь, он будет постоянно обновляться и дополняться новыми словами, терминами, понятиями...

...Некоторые считают, что словари, как вид, себя изжили. Но сегодня, чтобы идти в ногу со временем, нужно владеть огромным количеством информации, объём которой растёт день ото дня. Так же стремительно обновляются человеческие знания. Растёт количество терминов, появляются новые слова и уходят из обихода старые, изменяется смысл старых слов и правила. А человеческий разум, к сожалению, не может удерживать такой объём специфической информации. Хочется, чтобы новый словарь стал в этом верным помощником всем, кто идёт в ногу с бегущим временем. У него есть все предпосылки для этого.





All Maglev alphabetically...



Shelikhova, Alla K., Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

Alla K. SHELIKHOVA

Zaitsev, A. A., Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A., Roenkov D. N., Ivanov V. G. Magnetic Levitation Transport Systems: English-Russian Explanatory Dictionary. Edited by Doctor of Economics, Professor A. A. Zaitsev. St. Petersburg, Nauka Publishers, 2020, 272 p. ISBN 978-5-02-039736-1.

ABSTRACT

The peer-reviewed explanatory dictionary is the first attempt to publish a dictionary-

reference, which includes terms used in design, manufacture and operation of maglev transport systems. In this case, the actual terms are accompanied by definitions and explanations.

The explanatory dictionary is structured into 16 thematic sections and includes a total of 513 terms and definitions. Each section is dedicated to a specific subject area of maglev transport systems: from the physics of magnetic levitation to operation and maintenance.

The publication is addressed to specialists of transport, industrial and scientific organizations who are interested in development of maglev.

Keywords: *transport, maglev, magnetic levitation, levitate, dictionary, explanatory dictionary, terms, concepts, definitions, stability of terminology, conceptual apparatus of science.*

*Information about the author:

Shelikhova, Alla K. – Head of the RUT Transport editions, Member of the Editorial Board of World of Transport and Transportation Journal, Russian University of Transport, Moscow, Russia, shelikhova.alla@yandex.ru.

Review received 28.05.2020, accepted 18.06.2020.

For the original Russian text of the review please see p. 244.

The famous British linguist, the most outstanding teacher of the English language in the world, Randolph Quirk, once describing the prevailing «dictionary» stereotypes, paraphrased the Bible: *«In the beginning there was not a word, but a dictionary»*. For a scientist, dictionaries are a kind of normative code, a «linguistic Bible».

I hope no one will dispute another axiom: the dictionary is the oldest and most significant achievement of world linguistics. The «boom of dictionaries», which is observed today all over the world, began in the middle of 20th century. Then it became clear that any dictionary is not just a thick book in which incomprehensible words are explained in alphabetical order, that in fact the dictionary is a guide to the world of science and culture.

In the 90s of the last century in Great Britain, one of the polls showed that the most popular book among the British was not a culinary reference book or the Bible. 90 % of British families in those years had at least one dictionary on their bookshelves. The Bible was second with 80 %, and cookbooks were third, with an honorable 70 %.

Why do you need a dictionary at all? The task of any dictionary is to reflect the actual terms and concepts. It is in terminology that the main meaning of any phenomenon, especially scientific, is concentrated. The dictionary records and systematizes the meanings of words, their history, transfers the accumulated knowledge to future generations. And here it doesn't matter whether it is about linguistics, philology or technical sciences ...

It is obvious that the dictionary reflects changes in the conceptual apparatus of science, but its role in stability of terminology should also not be underestimated. The word included in the dictionary starts a new, completely different life. Replacing one word for another in science is not as harmless as it seems at first glance. For example, choosing the right word to search for scientific publications is a key problem today. Any scientific work makes sense if scientists interested in this topic can find work and use it in their research. Therefore, even the fate of a scientific discovery can sometimes depend on the correct use of terms and concepts.

A new term that is included in the dictionary is always «the source of the problem». With the birth of a new word, a new direction appears in science.

For example, the term «maglev» by the standards of world history appeared not so long ago and «implies magnetic levitation of vehicles...».

The great mystery of levitation in 20th century has ceased to be a mystery. In 1911, it is believed, Russian scientists in the laboratory of Omsk Institute demonstrated that transport without wings and wheels is possible, and in 1945 Moscow scientist Vladimir Arkadiev made a small magnet «levitate» over a superconducting lead disk.

Magnetic levitation is real and meets all the laws of physics. And the term denoting it is already on hearing even among the inhabitants. Obviously, many countries are engaged in this new field, many works are published on the topic of levitation. Therefore, the problem and the need to standardize vocabulary in Russian and foreign works are in the air.

Many were waiting for appearance of the English-Russian explanatory dictionary edited by D.Sc. (Economics), professor A. A. Zaitsev «Magnetic Levitation Transport systems English-Russian explanatory



dictionary». The dictionary was created in the scientific and educational engineering cluster «Russian Maglev». It was published by St. Petersburg publishing house «Nauka». As the book reviewer, President of the International Maglev Steering Committee (IMB) Johannes Klushpis wrote: «There are few countries in the world that have as much potential for profitable introduction of Maglev train technology as Russia has... Continued research will require a common understanding of basic physical and technological concepts. To begin with, scientists need to adopt a common terminology on key aspects... Standardization and norm setting are key requirements».

By linguistic standards, this dictionary is not the largest. It includes a total of 513 terms and concepts used in development, manufacture and operation of maglev transport systems, with definitions and explanations. But for a new field of knowledge, this is already something! And this is an important step for international scientific discussion, which must «speak» the same language in order to understand each other. It is very significant that namely Russian scientists have made the main contribution to development of such a dictionary. There is no doubt that it will help you ask the right questions and find the best answers at the international level.

A special dictionary will become an assistant not only to well known experts, it will also help in teaching and training new personnel. Like any dictionary, it will be constantly updated and supplemented with new words, terms, concepts...

...Some believe that dictionaries, as a species, have outlived their usefulness. But today, in order to keep up with the times, you need to own a huge amount of information, the volume of which is growing day by day. Human knowledge is also rapidly updated. The number of terms is growing, new words appear and old ones go out of use, the meaning of old words and rules change. And the human mind, unfortunately, cannot hold such a volume of specific information. I would like the new dictionary to become in this a faithful assistant to everyone who keeps up with the running time. It has all the prerequisites for this.



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

*Selected abstracts of Ph.D. theses
submitted at Russian transport universities
and research organizations.
For the English text please see p. 252.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-248-254>

Афанасьев В. С. Комплексная экспериментальная оценка динамических параметров пролётных строений балочных мостов / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: РУТ, 2020. — 25 с.

Основной целью работы являлось совершенствование системы оценки динамических параметров пролётных строений балочных мостов в период эксплуатации для перехода от плановых мероприятий по содержанию к мероприятиям на основе фактического состояния сооружения в рамках внедрения «промышленного интернета вещей». Решён ряд задач. Обосновано применение метода вибрационного контроля пролётных строений балочных мостов для определения технического состояния сооружения. Разработана последовательность расчётов, предшествующих динамическим испытаниям пролётных строений балочных мостов. Реализован операционный модальный анализ при натурных испытаниях пролётных строений балочных мостов. Разработана методика определения грузоподъёмности пролётных строений балочных мостов по данным об их динамических параметрах. Рассмотрены методы учёта влияния температурных изменений пролётного строения моста на его динамические параметры.

Основной научный результат работы заключается в совершенствовании системы оценки технического состояния мостов и создании предпосылок внедрения «промышленного интернета вещей» в сферу мостовой инфраструктуры. Научная новизна наиболее существенных результатов заключается в следующем: разработаны статистические модели регрессионного анализа для определения корреляционной зависимости между грузоподъёмностью и динамическими параметрами пролётных строений балочных мостов; впервые использованы математические методы статистики и машинного обучения для

учёта влияния температурных изменений на результаты оценки динамических параметров пролётных строений мостов.

Предложена методика прогнозирования грузоподъёмности пролётных строений однотипных балочных мостов по данным об их динамических параметрах, разработана программа для ЭВМ при подготовке к динамическим испытаниям балочных мостов с целью определения оптимального времени измерения колебаний, учтено влияние температурных изменений пролётного строения моста на его динамические параметры.

05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Работа выполнена в Российском университете транспорта.

Горюнов И. О. Особенности выбора параметров тяговых электрических машин с учётом подобия электромагнитных процессов / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: РУТ, 2020. — 24 с.

На сегодняшний день предпочтительно пользоваться численными методами расчёта магнитных полей. В настоящее время имеет место широкое применение компьютеров, что позволяет провести с высокой точностью расчёты магнитного поля электрических машин. Однако методы, основанные на применении законов Кирхгоффа, не в полной мере позволяют решить поставленную задачу. При анализе физических процессов широко применяются методы теории подобия. Применительно к магнитным процессам в электрических машинах методы теории подобия применяются незначительно. Поэтому совершенствование методов расчёта и анализа магнитного поля в электрических машинах с применением методов теории подобия представляет собой актуальную задачу.

Подобие магнитных процессов в коллекторных тяговых электрических машинах можно характеризовать на основании n -теоремы. В качестве безразмерных комплексов целесообразно использовать следующие соотношения:

- соотношение между МДС якоря и главных полюсов;
- соотношение между МДС якоря и дополнительных полюсов;

- соотношение между МДС главных и дополнительных полюсов.

Потери энергии от перемагничивания стали составляют одну из важных составляющих общих потерь энергии при электромеханическом преобразовании энергии. С помощью математического моделирования были подтверждены данные о том, что наибольшие потери в стали якоря электродвигателя находятся на дне паза. Итоговым критерием, характеризующим эффективность преобразования энергии электрическими машинами постоянного и пульсирующего тока и в том числе тяговыми коллекторными электродвигателями, является соотношение между потерями энергии при перемагничивании в стали якоря и потребляемой энергией (полными потерями).

Решение критериальной задачи позволило определить коэффициенты для расчёта главных размеров ТЭД, определить зависимости между главными размерами с учётом площади паза якоря.

Специальность 05.09.01 — Электромеханика и электрические аппараты. Работа выполнена в Российском университете транспорта.

Некрасов Г. И. Повышение эффективности системы охлаждения тепловозного дизеля с использованием индивидуального привода водяных насосов / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: РУТ, 2020. — 24 с.

После проведения патентно-информационного поиска установлены приоритетные направления развития элементов системы охлаждения и сформулированы технические требования, предъявляемые к системе с индивидуальным приводом водяных насосов.

Разработана математическая модель оценки распределения температур и скоростей теплоносителя по фронту радиаторов для расчёта минимальной производительности водяного насоса, обеспечивающая работу её без переохлаждения и перегрева теплоносителя при любых значениях из расчётного диапазона температур окружающей среды. Результаты моделирования подтверждены результатами сравнительных испытаний, погрешность моделирования составила 3 %.

Построены алгоритмы управления системой охлаждения, позволяющие поддерживать рекомендованную температуру теплоно-

сителей холодного и горячего контуров при минимальном энергопотреблении на привод системы охлаждения.

Разработаны алгоритмы системы управления индивидуальными приводами водяных насосов тепловоза для холодного и горячего контуров, позволяющие по сравнению с серийной системой:

- обеспечивать циркуляцию теплоносителя после остановки дизеля;
- увеличивать время простоя локомотива с остановленным дизельным двигателем без переохлаждения теплоносителя во всём расчётном диапазоне значений температуры окружающей среды;
- минимизировать отбор мощности на привод системы охлаждения тепловозного дизеля.

Разработанная математическая модель системы охлаждения тепловозного дизеля в эксплуатации показала, что применение индивидуального привода водяных насосов позволяет уменьшить суммарный расход топлива, затрачиваемый на привод системы охлаждения на 22,4 % за счёт уменьшения времени работы вентиляторов холодильной камеры, и приводит к уменьшению эксплуатационного расхода дизельного топлива на 2,5 %.

Специальность 05.22.07 — Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация. Работа выполнена в Российском университете транспорта.

Обухов Ю. В. Имитационные модели, алгоритмы и программы для анализа безопасности полётов в системе управления воздушным движением / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: ГосНИИАС, 2020. — 22 с.

В связи с постоянно возрастающей интенсивностью воздушного движения (ВД) в нашей стране в течение нескольких лет проводится модернизация системы управления воздушным движением (СУВД). Безопасность полётов (БП) является приоритетом развития гражданской авиации. Поэтому изменения в СУВД требуют тщательного анализа с целью определения того, что они не приводят к недопустимому изменению уровня БП.

Цель исследования заключалась в разработке имитационных моделей, алгоритмов и программ, предназначенных для анализа



безопасности полётов в системе управления воздушным движением.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи: анализ существующих методов и моделей оценки БП; разработка методов и алгоритмов анализа БП с применением имитационного моделирования; разработка имитационной модели управляемого ВД, основанной на подробном моделировании операций диспетчеров по управлению ВД, обнаружению и разрешению конфликтов; разработка программного средства (ПС), предназначенного для анализа БП в системах управления воздушным движением.

Были разработаны:

- метод анализа БП в СУВД с использованием имитационного моделирования (ИМ);
- алгоритм формирования случайных исследовательских потоков ВД на основе реальных фактических планов полёта для проведения статистического ИМ;
- алгоритм получения статистических данных посредством сохранения состояния системы в определённые моменты и возврата к сохранённым состояниям;
- имитационная модель, подробно моделирующая операции по управлению ВД, позволяющая анализировать БП с учётом совокупности детерминированных и случайных факторов, влияющих на БП;
- структура и состав программного средства, предназначенного для анализа БП в секторе ОВД.

Разработанные модели и алгоритмы явились основой для практической реализации программного средства (ПС), предназначенного для анализа БП в СУВД.

На основе полученных в работе результатов были проведены исследования по оценке БП при организации Санкт-Петербургского укрупнённого центра ОВД. Также были проведены исследования по оценке БП для перспективной структуры воздушного пространства (ВП) Московского районного диспетчерского центра. Результаты исследований были учтены при принятии решения о внедрении перспективной структуры ВП в эксплуатацию.

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Работа выполнена в Государ-

ственном научно-исследовательском институте авиационных систем. Защита состоялась в Московском авиационном институте (национальный исследовательский университет).

Полиев А. В. Разработка алгоритмов для распознавания команд речевого интерфейса кабины пилота / Автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: МФТИ, 2020. — 23 с.

Разработан автоматический алгоритм разбиения слов на однородные части, в основе которого нахождение положения границ частей производится с помощью многопараметрической оптимизации. Сформулированы критерии, реализующие принцип максимизации меры сходства фонетического материала внутри части и меры различия между соседними частями. Для численного решения задачи с высоким быстродействием предложены алгоритмы, основанные на методе динамического программирования.

Разработан алгоритм улучшения качества эталона, основанный на выделении и оптимизации главных компонент. Эталон, полученный с помощью оптимизации коэффициентов при главных компонентах, показал значительно меньшее число ошибок при распознавании большинства записей.

Изучены способы и разработаны алгоритмы сжатия информации о параметрическом портрете с помощью применения полиномов Чебышёва. Эксперименты показали, что сжатие может происходить как отдельно по частотам и по времени, так и по обоим измерениям одновременно. В последнем случае можно сократить место для хранения параметрического портрета в 5–10 раз практически без ухудшения качества распознавания.

Разработаны алгоритмы на основе формулы Байеса и метода комитетов, позволяющие заметно уменьшить количество ошибок распознавания при использовании нескольких эталонов. Работоспособность обоих разработанных алгоритмов подтверждается результатами тестирования. При использовании 7 эталонов, полученных по записям различных дикторов, достигается заметное снижение процента ошибок в 1,5–2 раза — средняя ошибка для алгоритма на основе формулы Байеса снизилась с 8,42 до 5,62 %, а для алгоритма на основе метода комитетов до 5,3 и до 3,13 % при использовании подстройки по времени.

Изучены и модифицированы алгоритмы распознавания речевых команд на основе искусственных нейронных сетей глубокого обучения.

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации. Работа выполнена в Московском физико-техническом институте (национальный исследовательский университет). Защита состоялась в Московском авиационном институте (национальный исследовательский университет).

Протопопов А. Л. Живучесть литых деталей подвижного состава с технологическими дефектами / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: РУТ, 2020. – 24 с.

Выполненные расчётно-экспериментальные исследования подтверждают, что представляется возможным с приемлемой точностью идентифицировать спектр эксплуатационной нагруженности несущих элементов трёхэлементных тележек моделей типа 18–100 средствами виртуального моделирования. В частности, создана 3D-модель грузового вагона как механическая система абсолютно твёрдых тел и упругих боковых рам, динамическое поведение которых моделировалось методом динамической редукции Крейга–Бемптона.

Анализ НДС боковой рамы тележки грузового вагона показывает, что наиболее опасной зоной, с точки зрения зарождения и развития усталостной трещины, является угол буксового проёма (зона радиуса R55). Это подтверждается многочисленными примерами их разрушения в эксплуатации. Моделирование развития усталостной трещины до потери несущей способности рамы путём воспроизведения литейного технологического дефекта в зоне угла буксового проёма показывает её удовлетворительное соответствие двухстадийности протекания (поверхностная и сквозная). Это подтверждается исследованиями мест изломов, разрушившихся в эксплуатации боковин.

Достигнуто близкое совпадение расчётных результатов на разработанной модели развития трещины со случаями разрушения рам в эксплуатации.

Определено, что время прорастания внутреннего дефекта литья металла в углу буксового проёма рамы тележки до выхода его на

поверхность рамы в зависимости от глубины залегания (3–6 мм) и площади схематизации (25–120 мм) эллиптической трещиной находится в интервале от полугода до 40 лет.

Установлено, что период развития до разрушения (живучесть) рамы со сквозной трещиной составляет 2–5 % от общего времени накопления повреждений до разрушения.

Площадь усталостной трещины при хрупком изломе в зависимости от сезона эксплуатации может составлять от 20 до 50 процентов площади сечения рамы в этом месте (меньшее значение – в зимний период).

Для безопасной (с надёжностью 0,999) эксплуатации грузовых вагонов в межремонтный период предлагается установить минимальный допускаемый коэффициент запаса живучести $[n_{ж}]$ несущих литых элементов тележки равный 2,0. Применительно к действующей в настоящее время периодичности ремонтов грузового вагона (100–200 тыс. км пробега) этот показатель обеспечивается, если трещина глубиной до 2,6 мм и шириной до 5,6 мм.

Установлена зависимость величины запаса живучести $[n_{ж}]$ от значения площади поверхностного дефекта S . Исходя из этого, представляется возможным назначать периодичность осмотров боковых рам методами неразрушающего контроля с заданным уровнем запаса по условиям безопасности их эксплуатации в этот период.

Предложенная методика исследования эксплуатационного НДС боковой рамы тележки грузового вагона может быть применена на этапе проектирования новых конструкций трёхэлементных тележек моделей типа 18–100 для оценки с приемлемой точностью спектра эксплуатационной нагруженности их несущих элементов средствами виртуального моделирования.

Дальнейшие перспективы разработки темы могут быть связаны с вопросом уточнения развития поверхностных и внутренних дефектов в буксовом проёме боковой рамы грузового вагона не только по первой форме (отрыв) но и по второй (сдвиг) и третьей (срез) формам.

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация. Работа выполнена в Российском университете транспорта.



ABSTRACTS of Ph.D. THESES

**Selected abstracts of Ph.D. theses submitted
at Russian transport universities and research
organizations**

For the original Russian texts please see p. 248.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-248-254>

Afanasyev, V. S. Complex experimental evaluation of dynamic parameters of span structures of girder bridges. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Kompleksnaya eksperimentalnaya otsenka dinamicheskikh parametrov proletrykh stroenii balochnykh mostov. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, RUT publ., 2020, 25 p.

The main goal of the work was to improve the system for assessing dynamic parameters of span structures of girder bridges during the operation period for transition from planned maintenance measures to activities based on the actual state of the structure within the framework of the industrial Internet of Things implementation. A number of tasks have been solved. The application of the method of vibration control of span structures of girder bridges to determine the technical condition of the structure has been substantiated. A sequence of calculations has been developed prior to dynamic testing of span structures of girder bridges. Operational modal analysis for field tests of span structures of girder bridges has been implemented. A technique has been developed for determining carrying capacity of span structures of girder bridges based on data on their dynamic parameters. Methods for considering the effect of temperature changes in the bridge span on its dynamic parameters are considered.

The main scientific result of the work is to improve the system for assessing the technical condition of bridges and to create prerequisites for introduction of the industrial Internet of Things in the field of bridge infrastructure. The scientific novelty of the most significant results is as follows: statistical models of regression analysis have been developed to determine the correlation between carrying capacity and dynamic parameters of span structures of girder bridges; for the first time, mathematical methods of statistics and machine learning were used to consider the influence of temperature changes on the results of assessing dynamic parameters of bridge spans.

A method is proposed for predicting carrying capacity of span structures of the same type of girder bridges based on data on their dynamic parameters, a software has been developed for dynamic testing of beam bridges in order to determine the optimal vibration measurement time, while the effect of temperature changes in the

bridge span on its dynamic parameters was considered.

05.23.11 – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels. The work was carried out at Russian University of Transport.

Goryunov I. O. Particularities of selection of parameters of traction electric engines considering the similarity of electromagnetic processes. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Osobennosti vybora parametrov tyagovykh elektricheskikh mashin s uchytom podobiya elektromagnitnykh protsessov. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, RUT publ., 2020, 24 p.

Today it is preferable to use numerical methods of calculating magnetic fields. Currently, the widespread use of computers allows to make high-precision calculations of the magnetic field of electric engines. However, methods based on the application of Kirchhoff laws do not fully solve the problem. Methods of similarity theory are widely used in the analysis of physical processes. In the case of magnetic processes in electric engines, the methods of similarity theory have not been widely used. Therefore, improving the methods of calculating and analyzing the magnetic field in electric engines using the methods of similarity theory is an actual task.

The similarity of magnetic processes in collector traction electric engines can be characterized based on n -theorem. The following ratios should be used as dimensionless groups:

- the ratio between anchor and main poles' MMF;
- the ratio between anchor and additional poles' MMF;
- the ratio between main and additional poles' MMF.

Loss of energy from steel magnetization reversal is one of the important components of the overall loss of energy in electromechanical energy conversion. Mathematical modelling confirmed that the greatest losses in the steel anchors of the electric motor are at the bottom of the groove. The final criterion, which characterizes the efficiency of energy conversion by electric engines of constant and pulsating current, including by traction collector electric motors, is the ratio between energy losses during magnetization reversal of steel anchors and energy consumed (total losses).

The solution of the criterion problem allowed to determine the coefficients for calculating the main dimensions of traction electric engine, to identify dependencies between main dimensions considering the area of the anchor groove.

Specialty 05.09.01 – Electrical mechanics and electrical devices. The work was performed at Russian University of Transport.

Nekrasov G. I. Improving the efficiency of cooling system of locomotive diesel engine using individual water pump drive. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Povyshenie effektivnosti systemy ohlazhdeniya teplovoznogo dizelya s ispolzovaniem individual'nogo privoda vodyanykh nasosov. Avtoref. dis... kand. tech. nauk]. Moscow, RUT publ., 2020, 24 p.

After conducting patent and information search, priority areas for the development of cooling system elements have been identified and the technical requirements for the system with individual water pumps drive have been formulated.

A mathematical model has been developed to estimate the distribution of heat and coolant velocity on the front side of the radiators and to calculate the minimum performance of the water pump, ensuring its operation without overcooling and overheating of the coolant at any values from within the design range of ambient temperatures. The results of the simulation are confirmed by the results of comparative tests, the simulation error was 3 %.

Cooling system control algorithms have been built to maintain the recommended temperature of cold and hot circuits with minimal energy consumption by the cooling system drive.

Algorithms of the system of control of individual drives of water pumps of locomotive for cold and hot circuits have been developed, allowing, as compared to the serial system, to:

- ensure the circulation of the coolant after the diesel stops;
- increase the idle time of the locomotive with the stopped diesel engine without overcooling of the coolant within the entire calculation range of ambient temperature values;
- minimize power consumption of diesel cooling system.

The developed mathematical model of the diesel cooling system in operation showed that the use of individual water pump drive reduces the total fuel consumption spent on the cooling system drive by 22,4 % by reducing the operating time of the cooling chamber fans, and reduces the operating consumption of diesel fuel by 2,5 %.

Specialty 05.22.07 – Railway rolling stock, train traction and electrification. The work was performed at Russian University of Transport.

Obukhov, Yu. V. Simulation models, algorithms and programs for the analysis of flight safety in the air traffic control system. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Imitatsionnye modeli, algoritmy i programmy dlya analiza bezopasnosti poletov v sisteme upravleniya vozdushnym dvizheniem. Avtoref. dis... kand. tekh. nauk]. Moscow, GosNIAS, 2020, 22 p.

Due to the constantly increasing intensity of air traffic (AT) in our country, modernization of the air traffic control system (ATCS) has been carried out for several years. Flight safety (FS) is a priority for development of civil aviation. Therefore, changes in

ATCS require careful analysis in order to determine that they do not lead to an unacceptable change in the level of FS.

The purpose of the study was to develop simulation models, algorithms and programs designed to analyze safety of flights in the air traffic control system.

To achieve this goal in the thesis, the following tasks were solved: analysis of existing methods and models for assessing FS; development of methods and algorithms for FS analysis using simulation; development of a simulation model of a controlled air traffic based on detailed modelling of dispatchers' operations during air traffic controlling, conflict detection and resolution; development of a software tool (ST) intended for the analysis of FS in air traffic control systems.

The following was developed:

- method for analyzing FS in ATCS using simulation;
- an algorithm for generating random searching of air traffic flows based on real actual flight plans for statistical simulation;
- algorithm for obtaining statistical data by saving the state of the system at certain moments and returning to the saved states;
- a simulation model, which simulates in detail operations for air traffic control, which makes it possible to analyze FS, taking into account totality of deterministic and random factors affecting FS;
- structure and composition of the software tool designed for analysis of FS in the ATCS sector.

The developed models and algorithms were the basis for practical implementation of the software tool intended for the analysis of FS in the ATCS.

On the basis of the results obtained in the work, studies were carried out to assess FS during organization of St. Petersburg Integrated Air Traffic Safety Center. Also, studies were carried out to assess the FS for the prospective airspace structure of Moscow regional dispatch center. The research results were taken into account when making a decision on introduction of a promising airspace structure into operation.

Specialty 05.13.18 – Mathematical modelling, numerical methods and program complexes. The work was performed at State Research Institute of Aviation Systems. The defense took place at Moscow Aviation Institute (National Research University).

Polyev A. V. Development of algorithms to recognize the commands of the cockpit speech interface. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Razrabotka algoritmov dlya raspoznavaniya rechevogo interfeisa kabiny pilota. Avtoref. dis... kand. tekh. nauk]. M., MIPT, 2020, 23 p.

An automatic algorithm for splitting words into homogeneous parts has been developed, the positioning of the boundary of the parts is made with the help of multiparametric optimization. Criteria have been formulated that implement the principle of maximizing the similarity of phonetic material within the part and measure of difference between the



neighbouring parts. Algorithms based on the dynamic programming method are offered for numerical solution of a high-performance problem.

An algorithm for improving the quality of the reference standard has been developed, based on selection and optimization of the principal components. The reference standard obtained by optimizing the coefficients for the principal components showed a significantly lower number of errors in recognition of most of the records. Methods have been studied and algorithms have been developed for compressing information on a parametric portrait using Chebyshev polynomials. Experiments have shown that compression can be attained either separately for frequency and in time, or for both dimensions simultaneously. In the latter case, it is possible to reduce the storage space for the parametric portrait by 5–10 times with practically no deterioration in the recognition quality.

Algorithms based on Bayes formula and the method of committees have been developed, allowing to significantly reduce the number of recognition errors when using multiple standards. The performance of both developed algorithms is confirmed by the test results. When using 7 sample standards obtained from the recordings of various speakers, a noticeable decrease in the percentage of errors by 1.5–2 times is achieved: the average error for the algorithm based on Bayes formula decreased from 8.42 to 5.62 %, and for the algorithm based on the committee method to 5.3 and to 3.13 % when using time adjustment.

The algorithms for recognition of speech commands based on artificial neural networks of deep learning have been studied and modified.

05.13.01 – System analysis, management and information processing. The work was carried out at Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). The defense took place at Moscow Aviation Institute (National Research University).

Protopopov, A. L. Survivability of cast parts of rolling stock with technological defects. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Zhivuchest' litykh detalei podvizhnogo sostava s tekhnologicheskimi defektami. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, RUT publ., 2020, 24 p.

The performed computational and experimental studies confirm that it is possible to identify with acceptable accuracy the spectrum of operational loading of the load-bearing elements of three-element bogies of 18–100 type models by means of virtual modelling. A 3D model of a freight wagon was created as a mechanical system of absolutely rigid bodies and elastic side frames, the dynamic behaviour of which was simulated by the Craig-Bampton dynamic substructuring method.

Analysis of the stress-strain state of the side frame of a freight wagon bogie shows that the most dangerous zone, from the point of view of initiation and development

of a fatigue crack, is the axle box opening's corner (radius zone R55). This is confirmed by numerous examples of its destruction during operation. Modelling the development of a fatigue crack before the loss of the frame's bearing capacity by reproducing a casting technological defect in the zone of the axle box opening's corner shows its satisfactory correspondence to the two-stage (surface and through) development. This is confirmed by investigation of the fracture locations of the sidewalls that collapsed during operation.

A close coincidence of the results simulated on the developed model of crack propagation with cases of frame failure during operation has been achieved.

It has been determined that time of growth of an internal defect in casting metal in the corner of the axle-box opening of the bogie frame until it reaches the surface of the frame, depending on the depth (3–6 mm) and the area of schematization (25–120 mm), by an elliptical crack is in the range from six months to 40 years.

It was found that the period of development before destruction (survivability) of a frame with a through crack is 2–5 % of the total time of damage accumulation before destruction.

The area of a fatigue crack in a brittle fracture, depending on the season of operation, can be from 20 to 50 percent of the cross-sectional area of the frame in this place (the smaller value is in the winter period).

For safe (with a reliability of 0.999) operation of freight wagons during the period between overhauls, it is proposed to establish the minimum allowable survivability margin $[n_s]$ of bearing cast elements of the bogie equal to 2.0. Regarding the current frequency of freight wagons' repairs (per 100–200 thousand km of run), this indicator is provided if a crack is up to 2.6 mm deep and up to 5.6 mm wide.

The dependence of the magnitude of the survivability margin $[n_s]$ on the value of the surface defect area S was determined. Based on this, it seems possible to foresee the frequency of inspections of the side frames by non-destructive testing methods with a given level of margin for the safety conditions of their operation during this period.

The proposed method for studying the operational stress-strain state of the side frame of a freight wagon's bogie can be applied at the stage of designing new three-element bogies of 18–100 type models to assess with acceptable accuracy the spectrum of the operational loading of their load-carrying elements by means of virtual modelling.

Further prospects for development of the topic can be related to the issue of clarifying development of surface and internal defects in the axle box opening of the side frame of a freight wagon not only for the case of detachment but also for the cases of shifting and cutting.

05.22.07 – Railway rolling stock, train traction and electrification. The work was performed at Russian University of Transport. ●

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

Со списком литературы,
изданной на английском языке,
можно ознакомиться на с. 256.

*For the list of the titles originally published in
English, and for the English list of the titles
published in Russian please see p. 256.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-255-256>

Анисимов Ю. П., Бычков В. П., Куксова И. В. [и др.]. Инновационная деятельность на автомобильном транспорте: Учеб. пособие / Под науч. ред. д.э.н. В. П. Бычкова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Инфра-М, 2020. — 402 с. ISBN 978-5-16-015480-0.

Власов А. В., Губин А. В., Дмитриева О. А. [и др.]. Таможенно-транспортная логистика: Монография. — М.: Знание-М, 2020. — 187 с. ISBN 978-5-907345-05-8.

Власов В. М., Жанказиев С. В., Круглов С. М. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: Учебник / Под ред. В. М. Власова. — 15-е изд. — М.: Академия, 2020. — 427 с. ISBN 978-5-4468-9332-4.

Власова О. С., Клименти Н. Ю., Текушин Д. В. Организация работ на транспорте в чрезвычайных ситуациях: Учеб. пособие. — Волгоград: ВолгГТУ, 2020. — 115 с. ISBN 978-5-9948-3661-3.

Данилов Е. Б. Вагоны метрополитена моделей 81-765/766/767: экипажная часть, сцепные и тормозные устройства: Учеб. пособие. — М.: ДеЛи-бри, 2020. — 86 с. ISBN 978-5-4491-0570-7.

Дементьев А. П., И. Д. Узеньюк, Т. А. Лунина [и др.] Калькулирование себестоимости текущего содержания пути на экспериментальном полигоне Западно-Сибирской железной дороги: Монография / Под ред. А. П. Дементьева. — Новосибирск: Наука, 2020. — 84 с. ISBN 978-5-8119-0845-5.

Жаркова Е. А., Бердышева Ю. А. Самоорганизация интегрированного формирования железнодорожного транспорта: Монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. — 159 с. ISBN 978-5-7782-4157-2.

Иванов М. А., Яппаров Е. Р., Кубрин С. С. Применение тренажёров, как одного из способов снижения транспортных происшествий: Научная монография. — М.: Сам Полиграфист, 2020. — 106 с. ISBN 978-5-00166-202-0.

Ильин Н. Н. Транспортно-технические судебные экспертизы: вопросы теории и практики:

Монография. — М.: Юрлитинформ, 2020. — 287 с. ISBN 978-5-4396-1963-4.

Кошелева Т. Н., Грозовская Е. В. Учебное пособие по дисциплине «Экономика труда на воздушном транспорте». — СПб.: КультИнформ-Пресс, 2020. — 132 с. ISBN 978-5-8392-0829-2.

Лаврусь О. Е., Мулюкин О. П., Новикова В. Н. Математическое моделирование динамических процессов в пневмо-гидросистемах транспортной техники: Монография. — Самара: Изд-во Сам-ГУПС, 2020. — 258 с. ISBN 978-5-98941-318-8.

Мазнев А. С., Шатнев О. И. Электрические аппараты и цепи подвижного состава: Учеб. пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Инфра-М, 2020. — 277 с. ISBN 978-5-16-015014-7.

Петрова Т. А., Иванов Р. Д., Чеканов Н. Н., Карданов В. А. Создание сети транспортных артерий в Российской Федерации как фактор развития внешнеэкономической деятельности: Монография. — М.: Русайнс, 2020. — 115 с. ISBN 978-5-4365-2875-5.

Покровская О. Д., Федоренко Р. В. Терминалистика: общие вопросы: Монография. — Казань: Бук, 2020. — 166 с. ISBN 978-5-00118-424-9.

Покусаев О. Н., Потапов И. П. Транспортно-пересадочные узлы на высокоскоростных магистралях: Учебное пособие. — М.: РУТ (МИИТ), 2020. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-7473-1019-3.

Пузина Е. Ю., Туйгунова А. Г., Худоногов И. А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций: Монография. — Иркутск: Иркутский гос. ун-т путей сообщ., 2020. — 183 с. ISBN 978-5-98710-376-0.

Секирников В. Е., Никитина Л. Э., Тимофеева Л. В. Теоретическая подготовка водителя автомобиля: Учебник. — 3-е изд., испр. — М.: Академия, 2020. — 331 с. ISBN 978-5-4468-9427-7.

Склярова А. А., Щербаков А. П., Куракина Е. В. Эффективность и надёжность процессов и технологий при эксплуатации наземных транспортно-технологических машин: Монография. — СПб.: Петрополис, 2020. — 186 с. ISBN 978-5-9676-1191-9.

Тупикин Е. И. Экологические основы природопользования: Учеб. пособие. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2020. — 285. ISBN 978-5-222-30081-7.

Цевелёв А. В. Экономика и управление материальными ресурсами на железнодорожном транспорте: Учебник. — М.: Инфра-М, 2020. — 364 с. ISBN 978-5-16-016177-8.

Подготовила Н. ОЛЕЙНИК ●





NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

For the original list of editions published in Russian please see p. 255.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-255-256>

Anisimov, Yu. P., Bychkov, V. P., Kuksova, I. V. [et al]. Innovative activity in railway transport: Study guide [*Innovatsionnaya deyatel'nost' na zheleznodorozhnom transporte: Ucheb. posobie*]. Sc. Ed. D.Sc. (Economics) V. P. Bychkov. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Infra-M publ., 2020, 402 p. ISBN 978-5-16-015480-0.

Danilov, E. B. Metro carriages models 81-765/766/767: undercarriage, coupling and braking devices: Study guide [*Vagony metropolitena modelei 81-765/766/767: ekipazhnaya chast', stsepnie i tormoznye ustroystva: Ucheb. posobie*]. Moscow, De' Libri publ., 2020, 86 p. ISBN 978-5-4491-0570-7.

Dementiev, A. P., Uzenyuk, I. D., Lunina, T. A. [et al]. Calculation of the cost of the current track maintenance at the experimental range of the West Siberian Railway: Monograph [*Kalkulirovanie sebestoimosti tekushchego soderzaniya puti na eksperimentalnom poligone Zapdno-Sibirskoi dorogi: Monografiya*]. Ed. by A. P. Dementiev. Novosibirsk, Nauka publ., 2020, 84 p. ISBN 978-5-8119-0845-5.

Ilyin, N. N. Transportation and technical forensic examinations: theory and practice: Monograph [*Transportno-tekhnicheskie sudebnye ekspertizy: voprosy teorii i praktiki: Monografiya*]. Moscow, JurLitinform publ., 2020, 287 p. ISBN 978-5-4396-1963-4.

Ivanov, M. A., Yapparov, E. R., Kubrin, S. S. Application of simulators as a way to reduce traffic accidents: Scientific monograph [*Primenenie trenazherov kak odnogo iz sposobov snizheniya transportnykh proissheshtviy: Nauchnaya monografiya*]. Moscow, Sam Polygraphist publ., 2020, 106 p. ISBN 978-5-00166-202-0.

Kosheleva, T. N., Grozovskaya, E. V. Textbook on the discipline of Economics of labour in air transport [*Uchebnoe posobie po distsipline «Ekonomika truda na vozduzhnom transporte»*]. St. Petersburg, KultInformPress publ., 2020, 132 p. ISBN 978-5-8392-0829-2.

Lavrus, O. E., Mulyukin, O. P., Novikova, V. N. Mathematical modelling of dynamic processes in pneumatic-hydraulic systems of transport equipment: Monograph [*Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v pnevmo-gidrosistemakh transportnoi tekhniki: Monografiya*]. Samara, Publishing house of SamGUPS, 2020, 258 p. ISBN 978-5-98941-318-8.

Maznev, A. S., Shatnev, O. I. Electric devices and rolling stock circuits: Study guide [*Elektricheskie apparaty i sepi podvijnogo sostava: Ucheb. posobie*]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Infra-M, 2020, 277 p. ISBN 978-5-16-015014-7.

Petrova, T.A., Ivanov, R. D., Chekanov, N. N., Kardanov, V. A. Creation of a network of transport arteries in the Russian Federation as a factor in development of foreign economic activity: Monograph [*Sozdanie seti transportnykh arterii v Rossiiskoi Federatsii kak faktor razvitiya vneshneekonomicheskoi deyatel'nosti: Monografiya*]. Moscow, Ruscience, 2020, 115 p. ISBN 978-5-4365-2875-5.

Pokrovskaya, O. D., Fedorenko, R. V. Terminalistics: general issues: Monograph [*Terminalistika: obshchie voprosy: Monografiya*]. Kazan, Buk publ., 2020, 166 p. ISBN 978-5-00118-424-9.

Pokusaev, O. N., Potapov, I. P. Transport and interchange hubs on high-speed highways: Study guide [*Transportno-peresadochnie uzly na vysokoskorostnykh*

magistralyakh: Uchebnoe posobie]. Moscow, RUT (MIIT), (CD-ROM), 2020. ISBN 978-5-7473-1019-3.

Puzina, E. Yu., Tuigunova, A. G., Khudonogov, I. A. Monitoring systems for power transformers of traction substations: Monograph [*Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii: Monografiya*]. Irkutsk, Irkutsk State Transport University, 2020, 183 p. ISBN 978-5-98710-376-0.

Sekirnikov, V. E., Nikitina, L. E., Timofeeva, L. V. Theoretical training of a car driver: Textbook [*Teoreticheskaya podgotovka voditelya avtomobilya: Uchebnik*]. 3rd ed., rev. Moscow, Academia publ., 2020, 331 p. ISBN 978-5-4468-9427-7.

Sklyarova, A. A., Shcherbakov, A. P., Kurakina, E. V. Efficiency and reliability of processes and technologies in operation of ground transport and technological machines: Monograph [*Effektivnost' i nadezhnost' protsessov i tekhnologii pri ekspluatatsii nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin: Monografiya*]. St. Petersburg, Petropolis publ., 2020, 186 p. ISBN 978-5-9676-1191-9.

Tsevelev, A.V. Economics and material resource management in railway transport: Textbook [*Ekonomika i upravlenie materialnymi resursami na zheleznodorozhnom transporte*]. Moscow, Infra-M publ., 2020, 364 p. ISBN 978-5-16-016177-8.

Tupikin, E. I. Ecological bases of rational environmental management: Study guide [*Ekologicheskoe osnovy prirodoopolzovaniya: Ucheb. posobie*]. Rostov-on-Don, Phoenix, 2020, 285 p. ISBN 978-5-222-30081-7.

Vlasov, A. V., Gubin, A. V., Dmitrieva, O. A. [et al]. Customs and transport logistics: Monograph [*Tamozhenno-transportnaya logistika: Monografiya*]. Moscow, Znanie-M publ., 2020, 187 p. ISBN 978-5-907345-05-8.

Vlasov, V. M., Zhankaziev, S. V., Kruglov, S. M. Maintenance and repair of cars: Textbook [*Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobilei: Uchebnik*]. Ed. by V. M. Vlasov. 15th ed. Moscow, Academia publ., 2020, 427 p. ISBN 978-5-4468-9332-4.

Vlasova, O.S., Kliment, N. Yu., Tekushin, D. V. Organization of transport work in emergency situations: Study guide [*Organizatsiya rabot na transporte v chrezvychaynykh situatsiyakh: Ucheb. posobie*]. Volgograd, VolgSTU, 2020, 115 p. ISBN 978-5-9948-3661-3.

Zharkova, E. A., Berdysheva, Yu. A. Self-organization of the integrated formation of railway transport: Monograph. [*Samoorganizatsiya integrirovannogo formirovaniya zheleznodorozhnogo transporta: Monografiya*]. Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2020, 159 p. ISBN 978-5-7782-4157-2.

Compiled by N. OLEYNIK ●

Selected editions originally published in English

Guria, Jagadish. Estimating the Human Cost of Transportation Accidents. 1st ed. Methodologies and Policy Implications. *Elsevier*, 4th March 2020, 208 p. Paperback ISBN 9780128126110; eBook ISBN 9780128126127.

Hensher, D. Bus Transport. Demand, Economics, Contracting, and Policy. 1st ed. *Elsevier*, 17th March 2020, 526 p. Paperback ISBN 9780128201329; eBook ISBN 9780128203934.

Lu, Huapu. Eco-Cities and Green Transport. 1st ed. *Elsevier*, 7th April 2020, 408 p. Paperback ISBN 9780128215166; eBook ISBN 9780128215173.

Maritime Supply Chains. 1st ed. Editors: Editors: Vanelander, Th., Sys, Ch. *Elsevier*, 25th March 2020, 296 p. Paperback ISBN 9780128184219; eBook ISBN 9780128189320.

Schiaw, Ph. Integrated Optimization in Public Transport Planning. Springer Nature Switzerland AG, 2020, 191 p. Hardcover ISBN 978-3-030-46269-7.

Sridhar, K., Gadgil, R., Dhirga, C. Paving the Way for Better Governance in Urban Transport. The Transport Governance Initiative. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020, 326 p. Hardcover ISBN 978-981-13-9619-9

АНЕКДОТ

НА ОБОЧИНЕ

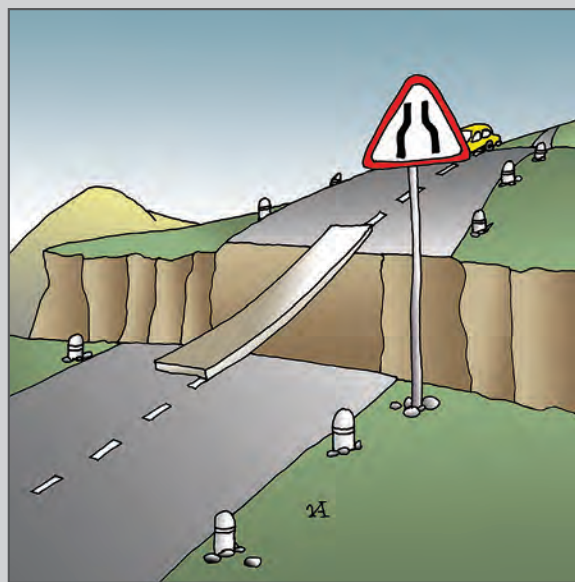


Рис. Иван Анчуков / Ivan Anshukov

• — Кем вы работаете?

— Я помогаю людям обрести своё место в данный момент их жизни.

— Так вы психолог?

— Нет, я таксист.

• — Здравствуйте, это операция «Трезвый водитель».

— Вот трезвых и тормозите! Я-то тут причём?

• — Изобретение автомобиля —

это огромный прогресс! Люди стали передвигаться намного быстрее!

— Конечно, особенно на переходах через улицу...

Современные афоризмы Modern sayings

• Всё как железнодорожный узел, где прошлое и будущее скользят мимо друг друга, не соприкасаясь.

Тимоти Мортон

• Everything is a railway junction where past and future are sliding over one another, not touching.

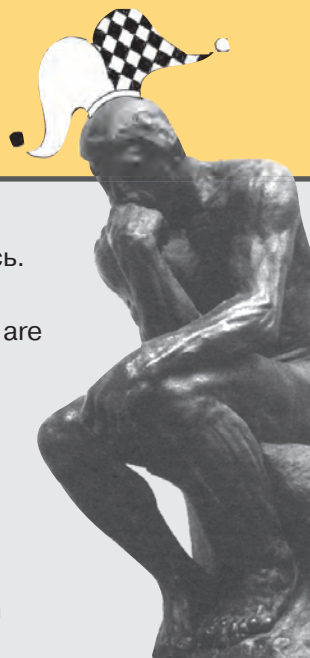
Timothy Morton

• На каждую сложную проблему найдётся ответ ясный, простой и неверный.

Генри Луис Менкен

• For every complex problem there is an answer that is clear, simple, and wrong.

Henry Louis Mencken





**World of Transport and
Transportation**

Vol. 18, Issue 3, 2020

Editor-in-Chief **Boris Lyovin**

For your letters:

Mir Transporta,
9, str. 9, Obraztsova ul.,
Moscow, 127994, Russia.
Tel/fax +7(495)684 2877
e-mail: mirtr@mail.ru
wtjournal@gmail.com

Почтовый адрес редакции:

127994, Москва,
ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Тел/факс (495)684 2877
e-mail: mirtr@mail.ru
wtjournal@gmail.com



ISSN 1992-3252



9 771992 325778 >