

ТРАНСПОРТ МИР

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

6²⁰²⁰
(91)

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

Александр БРАТУСЬ, Александра ОЧЕРЕТЯНАЯ

Математическая модель распространения эпидемии внутри железнодорожного купейного вагона 6

Дмитрий МАЧЕРЕТ, Руслан ТИТОВ

Стратегическое планирование и экономическая оценка развития интермодальной транспортной инфраструктуры 30

Анатолий КИСЕЛЕНКО, Евгений СУНДУКОВ

Оптимистический и пессимистический сценарии формирования транспортных подходов к Арктической транспортной системе на основе достижения целевых показателей 46

НАУКА И ТЕХНИКА

Евгений КАИМОВ

Риск-ориентированный подход при оценке технического состояния фундаментов мостовых сооружений 64

Иван ЧЕБЫКИН

Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения 74

Виктор ПУПАТЕНКО, Юрий СУХОБОК, Геннадий СТОЯНОВИЧ

Определение электрофизических свойств грунтов в откосных зонах земляного полотна при георадарном обследовании 88

Артур ДМИТРЕНКО, Мария КОЛОСОВА

Особенности расчёта характеристик энергетических комплексов, использующих низкопотенциальную энергию 108

Дмитрий ЕФАНОВ

Система мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе промышленного «Интернета вещей» 118

ЭКОНОМИКА

Александр СЕМЕНОВ, Игорь ЛАКИН

Обоснование необходимости систем диагностирования локомотивов 136

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

Дмитрий ГУДКОВ, Валерий СТАРЫНИН

Влияние расстояния перевозок грузов на эксплуатационные расходы автотранспортного предприятия 158

Александр БУТОВ

Стратегия развития автомобилестроительной компании на российском авторынке на примере ПАО «Соллерс» 170

Игорь СОЛДАТЕНКО

Зарубежные подходы к проведению аудита эффективности транспортной системы на региональном уровне 184

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Алексей ГУЦ

Модели организации комбинированных (смешанных) пассажирских перевозок 208

Иосиф СПИРИН, Юлия ГРИШАЕВА, Ольга МАТАНЦЕВА

Индикатор для оценки обеспеченности подвижным составом городского пассажирского транспорта общего пользования 220

Дмитрий МАЛЬЦЕВ, Дмитрий РЕПЕЦКИЙ

Контроль производственного персонала при выполнении работ технического обслуживания автомобилей 238

Елена ИВАНОВА, Татьяна ФЛЯГИНА

Развитие ВСМ в России с учётом динамики пассажиропотоков и общественного мнения 248

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Марек ГРАФФ

Центральная Андская железная дорога в Перу 272

Пресс-архив

Железная дорога во Французских Пиренеях 304

Фадский виадук на Орлеанской железной дороге (Франция) . . . 308

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Авторефераты диссертаций 314

Новые книги о транспорте 320

Содержание номеров журнала «Мир Транспорта», вышедших в 2020 году в томе 18 323

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. 6

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

Alexander S. BRATUS, Alexandra S. OCHERETYANAYA

Mathematical Model of Spread of the Epidemic Inside a Railway
Compartment Coach 18

Dmitry A. MACHERET, Ruslan A. TITOV

Strategic Planning and Economic Assessment of Development
of Intermodal Transport Infrastructure 38

Anatoly N. KISELENKO, Evgeny Yu. SUNDUKOV

Optimistic and Pessimistic Scenarios for Development of Feeder
Network of the Arctic Transport System Based on Achievement
of Target Indicators 55

SCIENCE AND ENGINEERING

Evgeny V. KAIMOV

Risk-Based Approach in Assessing the Technical Condition
of Foundations of Bridge Structures 69

Ivan A. CHEBYKIN

Automating Road Traffic Monitoring Using Computer Vision 81

Victor V. PUPATENKO, Yuri A. SUKHOBOK, Gennady M. STOYANOVICH

Evaluation of Electrophysical Properties of Soils in the Slope
Zones of the Foundation During GPR Survey 98

Arthur V. DMITRENKO, Maria A. KOLOSOVA

Features of Calculating the Characteristics of Energy
Complexes Using Low-Grade Energy 113

Dmitry V. EFANOV

Monitoring System for Railway Automation Devices Based
on the Industrial Internet of Things 127

ECONOMICS

Alexander P. SEMENOV, Igor K. LAKIN

Justification of the Need for Locomotive Diagnostic Systems. 147

Dmitry V. GUDKOV, Valery V. STARYNIN

Influence of the Distance of Transportation of Goods
on Operating Costs of a Motor Transport Enterprise 164

EDITORIAL BOARD

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

BOARD MEMBERS

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

EDITORIAL STAFF

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

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

Alexander I. BUTOV

Development Strategy of a Car Manufacturing Company
in the Russian Car Market at the example of Sollers PJSC 177

Igor A. SOLDATENKO

Foreign Approaches to the Audit of Transport System
Efficiency at the Regional Level 196

ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL

Alexey V. GUTS

Models of Organisation of Combined (Mixed-Mode) Passenger
Transportation 214

Iosif V. SPIRIN, Yulia M. GRISHAEVA, Olga Yu. MATANTSEVA

Indicator for Assessing Availability of Rolling Stock for Public
Urban Passenger Transport 229

Dmitry V. MALTSEV, Dmitry S. REPETSKY

Control of Production Personnel when Performing
Vehicle Maintenance 243

Elena A. IVANOVA, Tatyana A. FLYAGINA

HSR Development in Russia Considering the Dynamics
of Passenger Traffic and Public Opinion 260

HISTORY WHEEL

Marek GRAFF

Central Andean Railway in Peru 289

NEWS FROM THE ARCHIVES

Railway in the French Pyrenees 309

Fade Viaduct on the Orleans Railway (France) 312

BIBLIO-DIRECTIONS

Abstracts of Ph.D. theses 317

New Books on Transport and Transportation 321

Contents of the Issues of World of Transport and Transportation

Journal published in Vol. 18 (2020) 328

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

Current issues are circulated in 300 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>.

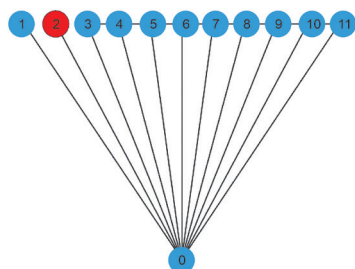
The journal is indexed in Russian scientific citation index system, Russian
state library, Socionet, Ulrichsweb, Library of Congress, WorldCat.org.

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.



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ 6

*Расчёт распространения
инфекционного заражения
в пассажирском вагоне.*



МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ 30

*Эффективность
интермодальной
транспортной
инфраструктуры:
ретроспективный анализ
российского опыта и выводы.*

АРКТИЧЕСКАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА 46

Сценарии развития подходов.

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ • THEORY



MATHEMATICAL MODEL 18

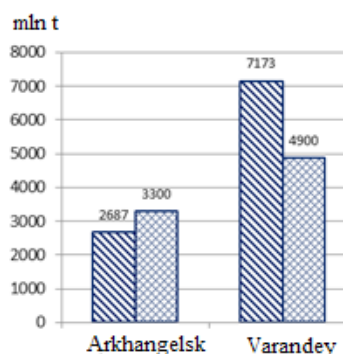
*Computational simulation
of spread of infection
in a passenger coach.*

METHODOLOGY OF ASSESSMENT 38

*Efficiency of intermodal
transport infrastructure:
retrospective analysis of
Russian experience and
findings.*

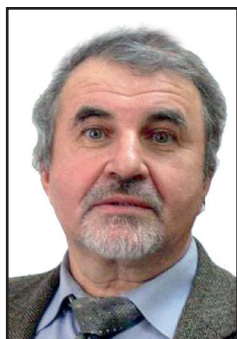
ARCTIC TRANSPORT SYSTEM 55

*Scenarios of development
of its feeder network.*





Математическая модель распространения эпидемии внутри железнодорожного купейного вагона



Александр БРАТУСЬ



Александра ОЧЕРЕТЯНАЯ

*Братусь Александр Сергеевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.
Очеретяная Александра Сергеевна – Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

В данной статье рассмотрен один из аспектов самой актуальной для 2020 года проблемы – распространения инфекций. В частности, в работе объектом распространения является железнодорожный вагон. Цель – описать распространение эпидемии в железнодорожном вагоне с помощью стохастической модели. Модель вагона представляется в виде сети. Процессы, происходящие на сети, считаются марковскими. В данной работе применено

два метода стохастического моделирования: моделирование на основе уравнений Колмогорова и алгоритм Гиллеспи. Уравнения Колмогорова используются для проверки применимости алгоритма Гиллеспи, который, в свою очередь, использован для расчётов модели вагона. Полученные данные были проанализированы, и на их основе можно сделать заключение о применимости модели на случай типичного пассажирского поезда.

Ключевые слова: транспорт, железнодорожный транспорт, SIS модель, стохастическое моделирование, железнодорожный вагон, распространение инфекций, марковский случайный процесс, уравнения Колмогорова, алгоритм Гиллеспи.

*Информация об авторах:

Братусь Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического моделирования и системного анализа Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, alexander.bratus@yandex.ru.
Очеретяная Александра Сергеевна – аспирант кафедры математического моделирования и системного анализа Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, sandra.och@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 16.06.2020, принята к публикации 22.10.2020.

For the English text of the article please see p. 18.

ВВЕДЕНИЕ

В конце 2019 года и в начале 2020 года мир потрясли массовые заражения, вызванные новой коронавирусной инфекцией COVID-19. В связи с этим математические модели и моделирование процессов распространения инфекций могут быть использованы для построения устойчивых систем для прогнозирования и противодействия такого рода природным катаклизмам.

Первое упоминание об эпидемиологической модели было сформулировано Даниэлем Бернулли в 1760 году с целью оценки влияния вакцинации от оспы на ожидаемую продолжительность жизни человека. Однако отсутствие глобальных работ в эпидемиологическом моделировании сохранялось вплоть до начала XX столетия. В 1927 году Уильям Огилви Кермак и Андерсон Грэй Маккендрик вывели знаменитую предельную теорему, которая предсказывает в зависимости от потенциала передачи инфекции критическую долю уязвимых групп населения, которая должна быть превышена в случае возникновения эпидемии¹. За этим последовала работа Мориса Бартлетта, который исследовал модели и данные для выявления факторов, определяющих устойчивость болезни в больших популяциях. Первая знаковая книга по математическому моделированию эпидемиологических систем была опубликована Норманом Бейли, что частично привело к признанию важности моделирования в области общественного здравоохранения. Учитывая разнообразие инфекционных заболеваний, изучаемых с середины 1950-х годов, было разработано впечатляющее многообразие эпидемиологических моделей [1].

Одним из основных каналов распространения инфекций, вызывающих заболевания, является транспорт. Исследования показали, что авиаперевозки [2; 3] и водный транспорт [4; 5] играют огромную роль в глобальных эпидемиях. В одной из последних работ по теме распространения COVID-19 было установлено, что первый случай, зарегистрированный в китайском Ухане в середине ноября 2019 года, быстро распространился на

остальной Китай через «авиаперевозки и высокоскоростные железнодорожные сети» [6].

В данной статье в качестве предмета исследования рассмотрен типичный вагон железнодорожного состава. В нашем случае — пассажирский вагон, используемый на сети ОАО «РЖД».

Цель данной работы — построение стохастической модели для описания распространения эпидемии в типичном купейном вагоне в зависимости от источника заражения.

Для реализации этой цели была разработана модель вагона, основанная на сетевом подходе, где узлами сети являются элементы купейного вагона, между которыми установлены рёбра согласно структуре вагона. Сеть реализована на языке Python с использованием пакета *NetworkX* [7].

События, происходящие на сети, базируются на марковских случайных процессах. Динамика распространения инфекций в вагоне реализована с помощью метода стохастического моделирования, а именно алгоритма Гиллеспи (англ. *Gillespie simulation*) [8]. Для проверки применимости данного алгоритма была разработана модель с ограничениями в явном виде на основе особого вида дифференциальных уравнений — уравнений Колмогорова.

В результате численных расчётов были получены зависимости, показывающие, что на распространение эпидемии в вагоне поезда влияют не только количество изначально заражённых и скорость заражения, но и расположение инфицированных пассажиров.

Кроме того, были предложены меры, которые могли бы позволить замедлить динамику распространения инфекции по вагону в виде изоляции заражённого купе.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящий момент существует два основных подхода к моделированию эпидемий: детерминированный [9, с. 157–182] и стохастический [10, с. 8–11]. Детерминированные модели не учитывают перемещение по вагону, что оказывает первоочередное влияние на распространение инфекции. Однако при этом результаты расчётов в рамках этих моделей позволяют выявить основные закономерности — произойдёт ли эпидемия, как долго она продлится и насколько будет велика.

¹ См., напр., Breda, D., Diekmann, O., de Graaf, W. F., Pugliese, A., Vermiglio, R. On the formulation of epidemic models (an appraisal of Kermack and McKendrick). *Journal of Biological Dynamics*, 2012, Vol. 6, Iss. 2, pp. 103–117. DOI: 10.1080/17513758.2012.716454.



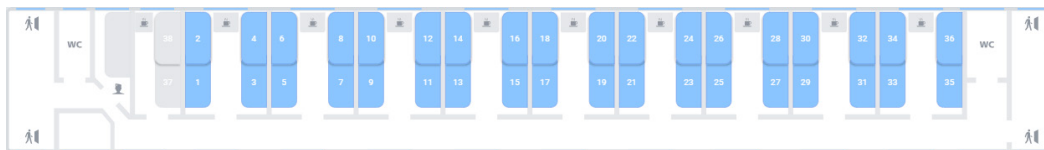


Рис. 1. Схема купейного вагона на сайте ОАО «РЖД». Источник: <https://www.rzd.ru/>.

Стохастические модели позволяют учитывать неопределённость, они более точны, но при этом громоздки и сложны в реализации. Однако данный подход всё чаще используется в связи с развитием вычислительных возможностей [11].

Существует множество классических детерминированных моделей, описывающих динамику распространения эпидемий. Одной из них является SIS модель [9, с. 157–163; 10, с. 6–7], которая основана на делении людей на две группы: $S(t)$ – восприимчивые к заболеванию особи в момент времени t (от англ. *susceptible*); $I(t)$ – инфицированные переносчики болезни в момент времени t (от англ. *infected*). При этом общее количество человек ($N = S(t) + I(t)$) зафиксировано. Данная модель наиболее точно подходит для анализа распространения инфекции в вагоне поезда, так как человек в среднем проводит около суток в таком виде транспорта. Этого времени недостаточно, чтобы полностью выздороветь, однако его хватит на то, чтобы заразиться. Предполагается, что скорость заражения β пропорциональна размеру групп S и I , тогда как скорость выздоровления γ – только размеру группы I . Тогда процесс перехода из одной группы в другую описывается с помощью системы дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = \gamma I(t) - \beta S(t)I(t); \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t). \end{cases} \quad (1)$$

Чтобы учесть связь между людьми, детерминированная SIS модель в данной работе модифицирована и сведена к стохастической. В качестве системы выбирается вагон поезда. Состоянием в текущий момент времени считается количество человек, которые могут быть либо в группе S , либо I согласно заранее купленным местам. Предполагается, что скорость заражения восприимчивой особи S зависит от коэффициента заражения τ и количества зара-

жённых соседей k . Оказавшись в замкнутом пространстве с большим процентом больных людей, можно вероятнее заразиться, чем, если бы это был всего один инфицированный. Скорость выздоровления человека из группы I зависит только от коэффициента выздоровления γ . Если инфицированная особь заражает восприимчивую, то не имеет значения, каким образом её заразили до этого. Состояние системы в будущем зависит только от её текущего состояния. Таким образом, задача сводится к марковскому случайному процессу с непрерывным временем и конечным числом состояний. Допущением данной модели является то, что не учитываются переходы между вагонами, поэтому система замкнута, и количество человек равно $N = S + I$. Поэтому если система в момент времени t находилась в состоянии с количеством человек (S, I) , то возможны следующие переходы (2–3) [10, с. 8–11]:

$$(S, I) \cdot \tau \cdot k \cdot (S-1, I+1), \quad (2)$$

$$(S, I) \cdot \gamma \cdot (S+1, I-1). \quad (3)$$

В данной работе рассматриваются поезда дальнего следования, поэтому предполагается, что в большинстве случаев будут выбираться купейные вагоны для более комфортной поездки.

Рассмотрим типичный купейный вагон. Схема взята в разделе выбора билетов с сайта ОАО «РЖД» [12]. Билеты продаются на места с 1 по 36. На места 37 и 38 билетов в продаже нет. Это места проводника.

Таким образом, каждый вагон состоит из элементов: девять купе, место проводника, два туалета и два тамбура. Модель строится из следующих предположений и допущений. Если заражённый пассажир находится в купе, то с высокой вероятностью он заразит всех своих соседей. Поэтому считается, что купе либо в группе S , либо в группе I . Необходимо выделить общую зону, по которой передвигается проводник, контактирующий со всеми пассажирами, и сами пассажиры, которые

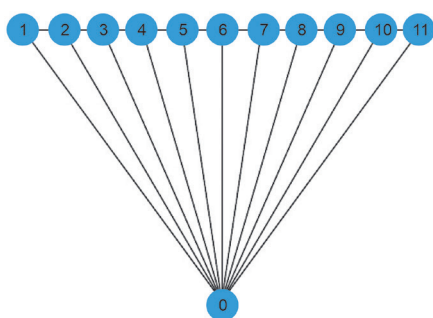


Рис. 2. Вид сети, где 0 – общая зона, 1, 11 – тамбуры, 2–10 – купе. (Составлено авторами).

идут в тамбур или туалет. Пассажиры для своих целей выходят в тамбур и могут там сталкиваться. Следовательно, тамбуры можно выделить в качестве отдельных зон.

Таким образом, вагон поезда можно представить в виде сети (рис. 2), где узлами являются общая зона (0), тамбуры (1, 11) и купе (2–10), а рёбра установлены между каждым купе и общей зоной, между соседними купе, между крайними купе и тамбурами, а также между тамбурами и общей зоной.

Каждый из N узлов может иметь один из двух статусов (S или I). То есть, элемент сети либо заражён, либо нет. Таким образом, получается 2^N возможных состояний. Состояние узла меняется со временем. Как отмечалось ранее, задача сводится к марковскому случайному процессу с непрерывным временем и конечным числом состояний. Таким образом, в любой момент предполагается, что единственными факторами, которые могут повлиять на вероятность изменения статуса узла, являются его текущее состояние и статусы его ближайших соседей. Поток событий переводит систему из одного состояния в другое. Время между событиями распределено экспоненциально [13, с. 112–132]. Скорость заражения восприимчивого узла (интенсивность перехода) зависит только от того, сколько заражено соседей. Заражённая вершина восстанавливается со скоростью, которая не зависит от статуса любого соседа.

Пусть система находится в состоянии $S_1 = ABCDEFGHIJKL$ (рис. 3), где вершины $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L$ могут принимать один из двух статусов (S или I).

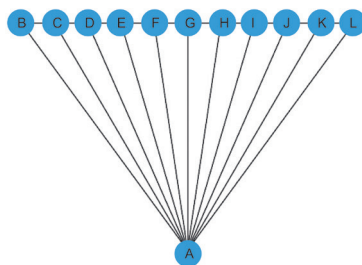


Рис. 3. Система в состоянии $S_1 = ABCDEFGHIJKL$. (Составлено авторами).

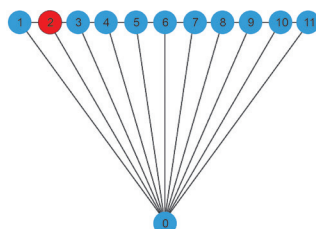


Рис. 4. Состояние $S_1 = SSISSSSSSSSS$, где синим цветом отмечены вершины в группе S , а красным (вершина 2) – в группе I . (Составлено авторами).

Например, известно, что в первом (рис. 2, вершина 2) купе находятся заражённые пассажиры, а во всех остальных частях вагона заражённых нет, следовательно, система находится в состоянии $S_1 = SSISSSSSSSSS$.

Рассмотрим переход из состояния $S_1 = SSISSSSSSSSS$ в состояние $S_4 = SSIISSSSSSS$. Заметим, что за один шаг можно изменить статус только одной вершины. То есть чтобы перейти из состояния S_1 в состояние S_4 , сначала нужно попасть в состояние $S_2 = SSIISSSSSSSSS$, либо в состояние $S_3 = SSISISSSSSSS$. Обратим внимание на переход из S_1 в S_3 . Статус меняет третье купе (рис. 2, вершина 4) с S на I . Согласно сети, представленной на рис. 2, третье купе имеет связь со вторым и четвёртым купе, а также с общей зоной. Поскольку заражено первое купе, то интенсивность перехода из S_1 в S_3 равна согласно (2): $0 \cdot \tau = 0$, то есть, несмотря на то, что заражено первое купе, оно не оказывает прямого влияния на третье купе. При этом интенсивность перехода из S_3 в S_4 равна $2 \cdot \tau$, так как у второго купе два заражённых соседа. Переход из состояния S_1 в состояние S_4 представлен на рис. 5.

При этом из состояния S_2 в состояние S_1 можно перейти согласно (3) с интенсивностью γ .

Таким образом, составляется размеченный граф состояний, где вершины – это



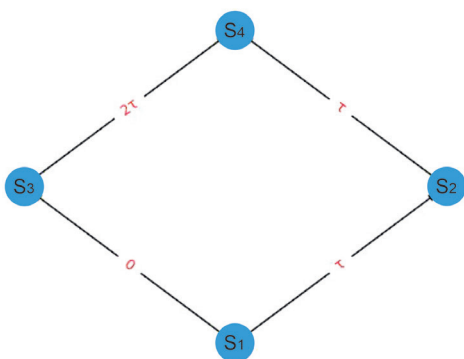


Рис. 5. Переход из состояния $S_1 = SSISSSSSSS$ в состояние $S_4 = SSIISSSSSS$, где $S_2 = SSIISSSSSS$ и $S_3 = SSISISSSSS$. (Составлено авторами).

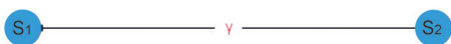


Рис. 6. Переход из состояния $S_2 = SSIISSSSSS$ в состояние $S_1 = SSISSSSSSS$ с интенсивностью γ . (Составлено авторами).

возможные состояния всей системы, а рёбра — интенсивности перехода. По размеченному графу состояний строится непосредственно математическая модель.

Каждая из N вершин может иметь два возможных статуса. Система имеет 2^N состояний. Пусть X_i — вероятность того, что в момент времени t система находится в состоянии S_i . Для любого момента времени сумма всех вероятностей равна $\sum_{i=0}^n X_i = 1$.

По графу состояний выписываются уравнения Колмогорова. В левой части ставятся производные вероятности каждого S_i состояния — $\dot{X}_i$. В правой части — сумма произведений интенсивностей переходов на вероятности состояний, в которые можно попасть из текущего состояния, минус суммарная интенсивность всех потоков, выводящих систему из данного состояния, умноженная на вероятность данного S_i состояния [13, с. 112–132].

Решением системы уравнений будут вероятности X_i нахождения в каждом состоянии S_i в каждый момент времени t . По полученным вероятностям вычисляется среднее число инфицированных элементов I , равное сумме произведений числа больных k на полученные вероятности X_i с чис-

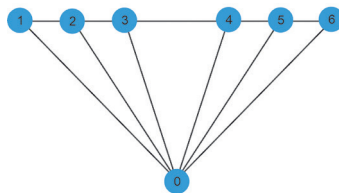


Рис. 7. Вид сети при $N = 7$, где 0 — общая зона, а 1–6 — купе. (Составлено авторами).

лом больных k . Так как система замкнута, то число восприимчивых элементов $S = N - I$.

В случае $N = 12$ число уравнений равно $2^{12} = 4096$. Рассмотрим случай с той же сетью для $N = 7$ и $2^7 = 128$ уравнений, то есть случай с шестью купе и одной общей зоной, чтобы произвести анализ полученных результатов.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для данной постановки задачи на языке программирования Python были проведены расчёты для системы из 128 уравнений Колмогорова. Входные данные — начальные состояния системы, коэффициенты τ и γ . Предполагая в момент времени $t_0 = 0$ начальное состояние S_1 , вероятность X_i принимается равной единице, все остальные — нулю. Выходные данные — количество заражённых I и восприимчивых S .

Если инфицирована вершина 0 (рис. 7), а все остальные имеют статус S , то начальное состояние системы $S_1 = ISSSSSS$. Примем скорость выздоровления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 1$.

Динамика развития эпидемии (рис. 8) согласуется с классической SIS моделью [10, с. 6–7]. Результаты интерпретируются следующим образом. При наличии одного заражённого I , скорости выздоровления $\gamma = 0,0001$ и коэффициенте заражения $\tau = 1$ эпидемия будет развиваться таким образом, что спустя время потенциально заразится вся сеть. В примерах, представленных далее, сравнивается время, за которое вероятно может заразиться весь вагон.

Стохастическая модель на основе уравнений Колмогорова проста в реализации и легко интерпретируема, однако при расширении сети с рассмотренного случая $N = 7$ до $N = 12$, приходится учитывать большее количество взаимодействующих факторов. Рассмотренная модель может быть использована для проверки результатов алгоритма

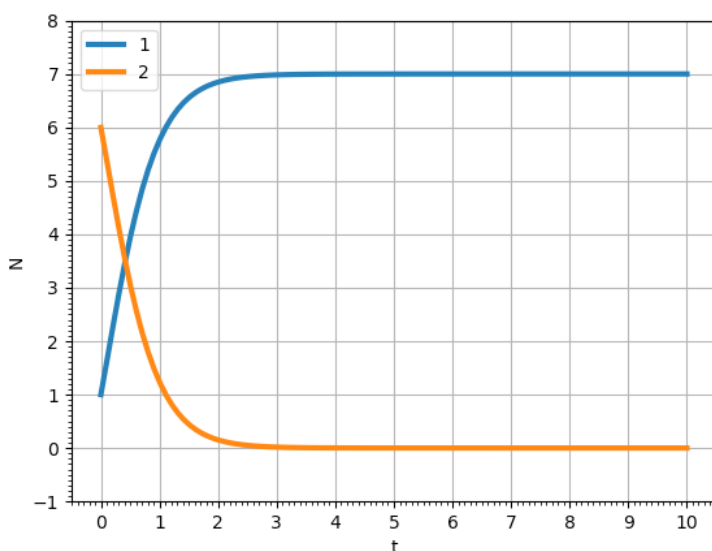


Рис. 8. Динамика развития эпидемии (расчёт для $N = 7$), начальное состояние $S_i = ISSSSSS$, скорость выздоровления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 1$, по оси ординат – количество человек (N), по оси абсцисс – время (t), 1 – количество заражённых, 2 – количество подверженных заболеванию S . (Составлено авторами).

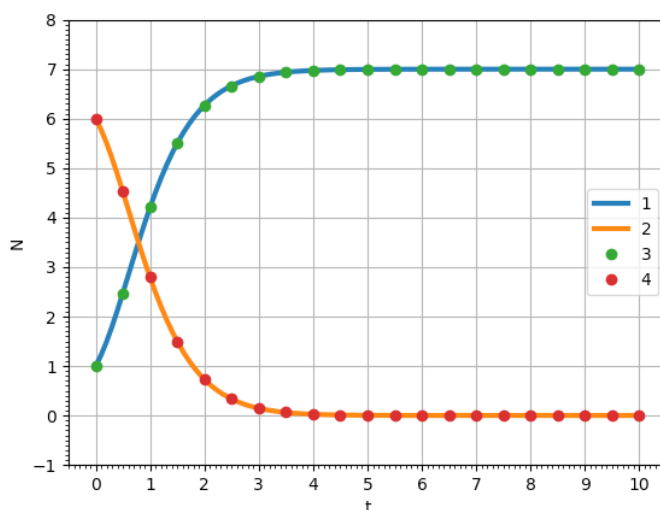


Рис. 9. Сравнение результатов алгоритма Гиллеспи и модели на основе уравнений Колмогорова при $N = 7$, вершина в статусе $I = 1$ и $S_i = SISSSSS$, скорость восстановления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 1$, по оси ординат – количество человек (N), по оси абсцисс – время (t), 1 – количество заражённых I (уравнения Колмогорова), 2 – количество подверженных заболеванию S (уравнения Колмогорова), 3 – количество заражённых I (алгоритм Гиллеспи), 4 – количество подверженных заболеванию S (алгоритм Гиллеспи). (Составлено авторами).

Гиллеспи, который не имеет аналитического решения. В работе используется реализация данного метода для случая с сетями, разработанного группой авторов на языке программирования Python [10, с. 381–384; 14].

Суть метода заключается в следующем: вычисляется время до следующего события (заражение или восстановление одной из вершин) исходя из совокупной скорости

всех возможных событий. Время между событиями распределено экспоненциально, параметром является сумма всех скоростей восстановления и заражения. Затем отдельно вычисляется, какое именно произойдёт событие. Шаги повторяются до тех пор, пока есть заражённые и не достигнуто максимальное расчётное время. Для достижения точности результатов расчёты выполняются на итерационной



основе. Входные данные — элементы в группе I, коэффициенты τ и γ . Выходные данные — количество заражённых I и восприимчивых S.

Алгоритм Гиллеспі позволяет дискретно и стохастически моделировать систему с небольшим количеством элементов, потому что каждое событие явно моделируется. Данный метод широко используется в моделировании химических реакций [15] и распространении заболеваний, таких как ВИЧ [16].

Так как метод Гиллеспі учитывает все возможные изменения событий, его применение обосновано для систем ограниченных размерностей в силу больших вычислительных затрат. Для решения рассматриваемой задачи распространения эпидемии в вагоне поезда использование алгоритма, таким образом, является оправданным.

Сравним описанную ранее модель на основе уравнений Колмогорова с алгоритмом Гиллеспі при $N = 7$. Пусть изначально заражена первая вершина (рис. 7, вершина 1): вершина в статусе $I = 1$, $S_i = S$ (SSSSSS), скорость выздоровления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 1$.

Решение на основе алгоритма Гиллеспі показывает хорошее совпадение с решением модели на основе уравнений Колмогорова (рис. 9), поэтому данный метод может быть применим для расширенной сети при $N = 12$ (рис. 2), что и является моделью поезда в данной статье.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 в качестве зон выделены купе (2–10), общая зона (0) и 2 тамбура (1, 11). Так как источником распространения инфекции является человек, изначально заражёнными могут быть общая зона (учитывается проводник) и купе. Рассмотрим и проанализируем случаи распространения инфекции.

Далее представлены случаи с отсутствием инфицированных пассажиров и одним заражённым в начальный момент времени (рис. 10). Принимаются скорость выздоровления $\gamma = 0,0001$ и коэффициент заражения $\tau = 0,5$.

Таким образом, эпидемия не распространяется при отсутствии инфицированных пассажиров (рис. 10а). Наибольший риск

развития эпидемии происходит через изначально заражённую общую зону (рис. 10б). Это связано с тем, что проводник, как правило, контактирует со всеми пассажирами. Кроме того, пассажиры передвигаются через общую зону. В рамках данной модели в случае заражения любого из купе развитие эпидемии будет протекать одинаково (рис. 10в). Это связано с тем, что предполагается, что люди большую часть времени проводят в своих купе, а в общественных местах (туалетах, тамбурах) бывают в среднем одинаковое время. Однако в последующих работах эти данные будут уточнены.

Рассмотрим четыре случая, когда изначально имеются две заражённые зоны, чтобы проанализировать влияние начальных условий на развитие эпидемии. Так как в данной постановке расчёты показывают, что каждое купе в равной степени оказывает влияние на систему в целом, они выбираются произвольным образом. Пусть в первом случае была заражена общая зона и первое купе (рис. 2, вершины 0 и 2). Во втором случае рассмотрим два любых соседних купе, например, второе и третье (рис. 2, вершины 3 и 4). В третьем случае рассмотрим два заражённых купе, которые находятся в разных концах: первое и девятое (рис. 2, вершины 2 и 10). В четвёртом, пусть заражённые купе находятся на близком расстоянии, но не рядом: пятое и седьмое (рис. 2, вершины 6 и 8). Результаты представлены на рис. 11, скорость выздоровления $\gamma = 0,0001$ и коэффициент заражения $\tau = 0,3$.

Анализ показывает, что наиболее быстро эпидемия развивается, когда заражена общая зона и любое из всех купе (рис. 11а). В случае двух изначально заражённых купе имеет значение их расположение. Поэтому при двух заразных купе наиболее опасен для распространения тот случай, когда они находятся в двух разных концах. Это объясняется тем, что туалеты и тамбуры находятся на двух разных концах, и соответственно риск заразиться при контакте с крайними купе выше. Наиболее безопасна ситуация, когда два заражённых купе находятся рядом (рис. 11б). Последний случай, когда два купе находятся на маленьком расстоянии (рис. 11г), влечёт меньше последствий, чем, когда заражённые купе находятся в разных концах

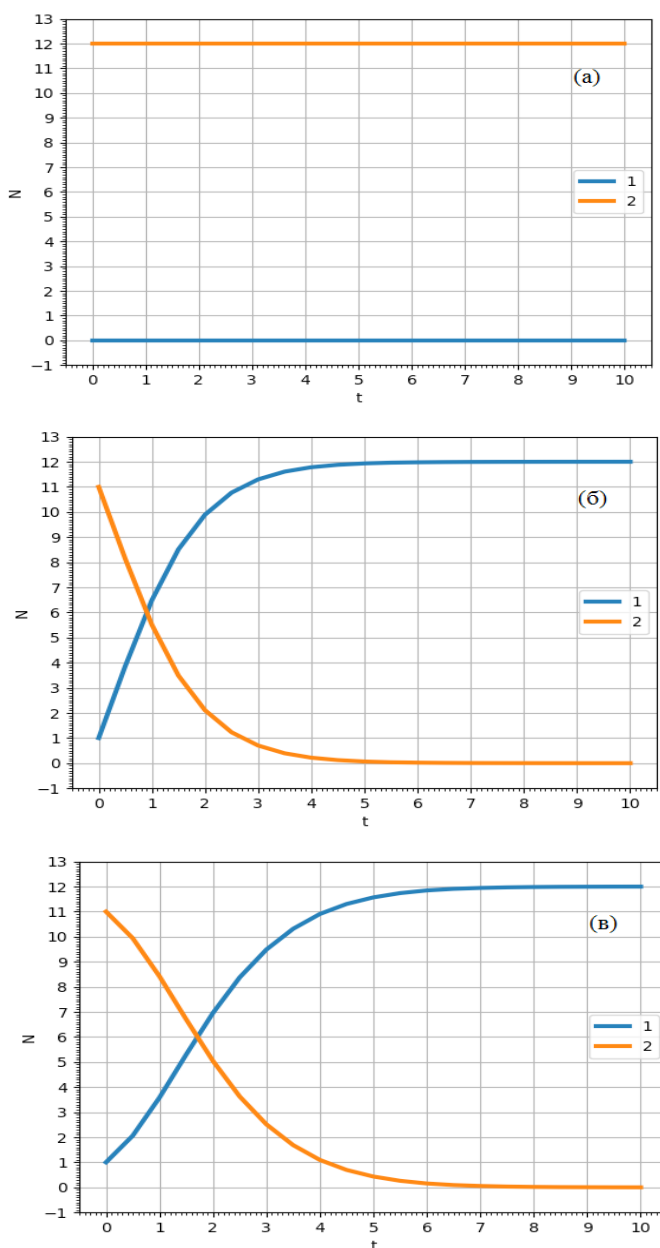


Рис. 10. Динамика развития эпидемии при отсутствии изначально инфицированных (а), при заражённой общей зоне (б), при одном заражённом купе (в), скорость выздоровления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 0,5$, по оси ординат – количество человек (N), по оси абсцисс – время (t), 1 – количество заражённых, 2 – количество подверженных заболеванию S . (Составлено авторами).

(рис. 11в). Однако данное расположение опаснее, чем, когда два заражённых купе находятся вблизи (рис. 11б).

Рассмотренные случаи являются репрезентативными и представляют обоснованную выборку случаев заражения. Данный подход может быть расширен как для случая большего числа заражённых, так и для большего числа зон общего пользования.

По результатам расчётов можно сделать вывод, что на развитие эпидемии влияет не только количество заражённых I , коэффициент заражения τ и скорость выздоровления γ , но и расположение изначально заражённых пассажиров. Разработанная модель позволяет учитывать расположение инфицированных пассажиров, что для поезда является ключевым фактором.



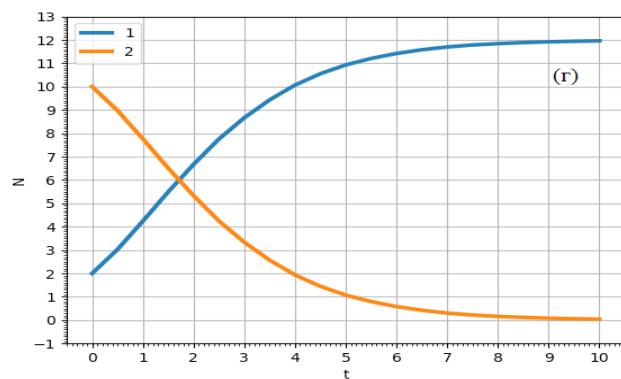
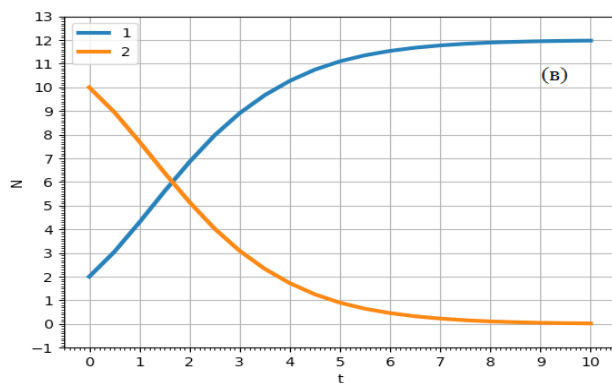
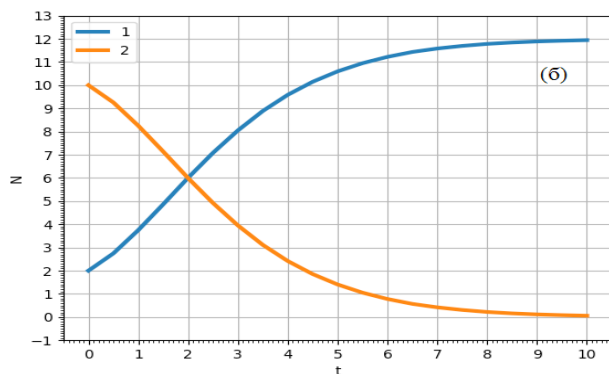
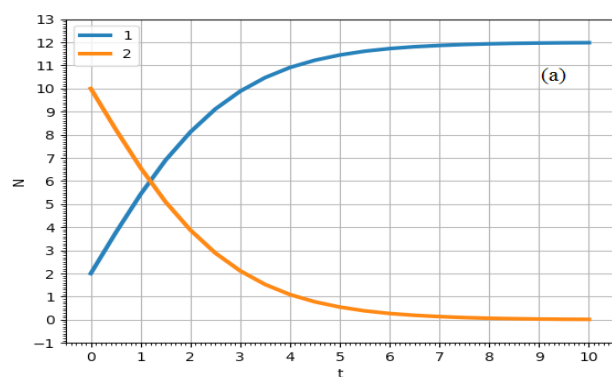


Рис. 11. Динамика развития эпидемии при заражённой общей зоной и первым купе (а), заражённых вторым и третьем купе (б), заражённых первым и девятым купе (в), заражённых пятым и седьмым купе (г), скорость выздоровления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 0,3$, 1 – количество заражённых I, 2 – количество подверженных заболеванию S. (Составлено авторами).

Данная модель может быть расширена до рассмотрения поезда с учётом вагона-ресторана.

Численные расчёты показали (рис. 10б и рис. 11а), что наибольший риск заразиться имеет проводник, поэтому состоянию его здоровья нужно уделить внимание в первую очередь. Также особое внимание следует уделить местам общего пользования, проводить регулярную санитарную обработку.

Рассмотрим возможные меры, которые можно предпринять в случае обнаружения заразившихся пассажиров в вагоне в рамках данной модели. Пусть заражено одно из купе. П посадка полная, и нет возможности пересадить пассажиров на свободные места. В качестве одной из мер предотвращения распространения эпидемии в этом случае предлагается изолировать инфицированное купе от других пассажиров и оценить эффективность данного предположения. Инфицированные пассажиры имеют возможность выходить в общую зону, контактировать с проводником, соблюдая меры безопасности, и посещать туалеты в отличие от здоровых пассажиров время.

Пусть заражено первое купе (рис. 2, вершина 2), тогда с учётом наших предположений модель примет следующий вид (рис. 12).

Сравним динамику распространения эпидемии описанной ранее модели (рис. 2) с её модификацией (рис. 12) при скорости выздоровления $\gamma = 0,0001$ и коэффициенте заражения $\tau = 0,3$.

Изоляция заражённого купе (рис. 13) приведёт к замедлению распространения инфекции почти на 20 %. Таким образом, важный вывод состоит в том, что при обнаружении инфицированных в купе, необходимо его изолировать.

Рассмотрим далее зависимость расположения заражённого купе и количество изолированных купе от времени распространения инфекции. Предположим, что заражено первое купе (рис. 2, вершина 2), и для исключения опасных ситуаций вместе с первым купе изолируют и второе (рис. 2, вершина 3). Также по аналогии предположим, что заражено пятое купе (рис. 2, вершина 6). Для предотвращения распространения эпидемии в качестве мер профилактики изолируют заражённое пя-

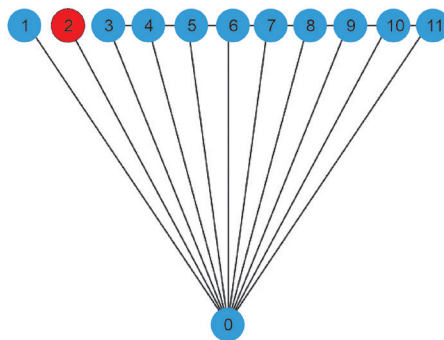


Рис. 12. Вид сети, где 0 – общая зона, 1, 11 – тамбуры, 2–10 – купе. Купе под номером 1 (вершина 2) инфицировано и изолировано от других. (Составлено авторами).

тое купе, или четвёртое (рис. 2 вершина 5) и пятое, или шестое (рис. 2, вершина 7) и пятое, или все три купе сразу. При этом второе купе, как четвёртое и шестое либо здоровы, либо предполагается, что в них отсутствуют пассажиры. Сравним полученные результаты, скорость восстановления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 0,3$.

В рамках рассматриваемой модели изоляция более одного купе не ведёт к существенным улучшениям. Таким образом, главное – изолировать именно инфицированных пассажиров. В случае возникновения подобных ситуаций это существенно снизит нагрузку на проводников, которые находятся в зоне риска, прежде всего, доставит меньший дискомфорт другим пассажирам и приведёт к лучшему контролю ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена модель распространения эпидемии в железнодорожном вагоне.

Детерминированная SIS модель в данной работе модифицирована и сведена к стохастической на основе марковских случайных процессов с непрерывным временем и конечным числом состояний. Для описания распространения эпидемии внутри вагона железнодорожного состава был выбран граф.

Для упрощённого случая с шестью купе и одной общей зоной ($N = 7$) была составлена и решена система с $2^7 = 128$ уравнений на языке программирования Python.

Модель на основе уравнений Колмогорова была использована для проверки ре-



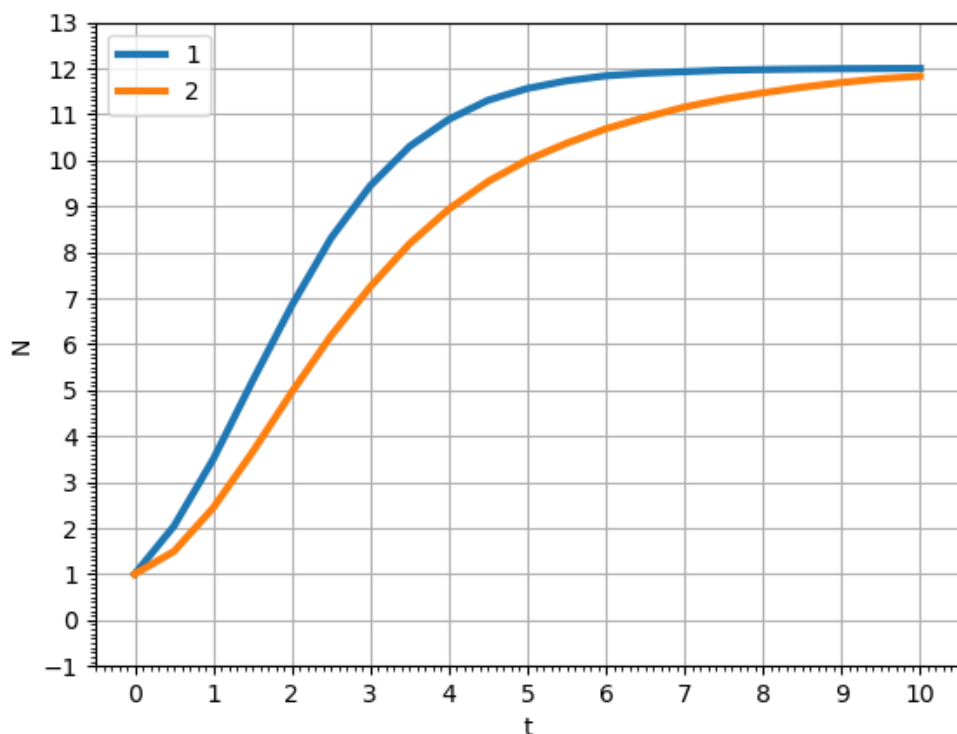


Рис. 13. Сравнение результатов распространения эпидемии в вагоне, работающем в обычном режиме и при изолированном заражённом купе, скорость восстановления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 0,3$, по оси ординат – количество человек (N), по оси абсцисс – время (t), 1 – количество заражённых I при обычном функционировании вагона, 2 – количество заражённых I при изоляции инфицированного купе. (Составлено авторами).

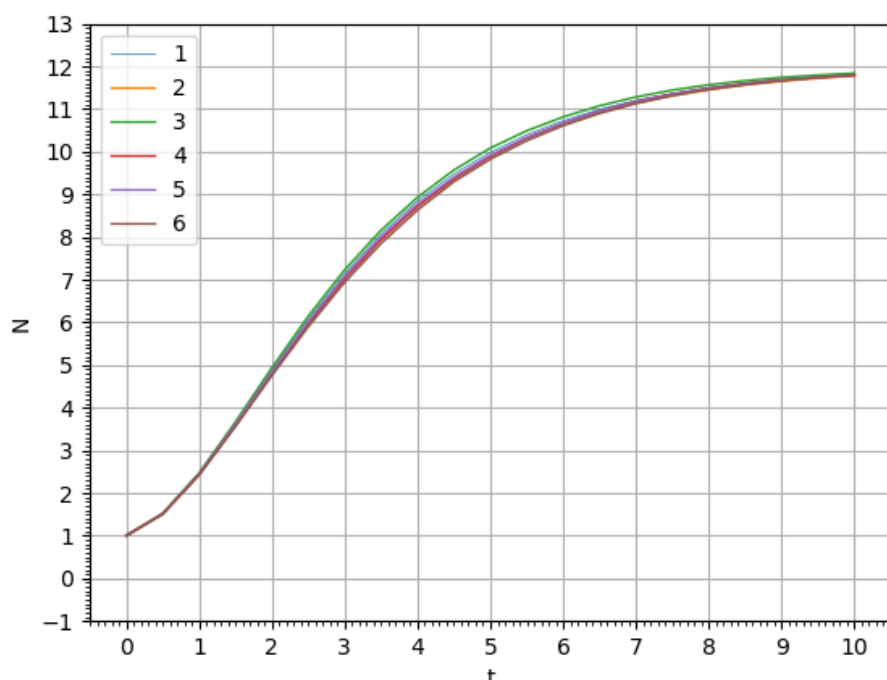


Рис. 14. Сравнение результатов распространения эпидемии в вагоне при разной степени изоляции, скорость восстановления $\gamma = 0,0001$, коэффициент заражения $\tau = 0,3$, по оси ординат – количество человек (N), по оси абсцисс – время (t), 1 – количество заражённых I при изоляции заражённого первого купе, 2 – количество заражённых I при изоляции заражённого первого и второго купе, 3 – количество заражённых I при изоляции заражённого пятого купе, 4 – количество заражённых I при изоляции заражённого пятого купе и четвёртого купе, 5 – количество заражённых I при изоляции заражённого пятого купе и шестого купе, 6 – количество заражённых I при изоляции заражённого пятого купе и соседних купе. (Составлено авторами).

зультатов алгоритма Гиллеспи, реализованного также на языке Python. Согласованность результатов позволила расширить сеть до случая с $N = 12$, что соответствует практически эксплуатируемым вагонам в составах, эксплуатируемых на сети ОАО «РЖД».

Полученные результаты позволили проанализировать распространение эпидемии при различных начальных условиях и заключить, что на скорость её развития влияет расположение изначально заражённых пассажиров. Показано, что наибольший риск при распространении эпидемии представляют проводники и нерегламентированное использование общественных мест. Предложены меры в случае нахождения одного инфицированного купе в виде изоляции от других пассажиров. Данная мера показала улучшение динамики распространения инфекции на 20 %. Численные расчёты свидетельствуют о том, что нет необходимости изолировать более чем одно купе при таком раскладе.

Данные результаты можно использовать при реальных перевозках, и отслеживать пассажиров, которые могут быть источниками распространения инфекций с помощью обработки данных с камер видеонаблюдения. Эти данные необходимы для модификации метода, использованного в работе, чтобы определить влияние каждого из купе. Например, в работе [17] авторы проводили исследования влияния общественного городского транспорта на распространение инфекции COVID-19 в Сингапуре по транспортным картам. Данные с транспортных карт использовались для составления математической модели и определения пассажиров, которых необходимо изолировать на ранней стадии для предотвращения распространения эпидемии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Choisy, M., Guégan, J.-F., Rohanil, P. Mathematical Modeling of Infectious Diseases Dynamics. Encyclopedia of Infectious Diseases: Modern Methodologies by Tibayrenc. M. John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 379–403.
2. Barrat, A., Barthélemy, M., Colizza, V., Vespignani, V. The role of the airline transportation network in the prediction and predictability of global epidemics. PNAS, 14 February, 2006, Vol. 103 (7), pp. 2015–2020. DOI: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.051052103.

3. Balcan, D., Colizza, V., Gonçalves, B., Hu, H., Ramasco, J. J., Vespignani, A. Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases. PNAS, 22 December, 2009, Vol. 106 (51), pp. 21484–21489. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0906910106>.

4. Mari, L., Bertuzzo, E., Righetto L. [et al]. Modelling cholera epidemics: the role of waterways, human mobility and sanitation. J. R. Soc. Interface, 2012, Vol. 9 (67), pp. 376–388. DOI: 10.1098/rsif.2011.0304.

5. Gatto, M., Mari, L., Bertuzzo, E., Casagrandi, R., Righetto, L., Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, A. Generalized reproduction numbers and the prediction of patterns in waterborne disease. PNAS, 27 November, 2012, Vol. 109 (48), pp. 19703–19708. DOI: 1073/pnas.1217567109.

6. Wu, J. T., Leung, K., Leung, G. M. Now casting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-ncov outbreak originating in Wuhan, China: A modelling study. The Lancet, 29 February, 2020, Vol. 395 (10225), pp. 689–697. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30260-9.

7. Hagberg, A. A., Schult, D. A., Swart, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy 2008). Eds.: G. El Varoquaux, Travis Vaught, Jarrod Millman, Pasadena, CA, USA, August 2008, pp. 11–15.

8. Gillespie, D. T. A general method for numerically simulating the stochastic time evolution of coupled chemical reactions. Journal of Computational Physics, Vol. 22 (4), December, 1976, pp. 403–434.

9. Братусь А. С., Новожилов А. С., Платонов А. П. Динамические системы и модели биологии. — М.: Физматлит, 2010. — 400 с.

10. Kiss, I., Miller, J., Simon, P. Mathematics of Epidemics on Networks: from Exact to Approximate Models. Springer Math, 2007, 413 p.

11. Deng, Xiaomin; Wang, Xiaomeng. The Application of Gillespie Algorithm in Spreading. 3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019), April 2019, pp. 688–695. DOI: 10.2991/icmeit-19.2019.110.

12. Официальный сайт ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]: <https://www.rzd.ru/>. Доступ 15.06.2020.

13. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология: Учеб. пособие. — 5-е изд., стер. — М.: Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1980. — 208 с.

14. EoN (Epidemics on Networks): a fast, flexible Python package for simulation, analytic approximation, and analysis of epidemics on networks. [Электронный ресурс]: <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.01731>. Доступ 19.06.2020.

15. Gillespie, D. T. Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions. Journal of Computational Physics, 01 December, 1977, Vol. 81 (25), pp. 2340–2361. DOI: 10.1021/j100540a008.

16. Kamina, K. M., Mwalili, S., Wanjoya, A. The Modeling of a Stochastic SIR Model for HIV/AIDS Epidemic Using Gillespie's Algorithm. International Journal of Data Science and Analysis, 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 117–122. DOI: 10.11648/j.ijdsa.20190506.12.

17. Mo, Baichuan; Feng, Kairui; Shen, Yu; Tam, Clarence; Li, Daqing; Yin, Yafeng; Zhao, Jinhua. Modeling Epidemic Spreading through Public Transit using Time-Varying Encounter Network. [Электронный ресурс]: <https://arxiv.org/pdf/2004.04602.pdf>. Доступ 19.06.2020.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-04-60157 «Интегративный подход к математическому моделированию механизмов патогенеза и развития пандемии инфекции коронавируса».





Mathematical Model of Spread of the Epidemic Inside a Railway Compartment Coach



Alexander S. BRATUS



Alexandra S. OCHERETYANAYA

Bratus, Alexander S., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Ocheretyanaya, Alexandra S., Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

ABSTRACT

This article discusses an aspect of the most pressing problem of 2020, that of the spread of infectious diseases. The work considers a railway compartment coach as a particular object of spread of infectious diseases. The objective is to describe spread of the epidemic in a railway coach using a stochastic model. The model of the coach is represented as a network. The processes occurring on the network are considered to

be Markov processes. In this paper, two methods of stochastic modelling are applied: modelling based on Kolmogorov equations and Gillespie algorithm. Kolmogorov equations are used to test applicability of Gillespie algorithm, which, in turn, is used to simulate the model of the coach. The obtained data were analysed, and based on that analysis it is possible to make a conclusion about applicability of the model to the case of a typical passenger train.

Keywords: *transport, railways, SIS model, stochastic modelling, railway coach, spread of infections, Markov random process, Kolmogorov equations, Gillespie algorithm.*

*Information about the authors:

Bratus, Alexander S. – D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor at the Department of Mathematical Modelling and System Analysis of the Institute of Management, Control and Digital Technologies of Russian University of Transport, Moscow, Russia, alexander.bratus@yandex.ru.

Ocheretyanaya, Alexandra S. – Ph.D. student at the Department of Mathematical Modelling and System Analysis of the Institute of Management, Control and Digital Technologies of Russian University of Transport, Moscow, Russia, sandra.och@yandex.ru.

Article received 16.06.2020, accepted 22.10.2020.

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

In late 2019 and early 2020, the world was shocked by massive infections caused by the new coronavirus infection COVID-19. In this regard, mathematical models, and modelling of spread of infections can be used to build stable systems for forecasting and counteracting such natural disasters.

The first mention of an epidemiological model was formulated by Daniel Bernoulli in 1760 with the aim of assessing the effect of smallpox (variola) vaccination on a person's life expectancy. However, the lack of global work in epidemiological modelling had persisted until the beginning of 20th century. In 1927, William Ogilvy Kermack and Anderson Gray McKendrick developed the famous limit theorem, which predicts, depending on the potential of transmission of infection, a critical proportion of vulnerable populations that must be exceeded in the event of an epidemic¹. This was followed by the work of Maurice S. Bartlett, who explored models and data to identify factors that determine disease resistance in large populations. The first landmark book on the mathematical modelling of epidemiological systems was published by Norman T. J. Bailey, and that resulted particularly in recognition of importance of modelling in public health systems. Given diversity of infectious diseases studied since the mid-1950s, an impressive variety of epidemiological models have been developed [1].

Transport is one of the main channels for spread of infections that cause disease. Studies have shown that air travelling [2; 3] and water transport [4; 5] play a huge role in global epidemics. In a recent work on spread of COVID-19, it was found that the first case, recorded in Wuhan, China, in mid-November 2019, quickly spread to the rest of China through «air travel and high-speed railway networks» [6].

The article deals with a typical railway coach as a subject of research. In our case that was a passenger coach used within the network of the JSC Russian Railways.

The *objective* of this work is to build a stochastic model to describe spread of the epidemic in a typical compartment coach depending on the source of infection.

¹ See, e.g., Breda, D., Diekmann, O., de Graff, W. F., Pugliese, A., Vermiglio, R. On the formulation of epidemic models (an appraisal of Kermack and McKendrick). *Journal of Biological Dynamics*, 2012, Vol. 6, Iss. 2, pp. 103–117. DOI: 10.1080/17513758.2012.716454.

To achieve this objective, a model of a railway coach was developed based on a network approach, where the nodes of the network are the elements of the compartment coach, between which ribs are installed according to the coach structure. The network is implemented in Python using *NetworkX* package [7].

Events occurring on the network are based on Markov random processes. The dynamics of spread of infections in a coach is realized using the method of stochastic modelling, namely Gillespie simulation algorithm [8]. To test applicability of this algorithm, a model with explicit constraints was developed based on a special type of differential equations namely on Kolmogorov equations.

As a result of numerical calculations, dependencies were obtained showing that spread of the epidemic in a train car is influenced not only by the number of initially infected persons and the infection rate, but also by the location of infected passengers.

In addition, measures were proposed that could slow down the dynamics of spread of infection along the coach through isolation of the infected compartment.

Statement of the problem

Now there are two main approaches to modelling epidemics: the deterministic approach [9, pp. 157–182] and the stochastic one [10, pp. 8–11]. Deterministic models do not consider movement along the coach, which has a primary effect on spread of infection. However, at the same time, the results of calculations within the framework of these models make it possible to identify the main regularities: whether an epidemic will occur, how long it will last, and how large it will be.

Stochastic models allow you to consider uncertainty, they are more accurate, but at the same time cumbersome and difficult to implement. However, this approach is increasingly used with the development of computational capabilities [11].

There are many classical deterministic models that describe the dynamics of spread of epidemics. One of them is SIS model [9, pp. 157–163; 10, pp. 6–7], which is based on division of people into two groups: $S(t)$ – individuals susceptible to the disease at time t ; $I(t)$ – infected disease vectors at time t . Moreover, the total number of people ($N = S(t) + I(t)$) is





Pic. 1. Scheme of a typical corridor compartment coach used on the network of Russian railways.
Source: <https://www.rzd.ru/>.

fixed. This model is most suitable for analysing spread of infection in a train coach because a person spends on average about a day in this type of transport [data for Russian long-distance trains, see below – ed. note]. This time is not enough to fully recover, but it is sufficient to get infected. It is assumed that the infection rate β is proportional to the size of groups S and I , while the recovery rate γ is proportional to group I only. Then the process of transition of individuals from one group to another is described using a system of differential equations (1):

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = \gamma I(t) - \beta S(t)I(t); \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t). \end{cases} \quad (1)$$

To consider the connections between people, the deterministic SIS model in this work is modified and reduced to stochastic one. The train coach is selected as the system. The number of people who can be either in the group S or I according to the previously purchased seats is considered as the state at the current moment of time. It is assumed that the infection rate of a susceptible individual S depends on the infection coefficient τ , and the number of infected neighbours k . Being in a confined space with a large percentage of sick people makes it more likely to become infected

than if there was just a single infected person. The recovery rate for a person from group I depends only on the recovery rate γ . If an infected individual infects a susceptible individual, it does not matter how that person has been infected before. The state of the system in the future depends only on its current state. Thus, the problem is reduced to a Markov random process with continuous time and a finite number of states. The assumption in this model is that the circulation through inter-car walkways (gangways) is not considered, therefore the system is closed, and the number of people is equal to $N = S + I$. Therefore, if the system at time t was in a state with the number of people (S, I), then the following transitions are possible (2–3) [10, pp. 8–11]:

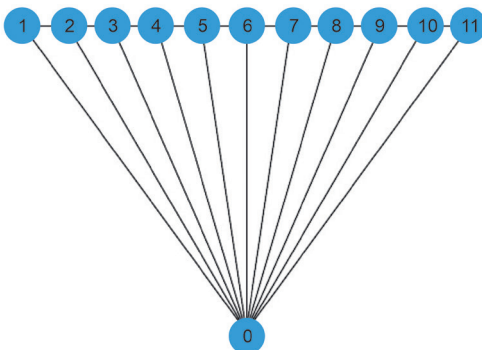
$$(S, I) \rightarrow \tau \cdot k \cdot (S-1, I+1), \quad (2)$$

$$(S, I) \rightarrow \gamma \cdot (S+1, I-1). \quad (3)$$

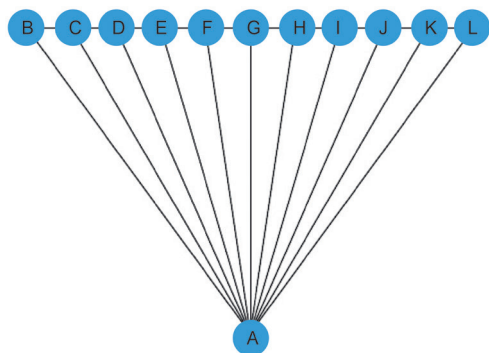
In this paper, long-distance trains are considered, so it is assumed that in most cases, compartment coaches will be selected for a more comfortable trip.

Let us consider a typical corridor coach. The scheme is taken from the ticket booking section of the Russian Railways website [12]. Tickets are sold for seats 1 to 36. There are no tickets on sale for seats 37 and 38. These are the places of the train attendants.

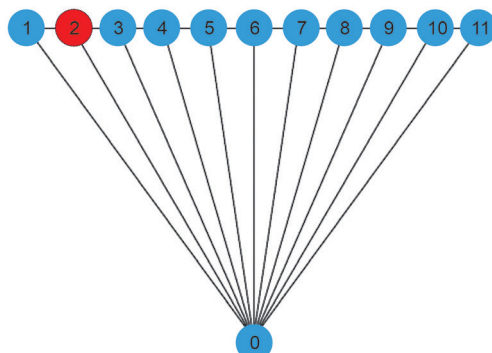
Thus, each coach consists of the elements: nine compartments, a conductor's seat, two toilets and two vestibules. The model is built using the following assumptions. If an infected passenger is in a compartment, then it is highly likely that he will infect all his neighbours. Therefore, it is considered that the compartment is either in group S or in group I . It is necessary to distinguish a common area where the attendant, who is in contact with all the passengers, moves, as well as the passengers themselves who go to the vestibule or toilet. Passengers for their own purposes go to the vestibule and can come across each other there. Therefore, vestibules can be distinguished as separate zones.



Pic. 2. Type of the network, where 0 – common zone, 1, 11 – vestibules, 2–10 – compartments (compiled by the authors).



Pic. 3. The system, in the state $S_1 = ABCDEFGHIJKL$ (compiled by the authors).



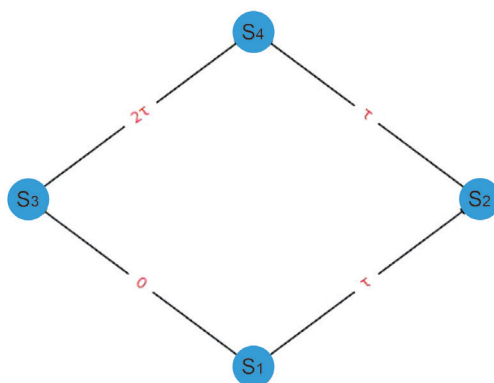
Pic. 4. State $S_1 = SSISSSSSSSSS$, where the vertices in group S are marked in blue (lighter colouring in black-and-white print version), and in group I – in red (compiled by the authors).

Thus, the train car can be represented as a network (Pic. 2), where the nodes are the common zone (0), vestibules (1, 11) and compartments (2–10), and the ribs are installed between each compartment and the common zone, between adjacent compartments, between extreme compartments and vestibules, as well as between vestibules and the common zone.

Each of the N nodes can have one of two statuses (S or I). That is, the network element is either infected or not. Thus, there are 2^N possible states. The state of a node changes over time. As noted earlier, the problem is reduced to a Markov random process with continuous time and a finite number of states. Thus, at any moment, it is assumed that the only factors that can affect the probability of a node's status change are its current state and the statuses of its nearest neighbours. A stream of events transfers the system from one state to another. The time between events is distributed exponentially [13, pp. 112–132]. The infection rate of a susceptible node (transition rate) depends only on how many neighbours are infected. The infected vertex is restored to the initial state at a rate that does not depend on the status of any neighbour.

Let the system be in a state $S_1 = ABCDEFGHIJKL$ (Pic. 3), where vertices $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L$ can take one of two statuses (S or I).

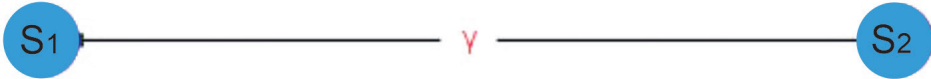
For example, it is known that there are infected passengers in the first (Pic. 2, vortex 2) compartment, but there are no infected passengers in all other parts of the coach, therefore, the system is in the state $S_1 = SSISSSSSSSSS$.



Pic. 5. Transition from state $S_1 = SSISSSSSSSSS$ to state $S_4 = SSIHSSSSSSS$, where $S_2 = SSIHSSSSSSS$ and $S_3 = SSISISSSSSSS$ (compiled by the authors).

Let us consider the transition from state $S_1 = SSISSSSSSSSS$ to state $S_4 = SSIHSSSSSSS$. Note that you can change the status of only one vertex in a single step. That is, to go from S_1 state to S_4 state, you first need to get to $S_2 = SSIHSSSSSSS$ state, or to $S_3 = SSISISSSSSSS$ state. Let us pay attention to the transition from S_1 to S_3 . The status changes the third compartment (Pic. 2, vertex 4) from S to I . According to the network shown in Pic. 2, the third compartment has a connection with the second and fourth compartments, as well as with the common area. Since the first compartment is infected, intensity of the transition from S_1 to S_3 is, according to (2): $0 \cdot \tau = 0$, that is, even though the first compartment is infected, it does not directly affect the third compartment. Moreover, intensity of the transition from S_3 to S_4 is equal to $2 \cdot \tau$, since the second compartment has two





Pic. 6. Transition from state $S_2 = SSIISSSSSSSS$ to state $S_1 = SSIISSSSSSSS$ with intensity γ (compiled by the authors).

infected neighbours. The transition from state S_1 to state S_4 is shown in Pic. 5.

In this case, from state S_2 to state S_1 one can pass according to (3) with the intensity γ .

Thus, a labelled state graph is compiled, where the vertices are the possible states of the entire system, and the edges are the transition intensities. A mathematical model is built directly from the marked state graph.

Each of the N vertices can have two possible statuses. The system has 2^N states. Let X_i be the probability that at time t the system is in state S_i . For any moment in time, the sum of all probabilities is $\sum_{i=0}^n X_i = 1$.

Kolmogorov equations are written based on the graphs of possible state. The derivatives of the probabilities $\dot{X}_i$ of each S_i state are put on the left side. On the right-hand side there is the sum of the products of the transition intensities and the probabilities of states that can be reached from the current state minus the total intensity of all flows that take the system out of this state, multiplied by the probability of this S_i state [13, pp. 112–132].

The solution to the system of equations will be equal to the probabilities X_i of being in each state S_i at each moment of time t . The obtained probabilities are used to calculate the average number of infected elements I equal to the sum of the products of the number of sick persons

k by the obtained probabilities X_i with the number of sick persons k . Since the system is closed, the number of receptive elements is $S = N - I$.

In case of $N = 12$, the number of equations is $2^{12} = 4096$. Let us consider the case with the same network for $N = 7$ and $2^7 = 128$ equations, that is, the case with six compartments and one common zone to analyse the results obtained.

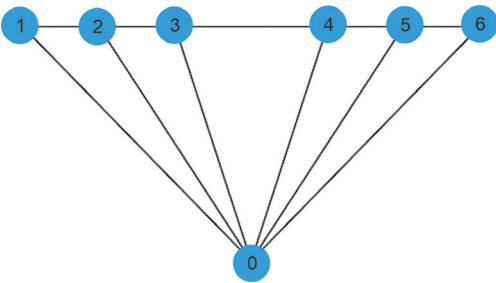
Numerical experiments

For this formulation of the problem calculations were carried out in Python programming language for a system of 128 Kolmogorov equations. Input data are initial states of the system, coefficients τ and γ . Assuming at the moment $t_0 = 0$ the initial state to be S_i , the probability X_i is taken to be equal to one, all the rest probabilities are deemed to be equal to zero. The output is the number of infected I and susceptible S persons.

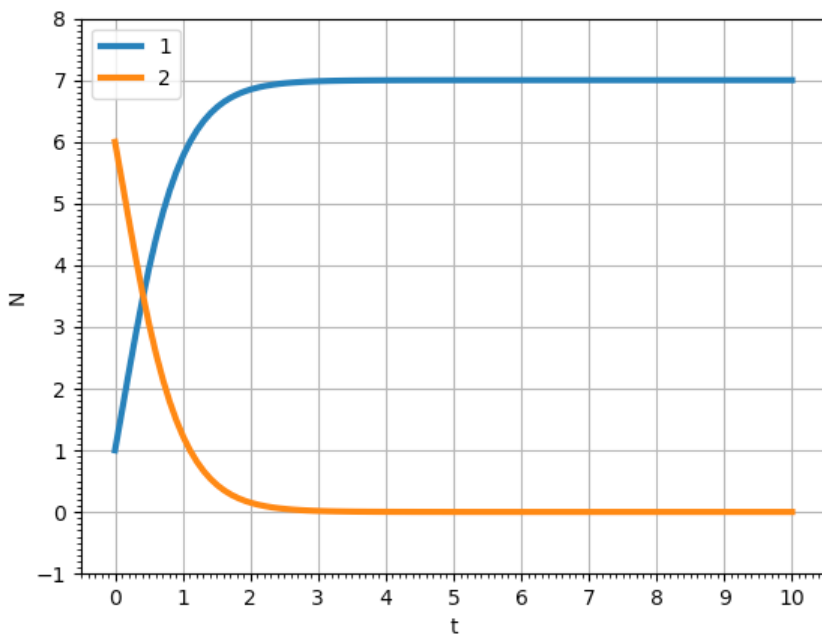
If vertex 0 is infected (Pic. 7), and all others have status S , then the initial state of the system is $S_i = ISSSSSS$. Let us take the recovery rate $\gamma = 0,0001$, the infection coefficient $\tau = 1$.

The dynamics of epidemic spread (Pic. 8) is consistent with the classical SIS model [10, pp. 6–7]. The results are interpreted as follows. If there is one infected person I , the recovery rate $\gamma = 0,0001$, and the infection rate $\tau = 1$, the epidemic will develop in such a way that after a while the entire network will potentially become infected. The examples below compare the time it takes for an entire coach population to become infected.

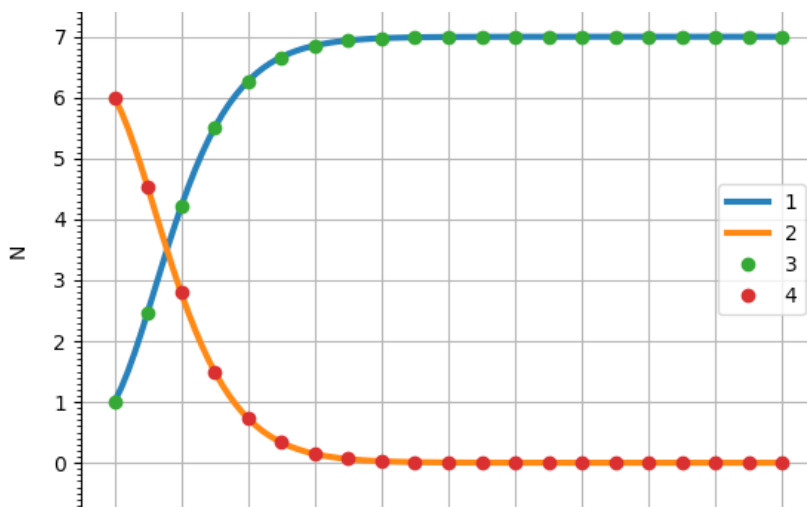
The stochastic model based on Kolmogorov equations is easy to be implemented and easy to be interpreted, however, when expanding the network from the considered case $N = 7$ to $N = 12$, it is necessary to take into account a larger number of interacting factors. The considered model can be used to check the results of Gillespie algorithm, which has no analytical solution. The work uses the implementation of this method for the case



Pic. 7. Network type with $N = 7$, where 0 – common zone, and 1–6 – compartments (compiled by the authors).



Pic. 8. The dynamics of epidemic development (calculation for $N = 7$), initial state $S_i = ISSSSSS$, recovery rate $\gamma = 0,0001$, infection rate $\tau = 1$, ordinate – number of people (N), abscissa – time (t), 1 – number of infected persons I , 2 – number of susceptible persons S (compiled by the authors).



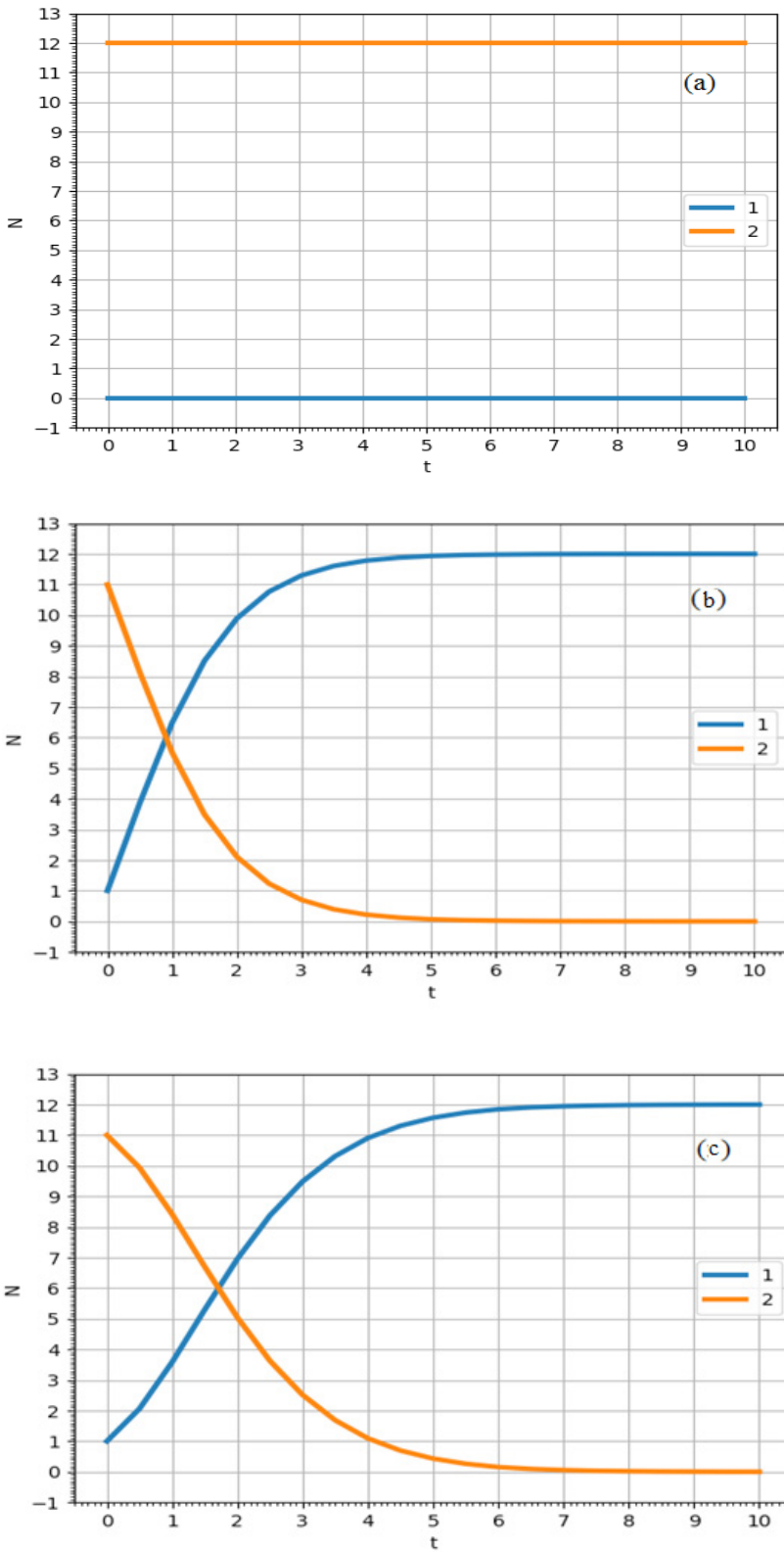
Pic. 9. Comparison of the results of Gillespie algorithm and the model based on Kolmogorov equations with $N = 7$, vertex in the status $I = 1$ and $S_i = SSSSSS$, recovery rate $\gamma = 0,0001$, infection rate $\tau = 1$, ordinate – number of people (N), abscissa – time (t), 1 – number of infected people I (Kolmogorov equations), 2 – number of people susceptible to disease S (Kolmogorov equations), 3 – number of infected people I (Gillespie algorithm), 4 – number of people susceptible to disease S (Gillespie algorithm) (compiled by the authors).

with networks, developed by a group of authors in Python programming language [10, pp. 381–384; 14].

The essence of the method is as follows: time until the next event (infection or restoration of one of the vertices to the initial state) is calculated based on total speed of all possible events. Time between events is

distributed exponentially, the parameter is the sum of all recovery and infection rates. Then it is calculated separately which event will happen. The steps are repeated until there are infected persons, and the maximum estimated time is reached. To achieve accuracy of results, calculations are performed on an iterative basis. Input data are elements in group I , coefficients





Pic. 10. Dynamics of epidemic development in the absence of initially infected persons (a), with infected common zone (b), with one infected compartment (c), recovery rate $\gamma = 0,0001$, infection coefficient $\tau = 0,5$, ordinate – number of people (N), abscissa – time (t), 1 – number of infected persons I , 2 – number of people susceptible to disease S (compiled by the authors).

τ and γ . The output is the number of infected I and susceptible S persons.

The Gillespie algorithm allows discrete and stochastic modelling of a system with a small number of elements, because each event is explicitly modelled. This method is widely used in modelling chemical reactions [15] and spread of diseases such as HIV [16].

Since Gillespie method considers all possible changes in events, its application is justified for systems of limited dimensions due to high computational costs. To solve the considered problem of spreading the epidemic in a train coach, the use of the algorithm is thus justified.

Let us compare the previously described model based on Kolmogorov equations with Gillespie algorithm for $N = 7$. Suppose that the first vertex is initially infected (Pic. 7, vertex 1): vertex in status $I = 1$, $S_i = SSSSSS$, recovery rate $\gamma = 0,0001$, coefficient infection $\tau = 1$.

The solution based on Gillespie algorithm shows good coincidence with the solution based on Kolmogorov equations (Pic. 9), so this method can be applied to the extended network with $N = 12$ (Pic. 2), which is the train model in this article.

Results

In Pic. 2 compartments (2–10), a common area (0) and 2 vestibules (1, 11) are allocated as zones. Since the source of spread of infection is a person, the common zone (the conductor is taken into account) and the compartment can be initially infected. Let us consider and analyse the cases of spread of infection.

Below are the cases with the absence of infected passengers and a single infected person at initial time (Pic. 10). The rate of recovery is considered to be $\gamma = 0,0001$, and the infection rate $\tau = 0,5$.

Thus, the epidemic does not spread in the absence of infected passengers (Pic. 10a). The greatest risk of its spread occurs through the initially infected common zone (Pic. 10b). This is since the coach attendant is usually in contact with all the passengers. In addition, passengers move through the common area. Within the framework of this model, if any compartment becomes infected, the epidemic will develop in the same way (Pic. 10c). This is since it is assumed that people spend most of their time in their compartments, and each passenger spends the same amount of time on average as

compared with other passengers in public zones (toilets, vestibules). However, in subsequent works, these data will be specified.

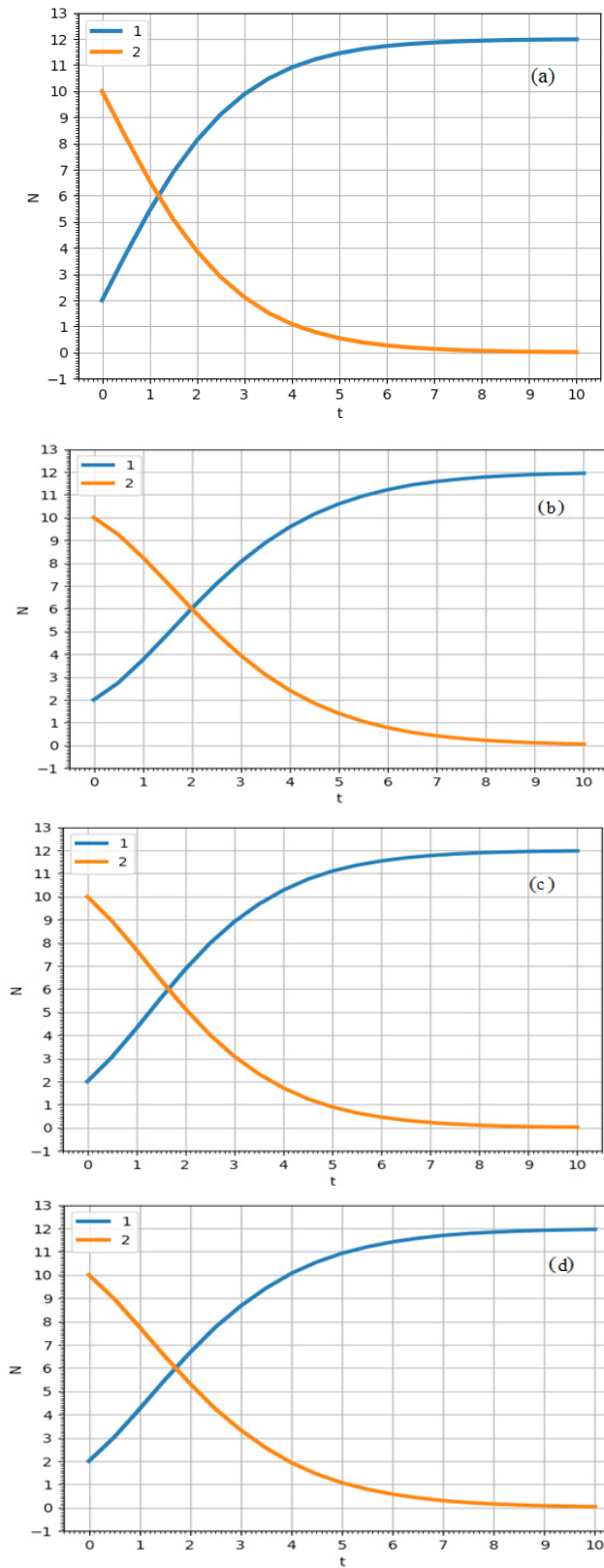
Let us consider four cases when initially there are two infected zones in order to analyse the influence of initial conditions on epidemic development. Since in this setting the calculations show that each of the compartments has an equal impact on the system, they are chosen arbitrarily. Let us suppose that in the first case the common zone and the first compartment were infected (Pic. 2, vertices 0 and 2). In the second case, let us consider any two adjacent compartments, for example, the second and the third (Pic. 2, vertices 3 and 4). In the third case, let us consider two infected compartments located at different ends: the first and the ninth (Pic. 2, vertices 2 and 10). In the fourth case, let the infected compartments be at close range, but not nearby: the fifth and seventh (Pic. 2, vertices 6 and 8). The results are shown in Pic. 11, the rate of recovery $\gamma = 0,0001$ and the infection rate $\tau = 0,3$.

Analysis shows that the epidemic develops most rapidly when the common area and any of all compartments are infected (Pic. 11a). In case of two initially infected compartments, their location matters. Therefore, with two infectious compartments, the most dangerous for spread is the case when the infected compartments are located at two different ends of the coach. This is because toilets and vestibules are located at two different ends, and, accordingly, the risk of infection upon contact with the outermost compartments is higher. The safest situation is when two infected compartments are side by side (Pic. 11b). The latter case, when two compartments are at a short distance (Pic. 11d), entails fewer consequences than when infected compartments are at opposite ends (Pic. 11c). However, this location is more dangerous than when two infected compartments are close (Pic. 11b).

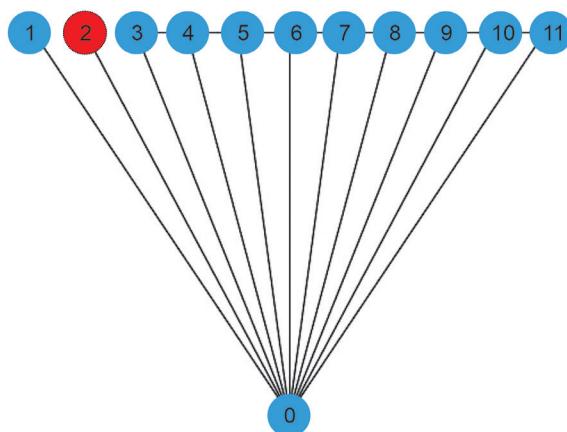
The cases considered are representative and represent a reasonable sample of infection cases. This approach can be extended both for the case of a larger number of infected areas and for a larger number of common areas.

Based on the results of calculations, it can be concluded that epidemic spread is influenced not only by the number of infected persons I , the infection coefficient τ and recovery rate γ , but also by the location of the initially infected

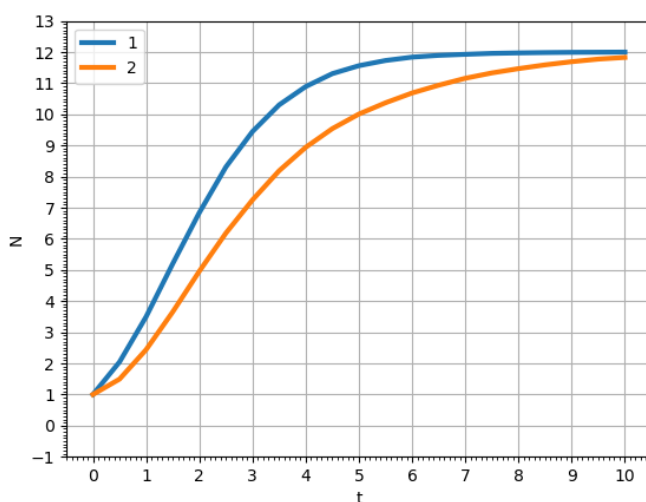




Pic. 11. Dynamics of epidemic development with infected common zone and the first compartment (a), infected second and third compartments (b), infected first and ninth compartments (c), infected fifth and seventh compartments (d), recovery rate $\gamma = 0,0001$, infection rate $\tau = 0,3$, 1 – number of people infected, 2 – number of people susceptible to disease S (compiled by the authors).



Pic. 12. Type of the network, where 0 – common zone, 1, 11 – vestibules, 2–10 – compartment. Compartment under number 1 (vertex 2) is infected and isolated from others (compiled by the authors).



Pic. 13. Comparison of the results of spread of the epidemic in a coach operating normally and in a coach with an isolated infected compartment, recovery rate $\gamma = 0,0001$, infection rate $\tau = 0,3$, ordinate – number of people (N), abscissa – time (t), 1 – number of people infected I during normal operation of the coach, 2 – number of people infected I with isolation of the infected compartment (compiled by the authors).

passengers. The developed model allows considering the location of infected passengers, which is a key factor for the train.

This model can be extended to consider a train with a dining car.

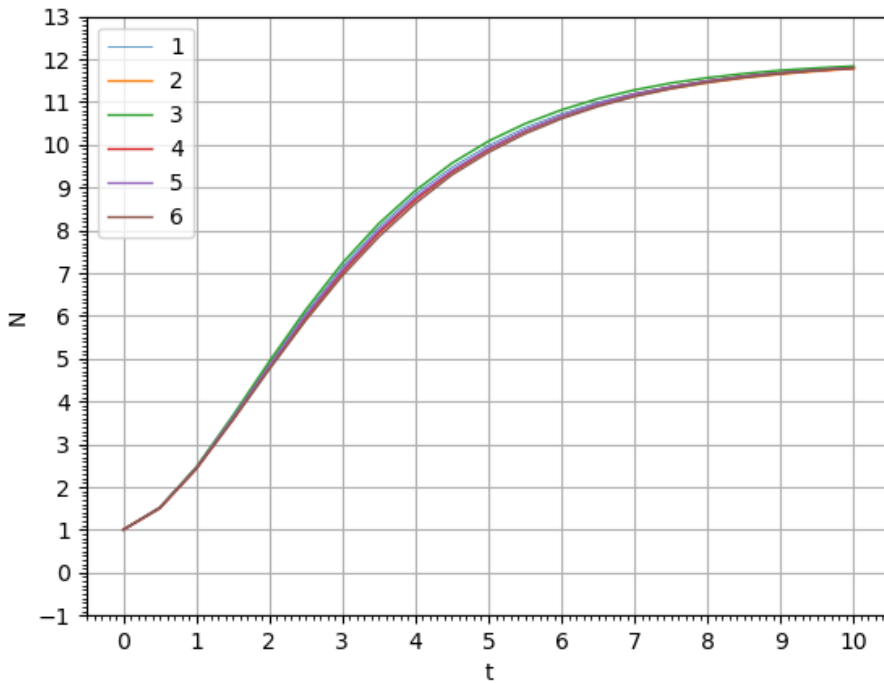
Numerical calculations have shown (Pic. 10b and Pic. 11a) that the coach attendant has the greatest risk of infection, therefore, the state of his health should be considered first. Also, special attention should be paid to common areas, they should be subject to regular sanitization.

Let us consider possible measures that can be taken in case of detection of infected passengers in a coach within the framework

of this model. Let one of the compartments be infected. The boarding is full, and there is no way to transfer passengers to empty compartments or seats. As a measure to prevent spread of the epidemic in this case, it is proposed among other steps to isolate the infected compartment from other passengers, and to evaluate the effectiveness of this assumption. Infected passengers have the opportunity to go to the common area, contact the attendant, observing safety measures, and visit the toilets at a time different from healthy passengers.

Let the first compartment be infected (Pic. 2, vertex 2), then, considering our





Pic. 14. Comparison of results of spread of the epidemic in a coach with different degrees of isolation, recovery rate $\gamma = 0,0001$, coefficient rate $\tau = 0,3$, ordinate – number of people (N), abscissa – time (t), 1 – number of people infected I when isolating the infected first compartment, 2 – number of people infected I when isolating the infected first and second compartments, 3 – number of people infected I when isolating the infected fifth compartment, 4 – number of people infected I when isolating the infected fifth and fourth compartments, 5 – number of people infected I when isolating the infected fifth and sixth compartments, 6 – number of people infected I when isolating fifth and neighbouring compartments (compiled by the authors).

assumptions, the model will take the following form (Pic. 12).

Let us compare the dynamics of spread of the epidemic following the previously described model (Pic. 2) but with its modification (Pic. 12) at the rate of recovery $\gamma = 0,0001$ and the infection rate $\tau = 0,3$.

Isolation of an infected compartment (Pic. 13) will slow spread of infection by almost 20 %. Thus, an important conclusion is that if an infected person is identified in a compartment, it is necessary to isolate him.

Let us further consider the dependence of the location of the infected compartment and the number of isolated compartments on the time of infection spread. Let us suppose that the first compartment is infected (Pic. 2, vertex 2), and to avoid dangerous situation, the second compartment is isolated along with the first one (Pic. 2, vertex 3). Also, by analogy, suppose that the fifth compartment is infected (Pic. 2, vertex 6). To prevent spread of the epidemic, as a preventive measure, the infected fifth compartment, or the fourth (Pic. 2, vertex 5) and the fifth, or sixth (Pic. 2, vertex 7)

and the fifth, or all three compartments at once, are isolated. In this case, the second compartment, like the fourth and sixth, are either healthy, or it is assumed that there are no passengers in them. Let us compare the results obtained, with the recovery rate $\gamma = 0,0001$, the infection coefficient $\tau = 0,3$.

Isolation of more than one compartment does not lead to significant improvements in this model. Thus, the main thing is to isolate the infected passengers. In case of such situations, this will significantly reduce the load on the attendants who are at risk, first of all, will bring less discomfort to other passengers, and will lead to better control of the situation.

Conclusion. The paper considers a model of spread of the epidemic in a railway compartment (corridor) coach.

The deterministic SIS model in this work is modified and reduced to a stochastic model based on Markov random processes with continuous time and a finite number of states. A graph was chosen to describe the spread of the epidemic inside the train coach.

For a simplified case with six compartments and one common zone ($N = 7$), a system with $2^7 = 128$ equations in the Python programming language was compiled and solved.

The model based on Kolmogorov equations was used to test the results of Gillespie algorithm, also implemented in Python. The consistency of the results made it possible to expand the network to the case with $N = 12$, which corresponds to the practically operated coaches in the trains used on the network of Russian Railways.

The results obtained allowed us to analyse the spread of the epidemic under various initial conditions and conclude that the location of the initially infected passengers affects the rate of its spread. It is shown that the greatest risk in the spread of the epidemic is represented by coach attendants and unregulated use of public areas. Measures are proposed in case of identifying a single infected compartment in the form of isolation of its passengers from other passengers. This measure showed an improvement in the dynamics of the spread of infection by 20%. Numerical calculations show that there is no need to isolate more than one compartment in this situation.

These results can be used in real transportation, as well as to track passengers who can be vectors of infection by processing data from CCTV cameras. These data are needed to modify the method used in the work to determine the influence of each of the compartments. For example, in [17], the authors conducted a study of the impact of public urban transport on the spread of COVID-19 infection in Singapore using transport cards. Data from travel cards were used to compile a mathematical model and identify passengers who need to be isolated at an early stage to prevent the spread of the epidemic.

REFERENCES

1. Choisy, M., Guégan, J.-F., Rohanil, P. Mathematical Modeling of Infectious Diseases Dynamics. Encyclopedia of Infectious Diseases: Modern Methodologies by Tibayrenc. M. John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 379–403.
2. Barrat, A., Barthélemy, M., Colizza, V., Vespignani, V. The role of the airline transportation network in the prediction and predictability of global epidemics. *PNAS*, 14 February, 2006, Vol. 103 (7), pp. 2015–2020. DOI: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.051052103.
3. Balcan, D., Colizza, V., Gonçalves, B., Hu, H., Ramasco, J. J., Vespignani, A. Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases. *PNAS*, 22

December, 2009, Vol. 106 (51), pp. 21484–21489. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0906910106>.

4. Mari, L., Bertuzzo, E., Righetto L. [et al]. Modelling cholera epidemics: the role of waterways, human mobility and sanitation. *J. R. Soc. Interface*, 2012, Vol. 9 (67), pp. 376–388. DOI: 10.1098/rsif.2011.0304.

5. Gatto, M., Mari, L., Bertuzzo, E., Casagrandi, R., Righetto, L., Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, A. Generalized reproduction numbers and the prediction of patterns in waterborne disease. *PNAS*, 27 November, 2012, Vol. 109 (48), pp. 19703–19708. DOI: 1073/pnas.1217567109.

6. Wu, J. T., Leung, K., Leung, G. M. Now casting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-ncov outbreak originating in Wuhan, China: A modelling study. *The Lancet*, 29 February, 2020, Vol. 395 (10225), pp. 689–697. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30260-9.

7. Hagberg, A. A., Schult, D. A., Swart, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy 2008). Eds.: G el Vároquaux, Travis Vaught, Jarrod Millman, Pasadena, CA, USA, August 2008, pp. 11–15.

8. Gillespie, D. T. A general method for numerically simulating the stochastic time evolution of coupled chemical reactions. *Journal of Computational Physics*, December, 1976, Vol. 22 (4), pp. 403–434.

9. Bratus, A. S., Novozhiov, A. S., Platonov, A. P. Dynamic systems of biology models [*Dinamicheskie sistemy i modeli biologii*]. Moscow, Fizmatlit publ., 2010, 400 p.

10. Kiss, I., Miller, J., Simon, P. *Mathematics of Epidemics on Networks: from Exact to Approximate Models*. Springer Math, 2007, 413 p.

11. Deng, Xiaomin; Wang, Xiaomeng. The Application of Gillespie Algorithm in Spreading. 3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019), April 2019, pp. 688–695. DOI: 10.2991/icmeit-19.2019.110.

12. Official website of JSC Russian Railways. [Electronic resource]: <https://www.rzd.ru/>. Last accessed 15.06.2020.

13. Venttsel, E. S. Study of operations: tasks, principles, methodology: Study guide [*Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya: Ucheb. posobie*]. 5th ed., ster. Moscow, Nauka publ.: Chief editorial board of physics-mathematical literature, 1980, 208 p.

14. EoN (Epidemics on Networks): a fast, flexible Python package for simulation, analytic approximation, and analysis of epidemics on networks. [Electronic resource]: <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.01731>. Last accessed 19.06.2020.

15. Gillespie, D. T. Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions. *Journal of Computational Physics*, 01 December, 1977, Vol. 81 (25), pp. 2340–2361. DOI: 10.1021/j100540a008.

16. Kamina, K. M., Mwalili, S., Wanjoya, A. The Modeling of a Stochastic SIR Model for HIV/AIDS Epidemic Using Gillespie's Algorithm. *International Journal of Data Science and Analysis*, 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 117–122. DOI: 10.11648/j.ijdsa.20190506.12.

17. Mo, Baichuan; Feng, Kairui; Shen, Yu; Tam, Clarence; Li, Daqing; Yin, Yafeng; Zhao, Jinhua. Modeling Epidemic Spreading through Public Transit using Time-Varying Encounter Network. [Electronic resource]: <https://arxiv.org/pdf/2004.04602.pdf>. Last accessed 19.06.2020.

This work was supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research 20-04-60157 «An integrative approach to mathematical modelling of the mechanisms of pathogenesis and development of a coronavirus infection pandemic».



Стратегическое планирование и экономическая оценка развития интермодальной транспортной инфраструктуры



Дмитрий МАЧЕРЕТ



Руслан ТИТОВ

*Мачерет Дмитрий Александрович — Российский университет транспорта, Москва, Россия.
Титов Руслан Анатольевич — Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

Авторами поставлены цели: оценить социально-экономическое значение строительства интермодальной транспортной инфраструктуры в Российской Федерации в современных условиях, провести анализ степени разработанности вопросов оценки экономической эффективности интермодальных аспектов. Для достижения этих целей проанализированы содержание современных стратегических документов (таких, как Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры, Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года, Стратегия пространственного развития Российской Федерации и др.), а также динамика объемов контейнерных перевозок и результаты в области строительства новой и модернизации существующей интермодальной транспортной инфраструктуры. На основании этого сделан вывод об актуальности, важности и перспективности развития интермодальной транспортной инфраструктуры как для пассажирских, так и грузовых перевозок.

Ключевые слова: строительство интермодальной транспортной инфраструктуры, оценка экономической эффективности, стратегическое развитие, инвестиционные проекты.

Проанализирована степень разработанности вопросов оценки экономической эффективности интермодальных аспектов, при этом рассмотрена историческая ретроспектива эволюции методов её оценки в рамках государственных или отраслевых методических руководствах, принятых в СССР и Российской Федерации. При анализе подходов к оценке экономической эффективности, собственных плановой экономической модели, описан ряд эффектов от улучшений, связанных с развитием транспортной инфраструктуры и организации эксплуатации. На фоне этого раскрыто отличие подходов, характерных для современной рыночной экономики. С помощью анализа и синтеза сделаны выводы по каждой части исследования.

В заключительной части, используя диалектический подход, сопоставлены полученные результаты. На основании этого сделаны выводы о соотношении важности строительства интермодальной транспортной инфраструктуры, степени разработанности вопросов оценки экономической эффективности интермодальных аспектов и перспектив развития данного научного направления.

*Информация об авторах:

Мачерет Дмитрий Александрович – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики транспортной инфраструктуры и управления строительным бизнесом Института экономики и финансов Российского университета транспорта, Москва, Россия, macheretda@rambler.ru.

Титов Руслан Анатольевич – аспирант Российского университета транспорта, Москва, Россия, titov-r@ya.ru

Статья поступила в редакцию 15.08.2020, принята к публикации 02.11.2020.

For the English text of the article please see p. 38.

Реализации как масштабных, так и менее затратных инвестиционных проектов предшествует оценка их целесообразности и экономической эффективности. В условиях ограниченности инвестиционных ресурсов особенно важное значение приобретает многоаспектная оценка эффективности инвестиций, которая должна базироваться на научно обоснованной методологии.

В настоящем исследовании поставлены следующие цели:

- оценить социально-экономическую важность строительства интермодальной транспортной инфраструктуры в современной России;
- провести анализ степени разработанности вопросов оценки экономической эффективности интермодальных аспектов.

Для достижения поставленных целей с помощью анализа и синтеза, а также исторического метода делаются выводы по каждой части исследования. В заключительной части, используя диалектический подход, сопоставляются полученные результаты и подводятся итоги.

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Вектор развития инфраструктурных проектов в России задаётся принимаемыми долгосрочными стратегическими документами национального масштаба и отраслевыми программами.

Утверждённую в 2008 г. Стратегию развития железнодорожного транспорта до 2030 года [1] можно считать первым государственным транспортным планом на столь длительную перспективу современной России [2; 3]. Тем выше её значимость как «пионерной» программы в отношении интермодальных аспектов.

В сфере строительства интермодальной транспортной инфраструктуры, согласно Стратегии, предусматривалось:

1) в период 2016–2030 гг. организация интермодального сообщения в направлении аэропорт Минеральные Воды–Минеральные Воды–Кисловодск с реконструкцией железнодорожных линий;

2) повышение конкурентоспособности российских железных дорог в системе международных транспортных коридоров (МТК) путём внедрения современных

технологий организации интермодальных перевозок, в частности, контейнерных блок-поездов;

3) создание сети информационно-логистических центров и развитие инфраструктуры интермодальных перевозок;

4) динамичное развитие интермодальных перевозок и освоение новых географических сегментов рынка;

5) своевременная и эффективная реакция на системные проблемы, требующие скорейшего решения, в том числе на формирование альтернативных интермодальных маршрутов с применением железнодорожного транспорта других стран.

В том же 2008 г. была принята Транспортная стратегия РФ [4], охватывающая все виды транспорта (в последующем стратегия была актуализирована). Она дополняет предыдущий документ положениями:

- о вводе единых технико-информационных стандартов и технологий, а также унифицированных перевозочных документов в сфере интермодальных перевозок;

- о развитии перевозок в контейнерах с участием внутреннего водного транспорта;

- о развитии пригородных скоростных перевозок пассажиров, в том числе интермодальных, для осуществления связи между аэропортом и городом;

- о развитии электронного обмена информацией, совершенствовании тарифных схем и таможенных технологий;

- в области общественного пассажирского транспорта общего пользования — о развитии выделенной инфраструктуры для пассажирского транспорта общего пользования, систем городского внеуличного транспорта, интермодальных систем перевозок пассажиров, а также о модернизации и увеличении парков подвижного состава.

Согласно этой стратегии, транспортный комплекс городских агломераций требует:

1) создания комплексных интермодальных транспортных систем, строительства комфортных транспортно-пересадочных узлов — пассажирских хабов, приоритетных условий движения общественного транспорта, введения единого городского электронного интермодального билета и клиентоориентированных тарифных решений в этой



сфере;

2) интенсификации интермодального движения электропоездов между аэропортами и г. Москвой, аэропортом Пулково и Балтийским вокзалом в Санкт-Петербурге;

3) улучшения клиентского обслуживания через полный переход к оформлению на пограничных переходах интермодальных транспортных единиц по принципу «одного окна» на базе электронного документооборота.

Этими двумя стратегическими документами был заложен фундамент долгосрочного развития интермодальной транспортной инфраструктуры в России.

Следует отметить в хронологическом порядке и другие документы стратегического планирования, важные с точки зрения развития интермодальной транспортной инфраструктуры.

2018 г. — Стратегия научно-технологического развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года («Белая книга») [5] определила задачи по повышению уровня клиентоориентированности путём развития контрейлерных перевозок, использования инновационных типов контейнеров для интермодальных перевозок дополнительного ассортимента товаров, а также увеличения номенклатуры перевозимых таким образом грузов.

2018 г. — Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года [6] установил цели и ключевые показатели, которые напрямую связаны с интенсификацией деятельности интермодальной транспортной инфраструктуры. Например, сроки доставки транзитных контейнерных перевозок на направлении «Север—Юг» (Красное, порты и погранпереходы Северо-Запад—Самур), «Европа—Западный Китай» (Красное—Илецк—Озинки—Карталы—Петропавловск), «Запад—Восток» (Красное, порты и погранпереходы Северо-Запад—Наушки, Забайкальск, порты и погранпереходы Дальнего Востока), среднюю скорость доставки транзитного контейнеропотока.

2019 г. — Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года [7] содержит положение о том, что развитие пассажирских перевозок предусматривает формирование многофункциональных интермодальных

хабов и транспортно-пересадочных узлов, интегрированных с современной городской средой и инфраструктурным окружением, расширение перечня услуг (интермодальных перевозок).

В грузовых перевозках, согласно этой программе, обозначен вектор на повышение пропускной и провозной способности инфраструктуры для увеличения транзитного контейнеропотока в четыре раза, в том числе сокращение времени перевозки контейнеров железнодорожным транспортом с Дальнего Востока до западной границы Российской Федерации до семи дней к 2024 году.

2019 г. — Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года [8] предусматривает развитие грузовых транспортно-логистических центров, рост объёмов и сокращение времени перевозок контейнеров, в том числе транзитных, железнодорожным транспортом, в частности, с Дальнего Востока до западных границ Российской Федерации до семи дней. Прогнозируется повышение пропускной способности на транспортных магистралях, рост скорости транспортировки грузов, а также развитие рынка контейнерных перевозок, что сформирует условия для опережающего роста экспорта и реализации транзитного потенциала Российской Федерации. К 2025 году более чем на 30 % будет увеличен объём перевозок экспортных товаров, осуществляемых всеми видами транспорта, за исключением трубопроводного. Эта стратегия подтверждает принятые ранее документы в том отношении, что ликвидацию инфраструктурных ограничений федерального значения, повышение доступности и качества магистральной транспортной, энергетической и информационно-телекоммуникационной инфраструктуры предлагается осуществлять, в том числе, за счёт развития интермодальной пассажирской транспортной инфраструктуры агломераций.

Целевые показатели программы [7] по объёму транзитного контейнерного потока представлены на диаграмме рис. 1.

На основании анализа стратегических документов видно, что интермодальным аспектам развития уделяется значительное внимание. При этом необходимо учитывать действие закона опережающего развития транспортной инфраструктуры [9, с. 14–15], что является одним из базовых условий бес-

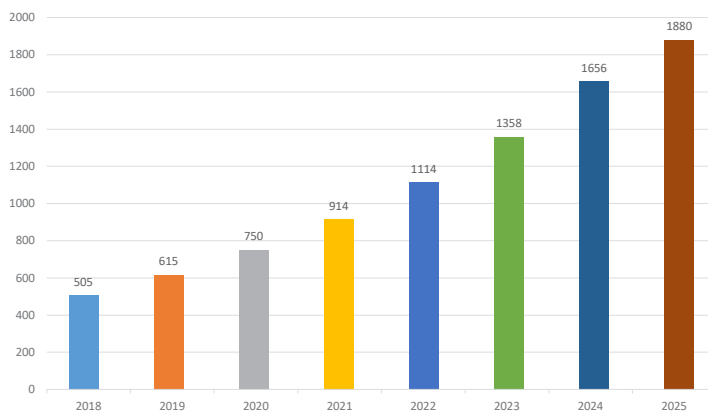


Рис. 1. Объём транзитных перевозок контейнеров, тыс. единиц ДФЭ [7].

печения эффективности экономики.

Следует отметить, что ряд важных проектов в области интермодальных перевозок уже реализован, что способствовало высокой динамике этих перевозок.

Так, завершён первый этап создания транспортно-логистических центров «Калининград» и «Черняховск», где осуществляется перегруз с колеи 1520 мм на колею 1435 мм контейнеров, перевозимых в транзитных поездах. Разработаны и запущены новые сервисы транзитных контейнерных перевозок по маршрутам Китай—Европа—Китай через порт Калининград и Южная Корея—Финляндия—Южная Корея через порт Восточный. В рамках развития МТК «Север—Юг» осуществлены тестовые отправки контейнеров из Индии в Россию и Беларусь. Организованы экспериментальные контрейлерные перевозки по маршруту Калининград—Москва—Калининград транзитом по территориям Литвы и Беларуси, а также, совместно с АО «ФГК» и ЗАО «Магнит», опытная перевозка по маршруту Москва—Новосибирск [10].

Показатели перевозок в контейнерах за период 2015—2018 гг. характеризуются устойчивым ростом и представлены в виде диаграмм на рис. 2.

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, ЗАКРЕПЛЁННЫХ В ОФИЦИАЛЬНЫХ ДОКУМЕНТАХ

Обзор методов оценки экономической эффективности необходимо начать с учётом рекомендаций, получивших документальное закрепление в государственных или отрасле-

вых документах, с выделением интермодальных аспектов. Более общие подходы к оценке экономической эффективности рассмотрены в публикациях [11; 12].

Советский период

Послевоенная история появления методических документов по оценке экономической эффективности началась примерно с 1950-х годов. Это было связано, в том числе, с созданием в 1947 г. Госкомитета по внедрению передовой техники в народное хозяйство СССР, а также с экономической реформой конца 1950-х годов.

Документы касались общих подходов к оценке эффективности, например, внедрения новой техники, изобретений и рационализаторских предложений как без привязки к специфике конкретных отраслей народного хозяйства, так и с учётом специфики отрасли, например, строительной, автомобильного, морского транспорта [13, с. 4], а также ускорения научно-технического прогресса, в том числе на железнодорожном транспорте. Дополнительно утверждались методики определения экономической эффективности капитальных вложений, в том числе на железнодорожном транспорте, морском флоте [14, с. 3].

Общим принципом оценочных подходов являлось обязательное проведение расчётов и обоснований эффективности капитальных вложений с соблюдением народнохозяйственного подхода. Критерием экономической эффективности по народному хозяйству являлся прирост национального дохода (в сопоставимых ценах) по отношению к капитальным вложениям, вызвавшим этот



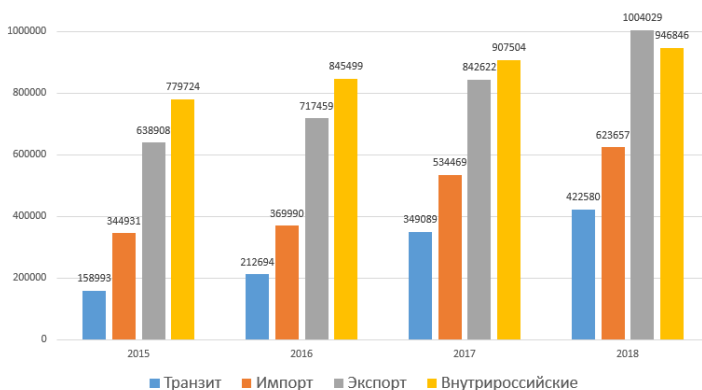


Рис. 2. Показатели перевозок в контейнерах по сети российских железных дорог (составлено авторами на основании данных ОАО «РЖД»).

прирост.

В процессе разработки планов капитальных вложений складывающиеся показатели экономической эффективности необходимо было сравнивать с нормативами и с аналогичными показателями эффективности капитальных вложений, а также с показателями эффективности производства на передовых предприятиях соответствующих отраслей и подотраслей.

Показателем сравнительной экономической эффективности капитальных вложений являлся минимум приведённых затрат.

Примерно с конца 1970-х годов в транспортных документах по оценке экономической эффективности капитальных вложений в строительство появляются упоминания о контейнерных перевозках [14, с. 10]. Так, например, в составе учитываемых капитальных вложений при определении экономической эффективности выделялась группа задач по обоснованию береговых комплексов для доставки грузов укрупнёнными транспортными местами (паромные переправы, контейнерные терминалы, лихтеровозные системы). Для неё учитывались прямые капитальные вложения: в строительство собственно паромов или специальных судов, береговых и других сооружений и устройств, обеспечивающих погрузку-выгрузку паромов, спецсудов, передачу или перегрузку на другой вид транспорта укрупнённых транспортных средств, перевозимых на паромов или специальных судах (вагонов, трейлеров, контейнеров и др.). И сопряжённые вложения: в береговые устройства, обеспечивающие работу паромного или другого комплекса (развитие припортовых станций, автодорог), развитие судоремонтной базы,

в транспортные средства, а также стоимость грузовой массы.

Транспортная специфика диктовала необходимость сравнения вариантов и оценки эффективности капитальных вложений с учётом стоимости грузов в пути, которые составляют часть оборотных средств народного хозяйства. Эффект от ускорения доставки грузов позволяет увеличивать оборачиваемость оборотных средств народного хозяйства и по своему экономическому значению равносителен сокращению потребного объёма капитальных вложений [14, с. 18].

Экономический эффект, связанный с высвобождением грузовой массы, предлагалось определять по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{гп}} = \frac{C_{\text{гп}} Q (t_{\text{д}}^{\text{н}} - t_{\text{д}}^{\text{у}})}{365}, \quad (1)$$

где $C_{\text{гп}}$ — средняя цена 1 т груза, руб.;

Q — годовое отправление груза, т.;

$t_{\text{д}}^{\text{н}}, t_{\text{д}}^{\text{у}}$ — время доставки груза соответственно до и после ускорения, сут.

Наравне с эффектами в грузовых перевозках указывалось на необходимость учитывать народнохозяйственный эффект от увеличения или уменьшения продолжительности поездки пассажиров. Стоимостную оценку одного сбережённого пассажиро-часа в общетранспортных расчётах оценивали в 10–15 коп., что при средней месячной заработной плате молодого специалиста в 140 руб. [15, с. 46] составляло 0,1 % за каждый сбережённый час.

Народнохозяйственная эффективность капитальных вложений в развитие контейнерных, пакетных и других прогрессивных способов транспортировки грузов характеризовалась следующими эффектами:

1) ускорением доставки грузов потреби-

телям — посредством учёта стоимости грузовой массы, находящейся в процессе транспортировки;

2) экономией на таре и упаковке грузов — прямым счётом для конкретных условий транспортировки;

3) повышением качества транспортировки грузов (сохранности, безопасности и т.д.) — прямым счётом для конкретных условий транспортировки;

4) упрощением и удешевлением транспортно-экспедиторских и складских операций у грузоотправителя и грузополучателя — прямым счётом для конкретных условий грузовых отправок.

При перевозке железнодорожных вагонов и других видов транспортных средств на паромовых или других специализированных судах, согласно методическим документам того периода, необходимо было учитывать затраты на их содержание за время перевозки по морю. Эти расходы рекомендовалось определять по формуле:

$$C_B = C_B(t_p + t_{\Pi})n_B, \quad (2)$$

где C_B — часовая ставка содержания вагона или транспортного средства в эксплуатации;

t_p — время рейсооборота в часах;

t_{Π} — интервал между паромными или судами в часах;

n_B — число вагонов на пароме.

Рассматривались несколько конкретных примеров расчётов. Например, определение экономической эффективности капитальных вложений при замене обычных судов на суда-контейнеровозы для перевозки заданного объёма грузов. При этом отмечалось, что эффективность капитальных вложений в строительство контейнеровозов по сравнению с действующими судами является высокой — обеспечивалась экономия 32 млн руб. капитальных вложений и 6,8 млн руб. эксплуатационных расходов по ценам того времени. Использование контейнеровозов взамен универсальных судов, намеченных к постройке, обеспечивало по результатам расчётов годовую экономию эксплуатационных расходов в 1,8 млн руб., но при этом требовалось дополнительно 2 млн руб. капитальных вложений. Дополнительные затраты окупались за счёт экономии эксплуатационных расходов примерно за один год, что свидетельствовало о высокой экономической эффективности внедряемых контейнеровозов.

Через два года — в 1979 г. — вышла в свет

ещё одна методика для морского транспорта, где затрагивался вопрос интермодальных перевозок в контейнерах и прочих укрупнённых грузовых партиях [13, с. 9].

В этой методике был рассмотрен конкретный пример определения годового экономического эффекта от внедрения новой технологии погрузочно-разгрузочных работ на контейнерном комплексе в морском порту путём включения трёх схем производства грузовых работ.

Прямой экономический эффект от внедрения новой технологии грузовых работ определяется с использованием формулы:

$$\Delta \mathcal{E} = (z_1 - z_2) Q_2, \quad (3)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ — годовое экономическое воздействие, руб.;

z_1, z_2 — приведённые затраты на единицу продукции (работы), производимой с помощью базовой и новой техники, руб.;

Q_2 — объём продукции (работы), производимой с помощью новой техники в расчётном году.

Из этих двух примеров видно, что первоначально вопросы оценки эффективности контейнеризации в нашей стране были больше связаны с морским транспортом, что обусловлено приоритетностью международного интермодального сообщения, осуществляемого на основе морских перевозок.

Период современной России

Одним из первых официально принятых в России документов по оценке эффективности инвестиционных проектов можно назвать Рекомендации 1994 г. [16]. Они опираются на основные принципы и подходы, сложившиеся в мировой практике по оценке эффективности инвестиционных проектов, адаптированные для перехода к рыночной экономике, предложенные ЮНИДО.

В Методических рекомендациях по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте 1998 г. эти же показатели экономической эффективности дополняются специфическими для транспортной отрасли натуральными показателями, в числе которых: степень повышения транспортного обеспечения, пропускная способность, экономия свободного времени и др.

В Методических рекомендациях по составу и содержанию обосновывающих материалов по инвестиционным проектам [17] даётся классификация инвестицион-



ных проектов в системе ОАО «РЖД» и впервые упоминается в этой связи проект организации интермодальных перевозок на участке Сочи–Адлер–аэропорт–Сочи. Он представлен как пример инвестиционного проекта комплексного развития железнодорожной инфраструктуры на отдельных транспортных направлениях (участках, линиях, маршрутах и т.д.), в реализации которых задействованы несколько хозяйств железнодорожной отрасли.

Экономическая эффективность проекта, согласно этому документу, является существенным, но не единственным критерием оценки эффективности проекта. В случае отсутствия у проекта экономической эффективности рассматриваются другие виды эффективности: технологическая, социальная, бюджетная, экологическая.

Появление таких проектов в методических документах было связано со стратегическими документами 2008 года, которые были рассмотрены выше, где также был сделан акцент на необходимости строительства и эксплуатации интермодальной транспортной инфраструктуры.

Одним из недавних официальных документов является Методика [18], принятая Правительством РФ в конце 2019 года.

Согласно ей, оценку социально-экономических эффектов инфраструктурного проекта с государственной поддержкой следует проводить по количественному анализу следующих показателей:

- прирост валового внутреннего продукта Российской Федерации, рассчитываемый на основе прироста валовой добавленной стоимости, поступлений налоговых платежей в связи с реализацией и импортом товаров (работ, услуг), а также в связи с экономией времени в пути пассажиров и грузов, повышением безопасности перевозок пассажиров и грузов, агломерационным эффектом и эффектом от ликвидации инфраструктурных ограничений в результате реализации инфраструктурного проекта;
- бюджетный эффект, рассчитываемый как сальдо прироста налоговых и иных обязательных платежей в бюджетную систему Российской Федерации в связи с реализацией инфраструктурного проекта и размера государственной поддержки.

ВЫВОДЫ

Изучение истории развития методического инструментария для оценки экономической эффективности позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, послевоенная история появления соответствующих документов начинается примерно с 50-х годов прошлого века и продолжается, проходя соответствующее эволюционное развитие, согласующееся с изменениями социально-экономической ситуации в стране.

Во-вторых, характерно то, что некоторые методические документы содержат в себе как коммерческую, так и социально-экономическую, и бюджетную оценку. При этом существует отдельный блок таких официальных руководств, которые фокусируют внимание на бюджетной и социально-экономической эффективности.

В-третьих, наряду с экономической эффективностью предлагается определять финансовую и технологическую.

В заключение следует отметить, что сопоставление содержания стратегических и методических документов даёт возможность сфокусировать внимание на специфических чертах стратегического планирования и экономической оценки развития интермодальной транспортной инфраструктуры.

Строительство и эксплуатация интермодальной транспортной инфраструктуры имеют приоритетное значение для развития национальной экономики, и этому уделено должное внимание в стратегических документах. Анализ стратегических документов и показателей роста объёма перевозок свидетельствует о перспективности и важности развития интермодальной транспортной инфраструктуры.

Исследование методических документов на уровне национальной, региональной и отраслевой экономики показывает, что выработан общий подход к определению экономической эффективности. При этом из методических документов на примере строительства интермодальной транспортной инфраструктуры видно, что специфические системы, проекты и объекты в них рассматриваются без глубокой детализации. Оценке строительства интермодальной транспортной

инфраструктуры уделяется не столь пристальное внимание, как это необходимо с учётом её экономической и общественной значимости.

Характерно, что некоторые из рассмотренных выше методических документов носят названия «рекомендаций» или «типовых», предполагая тем самым необходимость детализации для конкретных условий. Это свидетельствует об актуальности проведения соответствующих научных изысканий в рассматриваемой области.

Методический инструментарий оценки эффективности строительства интермодальной транспортной инфраструктуры целесообразно разрабатывать более глубоко и разносторонне. Прежде всего, необходимо дополнение имеющихся подходов к оценке экономической эффективности методическим инструментарием для специализированных проектов, таких как строительство интермодальной транспортной инфраструктуры, предусматривающим более глубокое, детальное, всестороннее рассмотрение полного спектра эффектов, генерируемых интермодальной системой или технологией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: Утв. распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 г. № 877-р. [Электронный ресурс]: <http://government.ru/docs/19759/>. Доступ 02.11.2020.
2. Лапидус Б. М., Мачерет Д. А., Елизарьев Ю. В. и др. Стратегическое развитие железнодорожного транспорта России. — М.: МЦФЭР, 2008. — 304 с.
3. Лапидус Б. М., Мачерет Д. А. Стратегия развития железнодорожного транспорта — инструмент инновационного прорыва отрасли в интересах общества и экономики России // Экономика железных дорог. — 2008. — № 10. — С. 12–20. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11651460>. Доступ 02.11.2020.
4. Транспортная стратегия Российской Федерации: Утв. распоряжением Правительства РФ от 22.11.2008 г. № 1734-р. [Электронный ресурс]: <http://government.ru/docs/22047/>. Доступ 02.11.2020.
5. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 г. № 769/р. [Электронный ресурс]: https://zszd.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=4252&layer_id=3290&id=2208. Доступ 02.11.2020.
6. Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года: Утв. распоряжением Правительства РФ от 30.09.2018 г. № 2101-р. [Электронный ресурс]:

<https://www.mintrans.ru/documents/2/9742>. Доступ 02.11.2020.

7. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: Утв. распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 г. № 466-р. [Электронный ресурс]: <http://government.ru/docs/36094/>. Доступ 02.11.2020.

8. Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года: Утв. распоряжением Правительства РФ от 13.02.2019 г. № 207-р. [Электронный ресурс]: <http://government.ru/docs/35733/>. Доступ 02.11.2020.

9. Мачерет Д. А. О законе опережающего развития транспортной инфраструктуры // Экономика железных дорог. — 2018. — № 7. — С. 14–19. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35249444>. Доступ 02.11.2020.

10. Годовой отчёт ОАО «РЖД» за 2018 г. [Электронный ресурс]: <https://ar2018.rzd.ru/ru>. Доступ 02.11.2020.

11. Мачерет Д. А. Методологические проблемы оценки экономической эффективности инвестиций на железнодорожном транспорте // Экономика железных дорог. — 2017. — № 10. — С. 13–19. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30296173>. Доступ 02.11.2020.

12. Ледней А. Ю. Методы оценки экономической эффективности инфраструктурных проектов на транспорте // Экономика железных дорог. — 2019. — № 9. — С. 14–24. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39554648>. Доступ 02.11.2020.

13. Методика определения экономической эффективности использования на морском транспорте новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. — М.: ЦРИА «Морфлот», 1979. — 72 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815885.pdf>. Доступ 02.11.2020.

14. Инструкция по определению экономической эффективности капитальных вложений: Утв. Министерством мор. флота СССР 30.11.1977 г. — М.: ЦБНТИ ММФ, 1977. — 177 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815886.pdf>. Доступ 02.11.2020.

15. А вы сколько получали в СССР? // Журнал «Коммерсантъ Деньги». — № 3 от 25.01.2016 г. — С. 46. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/2899591>. Доступ 02.11.2020.

16. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования: Утв. Госстроем РФ, Минэкономики РФ, Минфином РФ, Госкомпромом России 31.03.1994 г. № 7-12/47 // НПКВЦ «Теринвест», 1994. — 80 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854656.pdf>. Доступ 02.11.2020.

17. Методические рекомендации по составу и содержанию обосновывающих материалов по инвестиционным проектам [Распоряжение ОАО «РЖД» от 05.03.2012 г. № № 463р]. [Электронный ресурс]: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=540866#04227711086299699>. Доступ 02.11.2020.

18. Методика оценки социально-экономических эффектов от проектов строительства (реконструкции) и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, планируемых к реализации с привлечением средств федерального бюджета, а также с предоставлением государственных гарантий Российской Федерации и налоговых льгот (Постановление Правительства РФ от 26.11.2019 г. № 1512). [Электронный ресурс]: <http://government.ru/docs/38488>. Доступ 02.11.2020. ●





Strategic Planning and Economic Assessment of Development of Intermodal Transport Infrastructure



Dmitry A. MACHERET



Ruslan A. TITOV

Macheret, Dmitry A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Titov, Ruslan A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

ABSTRACT

The authors set the goals: to assess the socio-economic importance of construction of intermodal transport infrastructure in the Russian Federation in modern conditions, to analyse the degree of development of issues of assessing the economic efficiency of intermodal aspects. To achieve these objectives, the content of modern strategic documents (such as the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of Trunk Infrastructure, the Long-term Development Program of JSC Russian Railways until 2025, the Spatial Development Strategy of the Russian Federation, etc.), as well as the dynamics of container traffic volumes and results in construction of new and modernization of existing intermodal transport infrastructure were analysed. Based on this, a conclusion was made about relevance, importance, and prospects of development of intermodal transport infrastructure for both passenger and freight transportation.

The degree of elaboration of issues of assessing the economic efficiency of intermodal aspects is analysed, while the historical retrospective of evolution of methods for its assessment within the framework of state or sectoral methodological guidelines adopted in the former USSR and the Russian Federation is considered. When analysing approaches to assessing economic efficiency inherent in a planned economic model, several effects from improvements associated with the development of transport infrastructure and organisation of operation are described. Against this background, the authors reveal the difference between former and new approaches, characteristic of the modern market economy.

Through analysis and synthesis, conclusions were drawn for each part of the study. In the final part, using a dialectical approach, the results obtained are compared. Based on this, conclusions were made on the correlation between the importance of building an intermodal transport infrastructure, the degree of development of issues of assessing the economic efficiency of intermodal aspects and the prospects for development of this research area.

Keywords: building of intermodal transport infrastructure, economic efficiency assessment, strategic development, investment projects.

*Information about the authors:

Macheret, Dmitry A. – D.Sc. (Economics), Professor, Head of the Department of Economics of Transport Infrastructure and Management of Construction Business of the Institute of Economics and Finance of Russian University of Transport, Moscow, Russia, macheretda@rambler.ru.

Titov, Ruslan A. – Ph.D. student at the Department of Economics of Transport Infrastructure and Management of Construction Business of the Institute of Economics and Finance of Russian University of Transport, Moscow, Russia, titov-r@ya.ru

Article received 15.08.2020, accepted 02.11.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 30.

The implementation of both large-scale and less costly investment projects is preceded by an assessment of their feasibility and economic efficiency. In the context of limited investment resources, a multidimensional assessment of effectiveness of investments, which should be based on a scientifically grounded methodology, becomes especially important.

This study sets the following *objectives*:

- to assess the socio-economic importance of building of intermodal transport infrastructure in modern Russia;
- to analyse the degree of elaboration of the issues of assessing the economic efficiency of intermodal aspects.

To achieve the set goals using analysis and synthesis, as well as the historical *method*, conclusions are drawn for each part of the study. In the final part, using a dialectical approach, the results obtained are compared and the results are summed up.

Strategic planning

The vector of development of infrastructure projects in Russia is set by the adopted long-term strategic documents on a national scale and sectoral programs.

The Strategy for Development of Railway Transport until 2030 [1], approved in 2008, can be considered as the first state transport plan for such a long term in modern Russia [2; 3]. More important is its significance as a «pioneer» program in relation to intermodal aspects.

In the field of building of intermodal transport infrastructure, according to the Strategy, the following was envisaged:

1) In 2016–2030 organisation of intermodal traffic in the direction of Mineralnye Vody airport–Mineralnye Vody–Kislovodsk with reconstruction of railway lines.

2) Increasing the competitiveness of Russian railways in the system of international transport corridors (ITC) by introducing modern technologies for intermodal transportation, in particular, container block trains.

3) Creation of a network of information and logistics centres and development of infrastructure for intermodal transportation.

4) Dynamic development of intermodal transportation and development of new geographic market segments.

5) Timely and effective response to systemic problems that require an early solution, including formation of alternative intermodal routes using the railway transport of other countries.

In the same 2008, the Transport Strategy of the Russian Federation [4] was adopted, covering all modes of transport (subsequently, the strategy was updated). It supplements the previous document with provisions:

- On introduction of single technical and information standards and technologies, as well as single shipping documents in the field of intermodal transportation.

- On development of transportation in containers with participation of inland water transport.

- On the development of suburban speed passenger transportation, including intermodal, for communication between the airport and the city.

- On development of electronic data exchange, improvement of tariff schemes and customs technology.

- In the field of development of public passenger transport: on development of dedicated infrastructure for public passenger transport, urban off-street transport systems, intermodal passenger transport systems, as well as on modernization and expansion of rolling stock fleets.

According to this strategy, the transport complex of urban agglomerations requires:

a) Creation of integrated intermodal transport systems, construction of comfortable transport interchange hubs (passenger hubs), priority conditions for public transport, introduction of a single urban electronic intermodal ticket and customer-oriented tariff solutions in this area.

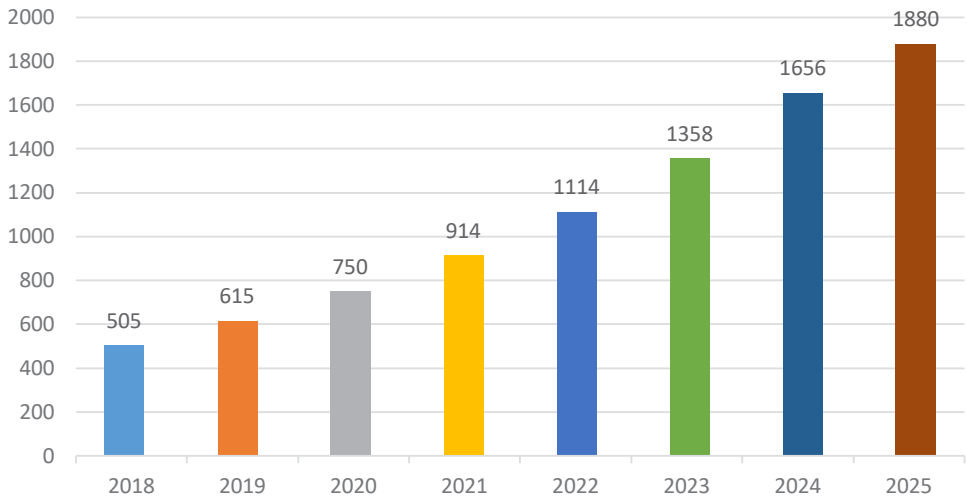
b) Intensification of intermodal traffic of electric trains between Moscow airports and the city, Pulkovo airport and Baltiysky railway station in St. Petersburg.

c) Improving customer service through a full transition to processing of intermodal transport units at border crossings in the «single window» mode based on electronic data exchange.

These two strategic documents laid the foundation for long-term development of intermodal transport infrastructure in Russia.

It is worth to note in chronological order other strategic planning documents that are





Pic. 1. The volume of transit container traffic, thousand TEU units [7].

important from the point of view of development of intermodal transport infrastructure.

2018 – The strategy of scientific and technological development of Russian Railways holding company for the period up to 2025 and for the long term until 2030 (White Book) [5] identified the tasks of increasing the level of customer focus by developing piggyback transportation, using innovative types of containers for intermodal transportation for additional assortment of goods, as well as for increasing the range of goods transported.

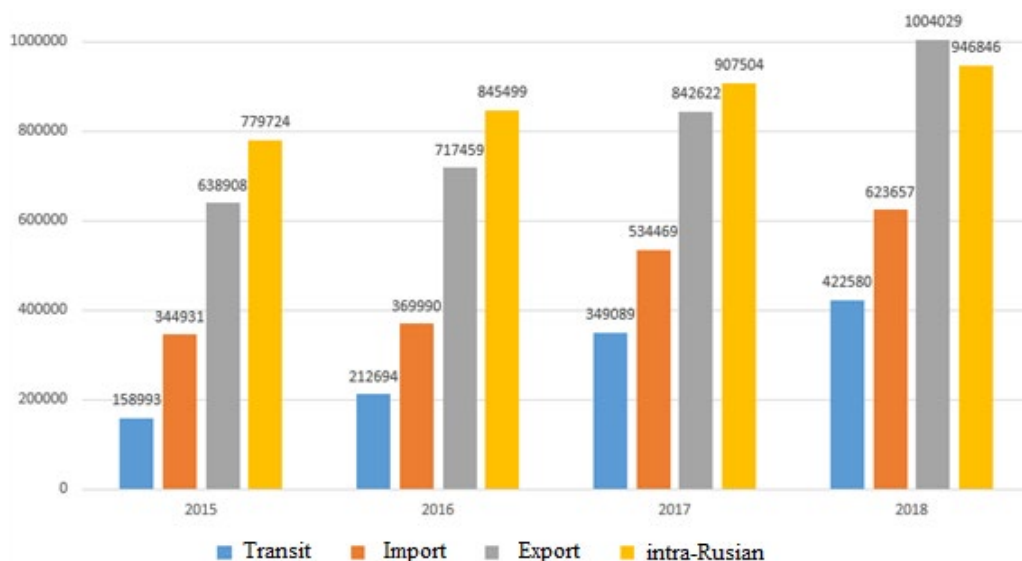
2018 – Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the Trunk Infrastructure for the Period up to 2024 [6] set goals and key indicators that are directly related to intensification of intermodal transport infrastructure. For example, it set the terms of delivery of transit container traffic in the North–South direction (Krasnoe, ports and border crossings of North–West–Samur), Europe–Western China direction (Krasnoe–Iletsk–Ozinki–Kartaly–Petrovavlovsk), West–East direction (Krasnoe, ports and border crossings of North–West–Naushki, Zabaikalsk, ports and border crossings of the Russian Far East), and the average speed of delivery of transit container traffic.

2019 – The long-term development program of JSC Russian Railways until 2025 [7] contains a provision stating that

development of passenger traffic provides for formation of multifunctional intermodal hubs and transport hubs integrated with the modern urban environment and infrastructure environment, expanding the list of services (intermodal transportation).

For freight transportation the program indicated the vector towards growth in throughput and transit capacity of the infrastructure capable to increase the transit container traffic by 4 times, including reducing time for transporting containers by rail from the Far East to the western border of the Russian Federation to 7 days by 2024.

2019 – The strategy of spatial development of the Russian Federation for the period up to 2025 [8] provides for development of freight transport and logistics centers, an increase in volumes and a reduction in time of container transportation, including transit, by rail from the Far East to the western borders of the Russian Federation to 7 days. An increase in throughput capacity of the transportation routes, in speed of carriage of goods, as well as development of the container transportation market are forecasted, which will create conditions for the outstripping growth of exports and implementation of the transit potential of the Russian Federation. By 2025, the volume of transportation of export goods, carried out by all modes of transport, without considering pipeline transport, will increase by more than 30 percent. This strategy confirmed the



Pic. 2. Indicators of container traffic on the Russian railways network (compiled by the authors based on data of JSC Russian Railways).

contents of earlier documents as it proposed to eliminate infrastructural constraints of national significance, increase the availability and quality of the trunk transport, energy, information and telecommunications infrastructure, including through development of intermodal passenger transport infrastructure of agglomerations.

Target indicators of the program [7] in terms of the volume of transit container flow are presented in the diagram in Pic. 1.

Based on the analysis of strategic documents, considerable attention is paid to intermodal aspects of development. At the same time, it is necessary to consider operation of the law of advanced development of transport infrastructure [9, pp. 14–15], which is one of the basic conditions for ensuring the efficiency of the economy.

It should be noted that several important projects in the field of intermodal transport have already been implemented, which contributed to the high dynamics of that type of transportation.

Thus, the first stage of creation of the transport and logistics centres located at Kaliningrad and Chernyakhovsk has been completed. There containers transported in transit trains are transhipped from flat wagons of 1520 mm gauge to those of 1435 mm gauge. New services of transit container transportation were developed and launched

on the routes China–Europe–China through the port of Kaliningrad and South Korea–Finland–South Korea through the port of Vostochny. As part of development of North–South ITC, test shipments of containers from India to Russia and Belarus were carried out. Experimental piggyback transportation along the route Kaliningrad–Moscow–Kaliningrad in transit through the territories of Lithuania and Belarus was organised, as well as, together with JSC FGK and CJSC Magnit, along the route Moscow–Novosibirsk [10].

Indicators of transportation in containers for the period 2015–2018 are characterized by sustainable growth and are presented in the form of diagrams in Pic. 2.

Evolution of methods for assessing economic efficiency, enshrined in official documents

The review of cost-effectiveness assessment methods should start with recommendations documented in government or industry documents, highlighting intermodal aspects. More general approaches to assessing economic efficiency are discussed in publications [11; 12].

Soviet period

The post-war history of emergence of methodological documents for assessing economic efficiency began around the 1950s.



This was due, *inter alia*, to creation in 1947 of the State Committee for introduction of advanced technology in the national economy of the USSR, as well as to the economic reform of the late 1950s.

The documents concerned both general approaches to assessing the effectiveness, for example, introduction of new technology, inventions and improvement suggestions without reference to the features of specific sectors of the national economy, or considering features of an industry, for example, construction, road either sea transport [13, p. 4], and acceleration of scientific and technological progress, including in railway transport. Besides, methods were approved for determining the economic efficiency of capital investments, including in railway transport and merchant marine [14, p. 3].

The general principle regarding approaches to evaluation necessarily entailed calculation and justification of effectiveness of capital investments in compliance with the national economic approach. The criterion of economic efficiency in the national economy was the increase in national income (in comparable prices) in relation to the capital investments that caused this increase.

In the process of developing capital investment plans, the emerging indicators of economic efficiency had to be compared with the standards and with similar indicators of the efficiency of capital investments, as well as with indicators of production efficiency at the advanced enterprises of the corresponding industries and sub-industries.

The indicator of comparative economic efficiency of capital investments was the minimum of reduced costs.

From about the end of the 1970s, references to container transportation appear in transport documents assessing the economic efficiency of capital investments in construction [14, p. 10]. So, for example, in the composition of the capital investments taken into account when determining the economic efficiency, a group of tasks was singled out for justifying coastal complexes for delivery of goods by large transport facilities (ferry crossings, container terminals, lighter carrier systems). For it they considered direct investments in construction of ferries

or special ships, coastal and other structures and devices that provide loading and unloading of ferries, special ships, transfer or reloading to another mode of transport of large vehicles transported on ferries or special ships (wagons, trailers, containers, etc.). They also considered related investments in coastal facilities that ensure operation of a ferry or other transport systems (development of port railway stations, highways), development of a ship repair base, investments in vehicles, as well as the in freight current assets of consignors.

Transport specificity dictated the need to compare options and assess the effectiveness of capital investments, taking into account the cost of goods in transit, which are part of the current assets of the national economy. The effect of accelerating delivery of goods makes it possible to increase the turnover of the current assets of the national economy, and in terms of its economic value is equivalent to a reduction in the required volume of capital investments [14, p. 18].

The economic effect associated with release of the freight assets was proposed to be determined by the formula:

$$\Delta E_{fr} = \frac{C_{fr} Q (t_d' - t_d'')}{365}, \quad (1)$$

where C_{fr} – average price of 1 ton of freight, roubles;

Q – annual shipment of freight, t;

t_d' and t_d'' – cargo delivery time, respectively,

before and after acceleration, days.

Along with the effects in freight traffic, it was pointed out that it was necessary to take into account the national economic effect of increasing or decreasing duration of a passenger's trip. The cost estimate of one saved passenger-hour in general transport calculations was estimated at 10–15 kopecks, which with an average monthly salary of a young specialist of 140 roubles [15, p. 46] was 0,1% for every hour saved.

The national economic efficiency of capital investments in development of container, unitized loads and other progressive methods of transporting goods was characterized by the following effects:

a) accelerating delivery of goods to consumers by considering current assets associated with cargo in the process of transportation;

b) saving on packing and packaging of goods by direct account for specific conditions of transportation;

c) improving quality of transportation of goods (safety, security, etc.) by direct account for specific transportation conditions;

d) simplification and reduction of the cost of freight forwarding and warehouse operations with the consignor and consignee by direct account for specific conditions of freight shipments.

When transporting railway wagons and other types of vehicles on ferries or other specialized vessels, according to the methodological documents of that period, it was necessary to take into account the costs of their maintenance during transportation by sea. It was recommended to determine these costs by the formula:

$$C_v = Ch_v (t_t + t_{\Pi}) n_v, \quad (2)$$

where Ch_v – hourly rate for keeping a car or a vehicle in operation;

t_t – time of trip turnover in hours;

t_{Π} – interval between ferries or ships in hours;

n_v – number of vehicles on the ferry.

Several specific examples of calculations were considered, for example, of determining the economic efficiency of capital investments when replacing conventional ships with container ships for transportation of a given volume of cargo. At the same time, it was noted that the efficiency of capital investments in construction of container ships in comparison with existing vessels was high: 32 million roubles of capital investments and 6,8 million roubles of operating costs at the prices of that period were saved. The use of container ships instead of conventional ships scheduled for construction, according to the results of calculations, provided an annual savings in operating costs of 1,8 million roubles, but an additional 2 million roubles of capital investments were required. The additional costs paid off due to the savings in operating costs in about a year, which testified to the high economic efficiency of the introduced container ships.

Two years later, in 1979, another method was published for sea transport, where the issue of intermodal transportation in containers and other enlarged cargo consignments was raised [13, p. 9].

In this methodology, a specific example of determining the annual economic effect

from introduction of a new technology of loading and unloading operations at the container terminal in the seaport by including three schemes for cargo operations was considered.

The direct economic effect from introduction of a new technology of cargo operations is determined using the formula:

$$\Delta E = (z_1 - z_2) Q_2, \quad (3)$$

where ΔE – annual economic effect, roubles;

z_1, z_2 – reduced costs per unit of product (work) produced using basic and new technology, roubles;

Q_2 – volume of products (work) produced with the help of new equipment in the estimated year.

From these two examples, it can be seen that initially the issues of assessing the effectiveness of containerization in Russia were more related to sea transport, which is due to the priority of international intermodal links based on sea transportation.

Period of modern Russia

Recommendations of 1994 can be deemed to be among the first documents officially adopted in Russia to assess the effectiveness of investment projects [16]. They are based on the fundamental principles and approaches that have been developed in world practices for assessing the effectiveness of investment projects, adapted for the transition to a market economy, proposed by UNIDO.

In the Methodological Recommendations for Evaluation of Investment Projects in Railway Transport in 1998, the same indicators of economic efficiency are supplemented by natural indicators specific to the transport industry: the degree of increase in transportation service provision, throughput, saving free time, etc.

The Methodological Recommendations on Composition and Content of Substantiating Materials for Investment Projects [17] provide a classification of investment projects in JSC Russian Railways system and for the first time mention in this regard a project for organizing intermodal transportation on Sochi–Adler–airport–Sochi section. It is presented as an example of an investment project for integrated development of railway infrastructure in certain transport areas (sections, lines, routes, etc.), in implementation of which several sectors of the railway industry are involved.



The economic efficiency of the project, according to this document, is the essential, but not the sole criterion for assessing the effectiveness of the project. If the project does not have economic efficiency, other types of efficiency are considered: technological, social, budgetary, environmental ones.

The emergence of such projects in the methodological documents was associated with the strategic documents of 2008, which have been discussed above, where the emphasis was also placed on the need for construction and operation of intermodal transport infrastructure.

One of the latest official documents in this regard is the Methodology [18], adopted by the Government of the Russian Federation at the end of 2019.

According to it, assessment of the socio-economic effects of an infrastructure project with state support should be carried out by quantitative analysis of the following indicators:

- An increase in the gross domestic product of the Russian Federation, calculated based on an increase in gross value added, receipts of tax payments in connection with sale and import of goods (works, services), as well as in connection with saving travel time of passengers and goods, increasing safety of passenger and cargo transportation, agglomeration effect and the effect of eliminating infrastructure constraints as a result of implementation of an infrastructure project.

- Budgetary effect, calculated as the balance of the increase in tax and other mandatory payments to the budgetary system of the Russian Federation in connection with implementation of the infrastructure project and of the amount of state support.

Conclusions.

Studying the history of development of methodological tools for assessing economic efficiency allows us to draw the following conclusions.

Firstly, the post-war history of appearance of relevant documents begins approximately from the 50s of the last century and continues, undergoing a corresponding evolutionary development, consistent with changes in the socio-economic situation in the country.

Secondly, it is characteristic that some methodological documents contain both

commercial and socio-economic, and budgetary estimates. However, there is a separate set of such official guidelines that focus on budgetary and socio-economic efficiency.

Thirdly, along with economic efficiency, it is proposed to determine financial and technological ones.

In conclusion, it should be noted that comparison of the content of strategic and methodological documents makes it possible to focus on specific features of strategic planning and economic assessment of development of intermodal transport infrastructure.

The construction and operation of intermodal transport infrastructure is a priority for development of the national economy, and it is given due attention in strategic documents. Analysis of strategic documents and indicators of growth in the volume of traffic indicates the prospects and importance of development of intermodal transport infrastructure.

The study of methodological documents at the level of the national, regional and sectoral economy shows that a general approach to determining economic efficiency has been developed. At the same time, in the methodological documents, using the example of construction of intermodal transport infrastructure, it can be seen that specific systems, projects and objects in them are considered without deep detailing. The assessment of construction of intermodal transport infrastructure is not given as much attention as it is necessary see its economic and social importance.

It is characteristic that some of the methodological documents discussed above are called «recommendations» or «model», thus suggesting the need for specification with regard to particular conditions. This testifies to the relevance of appropriate research in the area under consideration.

It is advisable to develop methodological tools for assessing the effectiveness of construction of intermodal transport infrastructure in a more profound and versatile manner. First of all, it is necessary to supplement the existing approaches to assessing economic efficiency with methodological tools for specialized projects, such as construction of intermodal transport infrastructure, providing for a deeper, more detailed, comprehensive

consideration of the full range of effects generated by an intermodal system or technology.

REFERENCES

1. Strategy for development of railway transport in the Russian Federation until 2030: Approved by the order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda. Urv. rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 17.06.2008 g. № 877-r]. [Electronic resource]: <http://government.ru/docs/19759/>. Last accessed 19.06.2020.

2. Lapidus, B. M., Macheret, D. A., Elizariyev, Yu. V. [et al]. Strategic development of railway transport in Russia [Strategicheskoe razvitiye zheleznodorozhnogo transporta Rossii]. Moscow, MCFER publ., 2008, 304 p.

3. Lapidus, B. M., Macheret, D. A. Railway transport development strategy – an instrument of innovative breakthrough of the industry in the interests of society and the economy of Russia [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta – instrument innovatsionnogo proryva otrasli v interesakh obshchestva i ekonomiki Rossii]. Ekonomika zheleznykh dorog, 2008, Iss. 10, pp. 12–20.

4. Transport strategy of the Russian Federation: Approved by the order of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 No. 1734-r [Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii: Urv. rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 22.11.2008 g. № 1734-r]. [Electronic resource]: <http://government.ru/docs/22047/>. Last accessed 19.06.2020.

5. Strategy for scientific and technological development of Russian Railways holding company for the period up to 2025 and for the long term until 2030 (White Book): Approved by the order of JSC Russian Railways dated April 17, 2018 No. 769/r [Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga RZD na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga): Urv. Rasporyazheniem OAO «RZD» ot 17.04.2018 № 769/r]. [Electronic resource]: https://zszd.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=4252&layer_id=3290&id=2208. Last accessed 19.06.2020.

6. Comprehensive plan for modernization and expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024: Approved by the order of the Government of the Russian Federation of September 30, 2018 No. 2101-r [Kompleksniy plan modernizatsii i rasshireniya magistralnoi infrastruktury na period do 2024 goda: Urv. Rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 30.09.2018 № 2101-r]. [Electronic resource]: <https://www.mintrans.ru/documents/2/9742>. Last accessed 19.06.2020.

7. Long-term development program of the JSC Russian Railways until 2025: Approved by the order of the Government of the Russian Federation of 19.03.2019, No. 466-r [Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva Rossiiskie zheleznye dorogi do 2025 goda: Urv. Rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 19.03.2019 g. № 466-r]. [Electronic resource]: <http://government.ru/docs/36094/>. Last accessed 19.06.2020.

8. Strategy for spatial development of the Russian Federation for the period up to 2025: Approved by the order of the Government of the Russian Federation of 13.02.2019, No. 207-r [Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda: Urv. Rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 13.02.2019 g. № 207-r]. [Electronic resource]: <http://government.ru/docs/35733/>. Last accessed 19.06.2020.

9. Macheret, D. A. On the law of advanced development of transport infrastructure [O zakone operezhayushchego

razvitiya transportnoi infrastruktury]. Ekonomika zheleznykh dorog, 2018, Iss. 7, pp. 14–19.

10. Annual report of JSC Russian Railways for 2018 [Godovoi otchet OAO «RZD» za 2018 g.]. [Electronic resource]: <https://ar2018.rzd.ru/ru>. Last accessed 19.06.2020.

11. Macheret, D. A. Methodological problems of assessing the economic efficiency of investments in railway transport [Metodologicheskie problemy otsenki effektivnosti investitsii na zheleznodorozhnogo transporte]. Ekonomika zheleznykh dorog, 2017, Iss. 10, pp. 13–19.

12. Ledney, A. Yu. Methods for assessing the economic efficiency of infrastructure projects in transport [Metody otsenki ekonomicheskoi effektivnosti infrastrukturnykh proektov na transporte]. Ekonomika zheleznykh dorog, 2019, Iss. 9, pp. 14–24.

13. Methodology for determining the economic efficiency of using new technology, inventions and improvement suggestions in sea transport [Metodika opredeleniya ekonomicheskoi effektivnosti ispolzovaniya na morskoy transporte novoy tekhniki, izobretenii i ratsionalizatorskikh predlozhenii]. Moscow, TsRIA Morflot, 1979, 72 p.

14. Instructions for determining the economic efficiency of capital investments: Approved by Ministry of Marine Fleet of the USSR 30.11.1977 [Instruktsiya po opredeleniyu ekonomicheskoi effektivnosti kapitalnykh vlozhenii: Urv. Ministerstvom mor. flota SSSR 30.11.1977]. Moscow, CBNTI MMF publ., 1977, 177 p.

15. How much did you get in the USSR? [A vy skolko poluchali v SSSR?]. Kommersant Dengi, 2016, Iss. 3, p. 46.

16. Guidelines for assessing the effectiveness of investment projects and their selection for financing: Approved by Gosstroy of the Russian Federation, the Ministry of Economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, the State Committee for Industry of the Russian Federation 31.03.1994, No. 7-12/47 [Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov i ikh otboru dlya finansirovaniya: Urv. Gosstroem RF, Minekonomiki RF, Minfinom RF, Goskompromom Rossii 31.03.1994 g. № 7-12/47]. NPKVTs «Terinvest», 1994, 80 p.

17. Methodological recommendations on the composition and content of substantiating materials for investment projects [Order of JSC Russian Railways dated 05.03.2012 No. 463r] [Metodicheskie rekomendatsii po sostavu i soderzhaniyu obosnovyuyushchikh materialov po investitsionnym proektam [Rasporyazhenie OAO «RZD» ot 05.03.2012 g. № 463r]]. [Electronic resource]: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=540866#04227711086299699>. Last accessed 19.06.2020.

18. Methodology for assessing the socio-economic effects of construction (reconstruction) and operation of transport infrastructure facilities planned for implementation with involvement of federal budget funds, as well as with provision of state guarantees of the Russian Federation and of tax benefits (Resolution of the Government of the Russian Federation of November 26, 2019 No. 1512) [Metodika otsenki sotsialno-ekonomicheskikh effektivov ot proektov stroitelstva (rekonstruktsii) i ekspluatatsii ob'ektov transportnoi infrastruktury planiruemyykh k realizatsii s privilecheniem sredstv federalnogo byudzheta, a takzhe s predostavleniem gosudarstvennykh garantii Rossiiskoi Federatsii i nalogovykh lgot (Postanovlenie Pravitelstva RF ot 26.11.2019 g. № 1512)]. [Electronic resource]: <http://government.ru/docs/38488>. Last accessed 19.06.2020.



Оптимистический и пессимистический сценарии формирования транспортных подходов к Арктической транспортной системе на основе достижения целевых показателей



Анатолий КИСЕЛЕНКО

Евгений СУНДУКОВ

Актуальность статьи определяется возрастающей ролью Арктической транспортной системы в экономике Российской Федерации: вовлечением территорий Арктической зоны страны (АЗРФ) в хозяйственную деятельность, увеличением их социального и экономического потенциалов. Развитие северных территорий напрямую связано с имеющимися и перспективными возможностями Арктической транспортной системы, для успешного функционирования которой необходимо обеспечить её транспортными подходами.

Целью работы является определение сценариев, по которым может осуществляться развитие и формирование этих подходов. При написании статьи использованы методы системного, сравнительного и статистического анализа и др.

В работе уточнено определение Арктической транспортной системы. Отмечается, что сценарии формирования транспортных подходов к ней следует увязывать с её развитием, а также развитием Арктической зоны Российской Федерации. Выделен подрегион – Европейская и Приуральская Арктика, где развитие транспортных подходов наиболее актуально в связи с ростом экономической активности на полуострове Ямал. Со ссылкой на работы отечественных и зарубежных

Киселенко Анатолий Николаевич – Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Сыктывкар, Россия.

Сундуков Евгений Юрьевич – Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Сыктывкар, Россия.*

авторов, документы стратегического планирования РФ полагается, что по степени достижения целевых показателей объемов перевозок по Северному морскому пути могут активироваться оптимистический и пессимистический сценарии формирования транспортных подходов. Какой из них будет реализован, определяется политическими, природными и другими рисками.

При разработке сценариев формирования транспортных подходов к Арктической транспортной системе следует учитывать появление новых видов транспорта, которые могут обеспечивать привязку удалённых объектов к магистральным транспортным сетям или ликвидировать возникающие в них разрывы. Использование новых видов транспорта в АЗРФ следует осуществлять только после испытаний на специализированных полигонах, где будет определена их безопасность для перевозок пассажиров и грузов, а также для окружающей природной среды.

Работа выполнена в рамках комплексной программы фундаментальных научных исследований УрО РАН на 2018–2020 гг. и связана с необходимостью увеличения мощностей основных портов Европейской и Приуральской Арктики и объемов перевозок по Северному морскому пути.

Ключевые слова: Арктическая транспортная система, Арктическая зона Российской Федерации, Европейская и Приуральская Арктика, сценарии формирования транспортных подходов, Северный морской путь, целевые показатели.

Информация об авторах:

Киселенко Анатолий Николаевич – доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, руководитель лаборатории проблем транспорта Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Сыктывкар, Россия, kiselenko@iespn.komisc.ru.

Сундуков Евгений Юрьевич – кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории проблем транспорта Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Сыктывкар, Россия, translab@iespn.komisc.ru.

Статья поступила в редакцию 03.11.2020, актуализирована 12.01.2021, принята к публикации 14.01.2021.

For the English text of the article please see p. 55.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование транспортных подходов к Арктической транспортной системе (АТС) направлено на удовлетворение её потребностей при обеспечении перевозок пассажиров и грузов в Арктической зоне Российской Федерации¹ (АЗРФ). Поэтому при разработке сценариев формирования транспортных подходов к АТС следует учитывать сценарии и прогнозы развития АТС и АЗРФ.

В соответствии с указом Президента РФ «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации»² был определён состав макрорегиона. В связи с ростом экономической активности на полуострове Ямал из территорий АЗРФ выделен подрегион — Европейская и Приуральская Арктика (ЕиПА), где формирование транспортных подходов наиболее актуально. К ЕиПА относятся территории Мурманской области, Ненецкого автономного округа, муниципальных образований (Архангельск, Новодвинск, Северодвинск) и районов (Мезенский, Онежский, Приморский) Архангельской области, муниципального образования городского округа «Воркута» Республики Коми, Приуральского и Ямальского муниципальных районов Ямало-Ненецкого автономного округа. Позднее к ним были добавлены Костомукшинский городской округ, Сегежский и Калевальский районы Республики Карелия, городские округа Инта и Усинск, а также Усть-Цилемский район Республики Коми, Лешуконский и Пинежский районы Архангельской области³.

¹ «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» (утверждена Президентом РФ) // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142561/. Доступ 25.09.2020.

² Указ Президента РФ от 02.05.2014 г. № 296 (ред. от 05.03.2020 г.) «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162553/. Доступ 25.09.2020.

³ Федеральный закон от 13.07.2020 г. № 193 «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/. Доступ 25.09.2020.

АТС определяем как транспортную систему, осуществляющую перевозки грузов и пассажиров в АЗРФ, состоящую из магистральных и локальных транспортных подсистем.

Основными магистральными подсистемами АТС являются Северный морской путь (СМП) со всей его инфраструктурой и системы трубопроводов АЗРФ. Также к магистральным подсистемам относятся железнодорожные, автомобильные, воздушные, водные пути, соединяющие транспортную систему РФ с арктическими морскими портами и экономическими центрами АЗРФ. К локальным транспортным подсистемам АТС относятся все другие транспортные системы, функционирующие в АЗРФ.

ИСТОЧНИКИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ прогнозов развития АЗРФ, предложения по формированию системы государственного статистического наблюдения, построению моделей развития арктической зоны в целом и отдельно взятых хозяйствующих субъектов, реализации инвестиционных проектов содержатся в работе авторов [1, с. 5–11].

В работе [2, с. 28] обосновывается новый подход к освоению северных и арктических территорий России через формирование и развитие локальной национальной транспортной системы, который предлагается осуществлять через опору на местную специфику, интересы и институты.

Авторы работы [3, с. 21] в ряд первоочередных задач ставят строительство связанной сети железных и автомобильных дорог для обеспечения функционирования предприятий по добыче полезных ископаемых и для жизнеобеспечения арктических регионов в целом.

Цели функционирования АТС в некоторой степени противоречивы. Обеспечение Северного завоза не вызывает сомнений в его необходимости. Вывоз углеводородного сырья в страны Западной Европы и США имеет положительный характер в том плане, что газодобывающие предприятия делают налоговые отчисления в бюджеты разных уровней, работники этих предприятий получают относительно высокие зарплаты. Вместе с тем, средства на развитие



территорий Севера России поступают в недостаточных объёмах.

В работе [4, с. 6] отмечается, что «проблемы стратегического управления нефтегазовым комплексом в Арктике — многокомпонентный процесс, который охватывает ряд важных проблем геополитического, экономического, общественного, природоохранного аспектов». Эти проблемы должны решаться на уровне государства с учётом интересов прибрежных регионов, смежных отраслей и сервиса, общества в части соблюдения экологических норм и создания новых рабочих мест.

Реформы 1990-х гг. негативно отразились на состоянии транспортной системы Арктики. Поэтому систему арктического транспорта необходимо возрождать на современной технологической базе [5, с. 553]. Также требуется развивать, а в рамках некоторых проектов — создавать заново транспортные подходы к АТС.

Вопросам привлечения инвестиционных ресурсов, направленных на обеспечение круглогодичного судоходства по СМП, посвящено исследование [6]. Автор пытается решить задачи объединения многочисленных планов реализации инвестиционных проектов в единый «мегапроект» по привлечению инвестиций, направленных на развитие АЗРФ, определения путей развития финансово-экономической модели СМП, выделения инвестиционной составляющей Концепции развития АТС [6, с. 16].

В современных работах зарубежных исследователей уделяется большое внимание вопросам развития СМП и состояния ледокольного флота. Так, оценка ледокольного флота государств, имеющих интересы в Арктике, приводится в статье Ф. Астона [7, с. 48–51]. Экономические расчёты по использованию СМП как транспортного маршрута между Европой и Азией с учётом основных факторов приводятся в работах европейских авторов [8, с. 434–444; 9, с. 977–983]. Французские учёные [10, с. 107–117] оценили техническую и экономическую возможность использования СМП для контейнерных перевозок. Интерес к СМП проявляют исследователи стран Юго-Восточной Азии. Например, в рабо-

те малайзийских авторов [11, с. 85–98] рассматриваются вопросы усиления влияния СМП на судоходную деятельность в Малаккском проливе, являющемся одним из ключевых международных торговых путей.

РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОДХОДОВ К АРКТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

Транспортные подходы, соединяющие в настоящее время транспортную систему РФ с арктическими морскими портами и экономическими центрами АЗРФ на территории Европейского и Приуральского Севера России (ЕиПСР), перечислены в работе [12, с. 54].

Участки путей сообщения, расположенные в АЗРФ, являются составными элементами АТС. Например, участок железной дороги Обская—Бованенково является составным элементом АТС на Приуральском Севере, а участок Северной железной дороги от станции Коноша до границы муниципального района Печора и муниципального образования городского округа «Инта» Республики Коми — транспортным подходом к АТС. Транспортные подходы к морским портам могут быть как подходами к АТС, так и составными её частями.

Функционирование АТС оказывает непосредственное влияние на развитие транспортных подходов к ней и территорий, на которых они расположены [13, с. 8].

Наибольшие преференции от функционирования АТС могут получить северные морские порты: Сабетта, Мурманск, Архангельск, Канда拉克ша, Нарьян-Мар, Онега, перспективный порт Индига, речные порты Лабытнанги и Печора.

Железнодорожные станции Октябрьской и Северной железных дорог ОАО «РЖД» обеспечивают грузовые потоки АТС, что способствует занятости населения и налоговым поступлениям в бюджеты субъектов РФ, относящихся к ЕиПСР.

При благоприятных сценариях развития к транспортным подходам АТС добавятся:

1. Железнодорожная магистраль «Белкомур» — будет одним из транспортных подходов к АТС, а именно, к глубоковод-

ному морскому порту в районе Архангельска. Сам порт станет элементом АТС.

2. Железная дорога Сосногорск—Индига (проект «Баренцкомур») станет наземным транспортным подходом к перспективному порту СМП Индига.

3. Автомобильная дорога Сыктывкар—Ухта—Усинск—Нарьян-Мар с подъездами к Воркуте и Салехарду — вновь формируемый транспортный подход к АТС.

Железнодорожное строительство по проекту «Северный широтный ход» будет составной частью АТС. Важное значение будет иметь железнодорожная линия Бованенково—Сабетта («Северный широтный ход-2»).

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СОДЕРЖАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

В работе [14, с. 10] авторы отмечают влияние на содержание сценариев развития Арктики нескольких факторов (физико-географические особенности региона; состояние мировой экономики и спрос на углеводородные ресурсы; состояние технологий и обладание ими ограниченным числом стран; состояние международных отношений и др.), условно разделяют перспективы развития Арктики до 2035 года на оптимистичные, пессимистичные и промежуточные.

В декабре 2019 года Правительство РФ утвердило подготовленный государственной корпорацией «Росатом» План развития инфраструктуры Северного морского пути до 2035 года.

В плане выделяются три этапа:

1. До 2024 года будет развиваться в основном западная часть СМП.

2. К 2030 году планируется организовать круглогодичное судоходство во всей акватории.

3. К 2035 году СМП должен стать национальной транспортной коммуникацией Российской Федерации, конкурентоспособной на мировом рынке⁴.

⁴ Указ Президента РФ от 05.03.2020 г. «Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_347129/. Доступ 25.09.2020.

В октябре 2020 года утверждена Стратегия⁵ развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г. В Стратегии дана оценка состояния, определены основные направления и задачи развития АЗРФ, в том числе в отдельных субъектах РФ, ожидаемые результаты, основные механизмы реализации, определены целевые показатели развития АЗРФ.

СЦЕНАРИИ НА ОСНОВЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Целевые установки⁶ по достижению объемов перевозок по СМП в объеме 80 млн т к 2024 году активируют два сценария развития АТС и подходов к ней: оптимистический (указанный объем перевозок будет достигнут) и пессимистический (названный объем перевозок не будет достигнут).

Планируется, что грузовая база СМП будет формироваться за счёт проектов, перечисленных в работе [12, с. 57]. В плановом грузоопотоке определен в 81,9 млн т, из которых 76,7 млн т составит вывоз полезных ископаемых. Однако некоторые эксперты сомневаются в реалистичности этих планов. По оценкам Аналитического центра при правительстве, в пессимистическом сценарии объем составляет 53,8 млн т, в базовом — 63,1 млн т, а в оптимистическом — 76,4 млн т⁷.

Реализация этих планов потребует усиления транспортных подходов к АТС, а также к морским портам в АЗРФ.

⁵ Указ Президента РФ от 26.10.2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/. Доступ 25.09.2020.

⁶ Указ Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 (ред. от 21.07.2020 г.) «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_297432/. Доступ 25.09.2020.

⁷ Расходы на развитие Северного морского пути оценили в 900 млрд рублей. [Электронный ресурс]: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2019/01/21/791925-plan-osvoeniya-sevmorput>. Доступ 24.07.2020.



Федеральный проект «Морские порты», входящий в Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры до 2024 года, предусматривает увеличение мощности морских портов более чем на 330 млн т к указанному году. *«Для эффективного решения этой задачи необходим комплексный подход и синхронизация развития портовой, железнодорожной и автодорожной инфраструктур, прежде всего — развитие ближних и дальних подходов к портам»*, — отмечал бывший министр транспорта РФ Е. И. Дитрих в своём выступлении на XIII Международном форуме «Транспорт России-2019»⁸.

На финансирование Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года государство в 2020–2022 годах потратит 1,4 трлн руб. Среди главных целей Комплексного плана — строительство и модернизация российских участков автомобильных дорог, относящихся к международному транспортному маршруту «Европа—Западный Китай», увеличение мощностей морских портов РФ до 1,3 млрд т, включая порты Дальневосточного, Арктического, Северо-Западного (Балтийского), Волго-Каспийского и Азово-Черноморского бассейнов, развитие СМП и увеличение грузопотока по нему до 80 млн т.

Реализация проекта «Комплексное развитие Мурманского транспортного узла» потребует повышения пропускной способности на протяжённом участке Волховстрой—Мурманск. В начале июня 2020 г. власти Мурманской области вынуждены были ввести режим чрезвычайной ситуации регионального характера в связи с разрушением железнодорожного моста через р. Колу⁹, что привело к нарушению движения грузов по железной дороге. Такой режим действовал до завершения работ по прокладке резервной ветки до станции Мурманск. В ре-

зультате несколько крупных клиентов Мурманского порта перенаправили часть своих грузов в порты Прибалтики¹⁰. Сложившееся положение обнажило проблему того, что *«ближайшие порты Северо-Запада по своим техническим возможностям могут использоваться как альтернатива Мурманскому порту»*. Вместе с тем, такую альтернативу может составить перспективный порт в бухте Индига.

Серьёзные риски представляют процесс изменения климата в Арктике и связанное с этим таяние вечной мерзлоты¹¹. Это несёт серьёзную угрозу капитальным сооружениям, к которым относятся и транспортные объекты.

НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫЙ СЦЕНАРИЙ?

До марта 2020 года можно было полагать, что развитие АТС и транспортных подходов к ней пойдёт по оптимистическому сценарию. Темпы прироста объёмов грузовых перевозок по СМП даже опережали прогнозируемые значения. В 2019 году суммарный объём грузоперевозок по СМП вырос на 56,7 % — до 31,5 млн т (в 2018 г. этот показатель составил 20,1 млн т). В частности, 20,5 млн т грузов обработано в порту Сабетта, 1,5 млн т — в порту Дудинка и 7,7 млн т — на терминале вблизи мыса Каменный. Общее количество транзитных рейсов достигло 37, объём транзитных грузоперевозок в 2019 г. вырос почти на 41,9 % и составил 697,2 тыс. т (в 2018 г. — 491,3 тыс. т)¹².

События, связанные с распространением коронавирусной инфекции, привели к падению объёмов производства во многих странах. В связи с этим повышается вероятность развития события по пессимистическому сценарию.

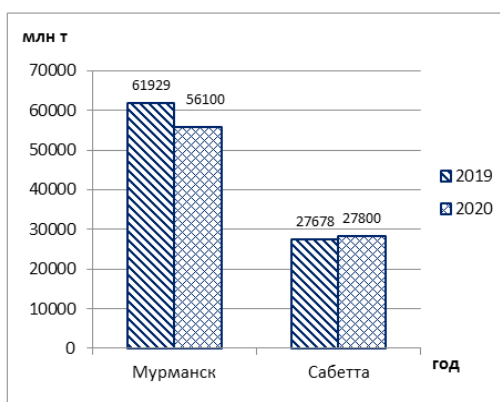
¹⁰ Из-за рухнувшего моста часть грузов из Мурманска уйдёт в порты Прибалтики. [Электронный ресурс]: <https://www.rbc.ru/business/09/06/2020/5eda75319a7947558656f517>. Доступ 09.06.2020.

¹¹ Катастрофа «Норникеля» — только начало. Пол-страны под угрозой из-за таяния вечной мерзлоты. [Электронный ресурс]: <https://pogoda.mail.ru/news/42182462/>. Доступ 15.05.2020.

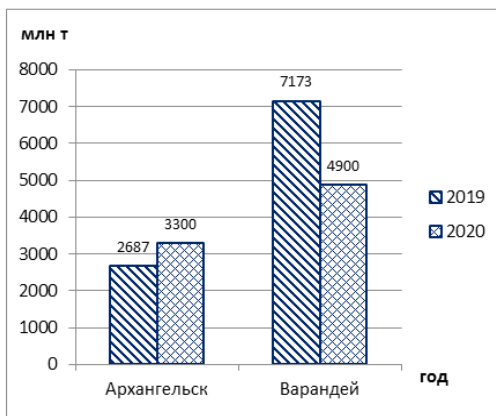
¹² В 2019 году объём грузоперевозок по Севморпути вырос на 56,7 %. [Электронный ресурс]: https://www.korabel.ru/news/comments/v_2019_godu_obem_gruzoperevozok_po_sevmorputi_vyros_na_56_7.html. Доступ 25.02.2020.

⁸ Инвестициям в порты и в железную дорогу нужна синхронизация. [Электронный ресурс]: http://morvesti.ru/analitika/1688/83520/?sphrase_id=3149684. Доступ 08.05.2020.

⁹ Региональный режим ЧС ввели в Мурманской области из-за аварии на ж.д. мосту. [Электронный ресурс]: <https://tass.ru/obschestvo/8710919>. Доступ 11.06.2020.



а) Мурманск и Сабетта



б) Архангельск и Варандей

Рис. 1. Грузооборот основных портов Европейской и Приуральской Арктики в 2019–2020 гг.¹⁴

Вместе с тем в 2020 году спад объёмов перевозок АТС по сравнению с объёмами перевозок 2019 года не произошёл – грузооборот по СМП составил 32,97 млн т, что почти на 1,5 млн т больше, чем в предыдущем году¹³. Однако, чтобы достичь увеличения грузопотока по СМП до 80 млн т в 2024 году, темпы прироста объёмов перевозок должны быть более значительными.

При этом грузооборот морских портов Арктического бассейна за 2020 год сократился на 8,4 % по сравнению с 2019 годом и составил 96,0 млн т, из них объём перевалки сухих грузов составил 30,1 млн т (-4,9 %), наливных грузов – 65,9 млн т (-9,9 %)¹⁴. Грузооборот основных портов Европейской и Приуральской Арктики в 2019–2020 годах показан на рис. 1. Видно, что снижение грузооборота произошло в порту Мурманск на 9,3 % и порту Варандей на 31,8 %, при росте в порту Архангельск на 22,4 % и примерно тех же объёмах в порту Сабетта.

Сокращение прибыли таких монополистов, как ПАО «Газпром», ПАО «Лукойл» и некоторых других, привело к со-

кращению финансирования инфраструктурных проектов, к которым относятся и проекты по развитию транспортных подходов к АТС. Так, «Газпром» планировал направить на инвестиции в 2020 году на четверть меньше, чем годом ранее – 1,6 трлн руб. В связи с ухудшением экономической ситуации в 2020 году компания решила дополнительно сократить расходы на 20 % – до 1,3 трлн руб. Это может привести к переносу на более поздний срок реализацию некоторых инвестиционных проектов, запланированных на 2021–2024 годы.

Возможно, в этих условиях следует изменить целевые установки, поскольку стратегическое планирование – прежде всего адаптивное [15].

Следует сделать приоритетным использование углеводородного сырья для внутрироссийского потребления, транспортные подходы к АТС использовать для развития территорий АЗРФ, обеспечения Северного завоза.

Обеспечение бесперебойной работы транспорта является стратегической задачей в период пандемии коронавируса. Об этом Президент РФ В. В. Путин заявил в ходе совещания по вопросам развития транспорта¹⁵. Открывая его, глава государства призвал максимально сохра-

¹³ Объём грузоперевозок по Севморпути вырос до 33 миллионов тонн в 2020 году. [Электронный ресурс]: https://1prime.ru/transport/20210111/832783531.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&nw=1610538416000. Доступ 25.09.2020.

¹⁴ Грузооборот морских портов России за 12 месяцев 2020 г. [Электронный ресурс]: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskih-portov-rossii-za-12-mesyacev-2020-goda>. Доступ 24.12.2020.

¹⁵ Президент назвал стратегическую задачу в период пандемии COVID-19. [Электронный ресурс]: <https://kianews24.ru/news/prezident-nazval-strategicheskuyu-zad/>. Доступ: 07.05.2020.



нить инвестпрограммы компаний в транспортной отрасли. Кроме того, в условиях распространения коронавирусной инфекции международный туризм фактически остановлен. В связи с этим глава государства призвал *«использовать возникающие резервы транспортного комплекса, ориентировать их на развитие внутреннего туризма и межрегиональных перевозок»*.

В случае развития ситуации с перевозками АТС по пессимистическому сценарию возрастает значение строительства глубоководного морского порта Индига и железной дороги к нему от г. Сосногорска. Данное направление является основным при реализации Стратегии¹⁶ в Ненецком автономном округе.

При ориентации на внутрироссийское потребление нефтепродуктов следует наращивать мощности по производству бензинового и дизельного топлива в районе г. Сосногорска. Строительство железной дороги в южном направлении от г. Сосногорск через пгт. Троицко-Печорск до ст. Полуночное Свердловской железной дороги обеспечит перевозку углеводородного сырья в промышленные районы Урала.

Кроме того, существуют прогнозы¹⁷, что после завершения пандемии в 2021 году возобновится рост экономик Азиатско-Тихоокеанского региона. Так, в Китайской Народной Республике в 2021 году должно произойти возобновление экономического роста повышенными темпами до уровня 7,3 %, после чего экономика вернётся к своему нормальному состоянию. В Индии прогнозируется, что после замедления роста экономики последует повышение экономического роста в 2021 финансовом году до уровня 6,2 %. Таким образом, объёмы нефти и сжиженного природного газа, невос-

требованные западными экономиками, можно будет перенаправить на Восток.

УЧЁТ ПОЯВЛЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ТРАНСПОРТА

Развитие технологий, разработка новых материалов и конструкторских решений способствуют появлению новых видов транспорта, которые по мере своего развития, достижения требуемого уровня безопасности перевозок могут находить своё применение, что необходимо учесть и при разработке сценариев формирования транспортных подходов к АТС.

Новые виды транспорта могут обеспечивать привязку удалённых объектов к магистральным транспортным сетям или ликвидировать возникающие в них разрывы. Например, в периоды межсезонья транспортное сообщение между городами Салехард и Лабытнанги в Ямало-Ненецком автономном округе обеспечивают суда на воздушной подушке (СВП)¹⁸. Также СВП используются в Ненецком автономном округе для связи г. Нарьян-Мара с населёнными пунктами Нельмин Нос, Куя, Андега, Оксина, Хонгурей, Каменка, Великовисочный, Тошвиски, Лабожское и Тельвиски в межнавигационный период¹⁹. Одной из проблем эксплуатации СВП является частый ремонт двигателей.

Перспективным направлением развития воздушного транспорта при освоении северных территорий может стать применение специализированных беспилотных воздушных судов. При этом за счёт отсутствия человека на борту летательного аппарата и систем жизнеобеспечения может быть снижена стоимость грузовых перевозок. Однако основным препятствием на пути применения беспилотных летательных аппаратов остаётся нерешённая проблема безопасности

¹⁶ Указ Президента РФ от 26.10.2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/. Доступ 25.11.2020.

¹⁷ Экономический рост в развивающихся странах Азии в 2020 году спадёт из-за коронавируса (COVID-19). [Электронный ресурс]: <https://www.adb.org/ru/news/developing-asia-growth-fall-2020-covid-19-impact>. Доступ 25.09.2020.

¹⁸ На переправе «Салехард–Лабытнанги» заработали суда на воздушной подушке. [Электронный ресурс]: <http://westzap.ru/auto/23955-na-pereprave-salehard-labytnangi-zarabotali-suda-na-vozdushnoy-podushke.html>. Доступ 25.09.2020.

¹⁹ Северная транспортная компания переходит на межнавигационное расписание. [Электронный ресурс]: <https://nao24.ru/transport/17828-severnaya-transportnaya-kompaniya-perehodit-na-mezhnavigacionnoe-raspisanie.html>. Доступ 25.10.2020.

при их движении в населённых пунктах [16].

Среди перспективных разработок, которые в будущем смогут дополнить поезда и автомобили, — магнитолевитационный, вакуумный и струнный транспорт.

В Китае в университете Тунци (Шанхай) успешно прошли испытания скоростной маглев-линии с расчётной скоростью 600 км/ч. Китай планирует запустить в коммерческую эксплуатацию пятисоткилометровую трассу высокоскоростного маглева к 2025 году²⁰. Трасса маглев Шанхай—Ханчжоу для движения со скоростью 600 км/ч официально включена в десять транспортных сверхпроектов провинции Чжэцзян на ближайшие годы. После окончания проекта в 2025 году жители г. Ханчжоу смогут добираться до центра Шанхая за 20 мин. Планируется также продление трассы маглев от Ханчжоу до Нинбо.

Для достижения прорывных результатов в направлении повышения скорости движения перспективно применение магнитной левитации в сочетании с использованием вакуумной среды — создание вакуумно-левитационных транспортных систем [17]. Бизнесменом и изобретателем Илоном Маском был предложен проект Hyperloop, в основу которого положено использование вакуумных поездов²¹. Поезда Hyperloop будут ходить по специальному, полностью изолированному от окружающего мира, тоннелю со скоростью до 1220 км/ч. К проекту привлечено несколько крупных компаний со всего мира.

В Республике Беларусь активно развиваются системы на основе струнного транспорта Юницкого. В экотехнопарке SkyWay²² под Минском построено пять

демонстрационно-сертификационных тестовых комплексов разных типов общей протяжённостью более четырёх километров и вся инфраструктура «второго уровня»: станции, стрелочные переводы, инженерные сети водопровода и канализации, системы энергообеспечения с сетями общей мощностью около 1000 кВт, системы связи и интеллектуального управления, оснащённые сетью датчиков и техническим зрением.

Деградация вечной мерзлоты в Арктической зоне несёт серьёзные риски транспортным коммуникациям — железным и автомобильным дорогам, нефте- и газопроводам. Одним из направлений обеспечения транспортной доступности территорий и удалённых промышленных объектов в таких условиях может быть развитие малогабаритных транспортных систем эстакадного типа [18].

Использование новых видов транспорта в АЗРФ следует осуществлять только после испытаний на специализированных полигонах, где будет определена их безопасность для перевозок пассажиров и грузов, а также для окружающей природной среды. Подобные научно-испытательные полигоны создаются, в частности, на базе Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова²³. На таких полигонах будет проводиться экспериментальная отработка техники в суровых погодных условиях Арктики с последующим усовершенствованием конструкций и технологий на основе полученных результатов исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Формирование и поддержание функционирования транспортных подходов к Арктической транспортной системе следует увязать с развитием самой АТС и Арктической зоны Российской Федерации.

2. Политические, экологические, эпидемиологические, связанные с природными катастрофами и другие риски несут в свою очередь риск развития АТС и подходов к ней по пессимистическому сценарию.

²³ Матвеев Д. Тяжёлая дорога / Сайт АО «Коммерсантъ». [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/4602853/>. Доступ 17.12.2020.

²⁰ China's 600 km/h high-speed maglev prototype completes successful trial run. [Электронный ресурс]: <https://news.cgtn.com/news/2020-06-21/China-s-600-km-h-high-speed-maglev-completes-trial-run-RvuaeEECTm/index.html>. Доступ 24.07.2020.

²¹ Вакуумный поезд, который совершит переворот в сфере транспорта. [Электронный ресурс]: <https://novate.ru/blogs/290815/32737/>. Доступ 01.09.2020.

²² Центр практической реализации инновационных технологий SkyWay, их международной экспертизы и сертификации. [Электронный ресурс]: <http://www.unitsky.com/ecotechnopark>. Доступ 01.07.2020.





3. Для обеспечения условий реализации оптимистического сценария следует сохранять инвестиционные программы в транспортной отрасли.

4. При разработке сценариев формирования транспортных подходов к АТС следует учитывать появление новых видов транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меламед И. И., Авдеев М. А., Павленко В. И., Куценко С. Ю. Арктическая зона России в социально-экономическом развитии страны // Власть. – 2015. – № 1. – С. 5–11. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/arkticheskaya-zona-rossii-v-sotsialno-ekonomicheskom-razviti-strany/pdf>. Доступ 24.07.2020.

2. Замятина Н. Ю., Пилясов А. Н. Новый подход к освоению северных и арктических территорий России: локальная транспортная система // Проблемы развития территории. – 2018. – № 4. – С. 26–41. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-podhod-k-osvoeniyu-severnyh-i-arkticheskikh-territoriy-rossii-lokalnaya-transportnaya-sistema/pdf>. Доступ 24.07.2020.

3. Матвеев Д. С., Матвеев Д. О., Матвеев О. А. Развитие транспортной инфраструктуры Арктики – важнейшее условие привлечения инвестиций для использования ресурсной базы макрорегиона // Colloquium-Journal. Изд-во: Голопристанский мисьяройный центр занятости = Голопристанский районный центр занятости (Голая Пристань). – 2019. – № 15. – С. 19–24. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-transportnoy-infrastruktury-arktiki-vazhneyshее-uslovie-privlecheniya-investitsiy-dlya-ispolzovaniya-resursnoy-bazy/pdf>. Доступ 24.07.2020.

4. Фадеев А. М., Череповицын А. Е., Ларичкин Ф. Д. Стратегическое управление нефтегазовым комплексом в Арктике: Монография. – Апатиты: КНЦ РАН. – 2019. – 289 с.

5. Подсветова Т. В. Транспортная составляющая экономики Арктики // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 3. – С. 552–555. [Электронный ресурс]: <https://readera.org/transportnaja-sostavljajushhaja-jekonomiki-arktiki-14294723>. Доступ 24.07.2020.

6. Загородников М. А. Инвестиционное обеспечение эффективного круглогодичного судоходства по Северной морской транспортной магистрали (СМТМ) // Горизонты экономики. – 2018. – № 1. – С. 12–19. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32739037>. Доступ 24.07.2020.

7. Aston, F. Rise of the icebreaker [Arctic Ocean vessels]. Engineering & Technology, 2017, February, Vol. 12 (1), pp. 48–51. DOI: 10.1049/et.2017.0104.

8. Liu, M., Kronbak, J. The potential economic viability of using the Northern Sea Route as an alternative route between Asia and Europe. Journal of Transport Geography, 2010, No. 18, pp. 434–444. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.08.004.

9. Schøyen, H., Bråthen, S. The Northern Sea Route versus the Suez Canal: cases from bulk shipping. Journal of Transport Geography, 2011, No. 19, pp. 977–983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.003>.

10. Verny, J., Grigentin, Ch. Container shipping on the Northern Sea Route. International Journal of Production Economics, 2009, No. 122, pp. 107–117. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Jerome_Verny/publication/46487269_Container_shipping_on_the_Northern_Sea_Route/links/5bfc2278a6fdcc76e721f355/Container-shipping-on-the-Northern-Sea-Route.pdf. Доступ 24.07.2020. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.03.018.

11. Abdul Rahman, N. S. F., Saharuddin, A. H., Rasdi, R. Effect of Northern Sea Route opening to the shipping activities at Malacca straits. International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, 2014, No. 1, pp. 85–98. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.org/article/n/414042.pdf>. Доступ 24.07.2020. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.08.

12. Киселенко А. Н., Малащук П. А., Сундуков Е. Ю., Фомина И. В. Сценарии формирования транспортных подходов к Арктической транспортной системе // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производственных сил Севера-2020: Сб. статей VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) (9–11 сентября 2020 г., Сыктывкар): в 2 ч. – Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2020. – Ч. 2. – С. 52–60.

13. Грузинов В. М., Зворыкина Ю. В., Иванов Г. В. и др. Арктические транспортные магистрали на суше, акваториях и в воздушном пространстве // Арктика: экология и экономика. – 2019. – № 1. – С. 6–20. [Электронный ресурс]: [http://www.ibrae.ac.ru/docs/1\(33\)_2019_Arctic/006_020_%20Arctic_%201\(33\)%202019.pdf](http://www.ibrae.ac.ru/docs/1(33)_2019_Arctic/006_020_%20Arctic_%201(33)%202019.pdf). Доступ 24.07.2020.

14. Зайков К. С., Кондратов Н. А., Кудряшова Е. В., Липина С. А., Чистобаев А. И. Сценарии развития Арктического региона (2020–2035 гг.) // Арктика и Север. – 2019. – № 35. – С. 5–24. [Электронный ресурс]: http://www.arcticandnorth.ru/upload/iblock/68c/01_Zaikov_i_dr.pdf. Доступ 24.07.2020.

15. Киселенко А. Н. Прогнозирование и планирование. – Сыктывкар: КРАГС и У. – 2003. – 87 с.

16. Швецова С. В., Швецов А. В. Анализ безопасности при перевозке грузов беспилотными летательными аппаратами // Мир транспорта. – 2019. – № 17 (5). – С. 286–297. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1757/2174>. Доступ 24.07.2020. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-286-297>.

17. Лапидус Б. М. Магнитная левитация – фундаментальная основа для сверхскоростных вакуумно-левитационных транспортных технологий // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 26–35. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitnaya-levitatsiya-fundamentalnaya-osnova-dlya-sverhskorostnyh-vakuumno-levitatsionnyh-transportnyh-tehnologiy/pdf>. Доступ 24.07.2020. DOI: 10.17816/transsyst20184326-35.

18. Сундуков Е. Ю., Тарабукина Н. А. Использование двухсторонней левитации транспортных модулей относительно арочной эстакады // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 83–91. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-dvuhstronney-levitatsii-transportnyh-moduley-otnositelno-arochnoy-estakady/pdf>. Доступ 24.07.2020. DOI: 10.17816/transsyst20195283-91.



Optimistic and Pessimistic Scenarios for Development of Feeder Network of the Arctic Transport System Based on Achievement of Target Indicators



Anatoly N. KISELENKO



Evgeny Yu. SUNDUKOV

*Kiselenko, Anatoly N., Federal Research Center «Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Syktyvkar, Russia.
Sundukov, Evgeny Yu., Federal Research Center «Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Syktyvkar, Russia*.*

ABSTRACT

The relevance of the article is determined by the increasing role of the Arctic transport system in the economy of the Russian Federation: involvement of territories of the Arctic zone of the country in economic activities, an increase in their social and economic potential. The development of the northern territories is directly related to existing and future capabilities of the Arctic transport system, for successful functioning of which it is necessary to provide it with feeder transport network.

The objective of the work is to determine the scenarios according to which development of these feeder roads can be carried out. When writing the article, the methods of systemic, comparative, and statistical analysis were particularly used.

The paper clarifies the definition of the Arctic transport system. It is noted that scenarios for development of feeder routes to it should be linked to its general development, as well as to the development of the Arctic zone of the Russian Federation. The European and Ural Arctic subregion is highlighted, where development of feeder routes is most important in connection with the growth of economic activity

on Yamal Peninsula. With reference to the works of domestic and foreign authors, strategic planning documents of the Russian Federation, it is assumed that according to the degree of achievement of target indicators of traffic volumes along the Northern Sea Route, optimistic and pessimistic scenarios for formation of feeder network can be activated. The final implementation of one of those scenarios is determined by political, natural, and other risks.

When developing scenarios for formation of transport feeder network to the Arctic transport system, the emergence of new modes of transport should be considered. New modes of transport can provide linking of remote objects to the trunk transport networks or eliminate the gaps emerging in them. The use of new modes of transport in the Russian Arctic should be carried out only after testing at specialized test sites, where their safety for transportation of passengers and goods, as well as for the environment, will be determined.

The work was carried out within the framework of the comprehensive program of fundamental scientific research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for 2018–2020 and is associated with the need to increase the capacity of the main ports of the European and Ural Arctic and the volume of traffic along the Northern Sea Route.

Keywords: Arctic transport system, Arctic zone of the Russian Federation, European and Ural Arctic, scenarios for development of transport feeder network, Northern Sea Route, target indicators.

*Information about the authors:

Kiselenko, Anatoly N. – D.Sc. (Eng), D.Sc. (Economics), Professor, Head of the Transport Problems Laboratory of the Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North of the Federal Research Center «Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Syktyvkar, Russia, kiselenko@iespn.komisc.ru.

Sundukov, Evgeny Yu. – Ph.D. (Economics), Associate Professor, Senior Researcher at the Transport Problems Laboratory of the Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North of the Federal Research Center «Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Syktyvkar, Russia, translab@iespn.komisc.ru.

Article received 03.11.2020, revised 12.01.2021, accepted 14.01.2021.

For the original Russian text of the article please see p. 46.

Introduction. The formation of feeder transport network to the Arctic transport system (ATS) is aimed at meeting its needs while ensuring transportation of passengers and goods in the Arctic zone of the Russian Federation¹ (AZRF). Therefore, when developing scenarios for development of feeder transport network of ATS, one should consider the scenarios and forecasts for development of ATS and AZRF.

In accordance with the decree of the President of the Russian Federation «On the land territories of the Arctic zone of the Russian Federation»², the composition of the macroregion was determined. In connection with the growth of economic activity on the Yamal Peninsula, European and Ural Arctic (EUA) subregion was identified within the territories of the Russian Arctic, where development of transport approaches is most important. The EUA includes the territories of Murmansk region, Nenets autonomous district, municipalities (Arkhangelsk, Novodvinsk, Severodvinsk) and districts (Mezensky, Onezhsky, Primorsky) of Arkhangelsk region, municipal formation of the urban district «Vorkuta» of Komi Republic, Priuralsky and Yamal municipal districts of Yamalo-Nenets autonomous district. Later, Kostomukshinsky urban district, Segezha and Kalevala districts of the Republic of Karelia, the urban districts of Inta and Usinsk, as well as Ust-Tsilemsky district of the Komi Republic, Leshukonsky and Pinezhsky districts of Arkhangelsk region were added to them³.

ATS is defined as a transport system that carries out transportation of goods and passengers in the Russian Arctic, consisting of trunk and local (feeder) transport subsystems.

The main trunk subsystems of ATS are the Northern Sea Route (NSR) with all its infrastructure

and AZRF pipeline system. Also, the main subsystems include railway, road, air, and waterways connecting the transport system of the Russian Federation with the Arctic seaports and economic centres of AZRF. All other transport systems operating in AZRF belong to the local (feeder) transport subsystems of ATS.

Research sources

Analysis of forecasts for development of AZRF, proposals for development of a system of state statistical monitoring, construction of models for comprehensive development of the Arctic zone and for development of individual economic entities, implementation of investment projects are contained in the work [1, pp. 5–11].

The work [2, p. 28] substantiates a new approach to development of the northern and arctic territories of Russia through formation and development of a local national transport system, which is proposed to be carried out through relying on local specifics, interests, and institutions.

The authors of the work [3, p. 21] include construction of an interconnected network of railways and highways to ensure functioning of mining enterprises and wellbeing of the Arctic regions in a number of priority tasks.

The goals of ATS operation are somewhat contradictory. Ensuring the Northern Delivery [*annual organisation of state activities for delivery of goods to the region during the pre-winter season. – Translator's note*] does not raise doubts about its need. The export of hydrocarbons to the countries of Western Europe and the United States is positive in the sense that gas and oil producing enterprises make tax payments to the budgets of different levels, the employees of these enterprises receive relatively high salaries. At the same time, funds for development of the territories of the North of Russia are received in insufficient amounts.

In work [4, p. 6] it is noted that «problems of strategic management of the oil and gas complex in the Arctic constitute a multicomponent process that covers a number of important problems under geopolitical, economic, social, environmental aspects». These problems should be resolved at the state level, considering the interests of coastal regions, related industries and services, the interests of society in terms of compliance with environmental standards and creation of new jobs.

Reforms of the 1990s in Russia negatively affected the state of the transport system in the Arctic. Therefore, the Arctic transport system must be revived on a modern technological base [5, p. 553].

¹ Strategy for development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2020 (approved by the President of the Russian Federation). Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142561/. Last accessed 25.09.2020.

² Decree of the President of the Russian Federation of 02.05.2014 No. 296 (as amended on 05.03.2020) «On the land territories of the Arctic zone of the Russian Federation». Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162553/. Last accessed 25.09.2020.

³ Federal Law of 13.07.2020, No. 193 «On state support for entrepreneurial activity in the Arctic zone of the Russian Federation». Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/. Last accessed 25.09.2020.

It is also required to develop, and in some projects to re-create feeder network of the ATS.

The study [6] is devoted to the issues of attracting investment resources aimed at ensuring year-round navigation along the NSR. The author tries to solve the problems of combining numerous plans for implementation of investment projects into a single «megaproject» to attract investments aimed at development of AZRF, to identify ways of developing the financial and economic model of the Northern Sea Route, to highlight the investment component of the ATS Development Concept [6, p. 16].

In modern works of foreign researchers, much attention is paid to development of NSR and the state of the icebreaker fleet. Thus, assessment of the icebreaker fleet of states having interests in the Arctic is given in the article by F. Aston [7, pp. 48–51]. Economic calculations for the use of NSR as a transit route between Europe and Asia, considering the main factors, are given in the works of European authors [8, pp. 434–444; 9, pp. 977–983]. French scientists [10, pp. 107–117] assessed the technical and economic feasibility of using NSR for container shipping. Researchers from Southeast Asian countries are showing interest in NSR. For example, the work of Malaysian authors [11, pp. 85–98] considers the issues of increasing the influence of NSR on shipping activities in the Straits of Malacca, one of the key international trade routes.

Development of transport feeder network of the Arctic transport system

The feeder routes currently connecting the transport system of the Russian Federation with the Arctic seaports and economic centres of the Russian Arctic on the territory of the European and Ural North of Russia [EUNR] are listed in [12, p. 54].

The sections of transport infrastructure located in AZRF are constituent elements of the ATS. For example, the section of Obkaya–Bovanenkovo railway is a constituent element of the ATS in the Ural North, and the section of the Northern railway from Konosha station to the border of the Pechora municipal district and the municipal formation of the Inta urban district of the Komi Republic is a feeder route of the ATS. Feeder routes to seaports can be both part of feeder network of the ATS, and its constituent parts.

The functioning of the ATS has a direct impact on development of its feeder network and the territories where it is located [13, p. 8].

The ATS functioning can provide the greatest advantages for the northern seaports: Sabetta, Murmansk, Arkhangelsk, Kandalaksha, Naryan-Mar, Onega, the promising port of Indiga, river ports of Labytnangi and Pechora.

The railway stations of Oktyabrskaya and Northern railways [branches] of JSC Russian Railways provide freight traffic for the ATS, which gives employment to the population and tax revenues to the budgets of the constituent entities of the Russian Federation within the EUNR.

Under favourable development scenarios, the following elements will be added to the ATS feeder network:

1) Belkomur railway line will be one of feeder routes of the ATS, namely, to the deep-water seaport in Arkhangelsk region. The port itself will become an element of the ATS.

2) Sosnogorsk–Indiga railway (Barentskomur project) will become a land feeder route to the promising port of NSR Indiga.

3) Syktyvkar–Ukhta–Usinsk–Naryan-Mar highway with approach roads to Vorkuta and Salekhard is a newly formed feeder network element of the ATS.

Railway construction under the Northern latitudinal route project will be an integral part of the ATS. Bovanenkovo–Sabetta railway line («Northern latitudinal route-2») will be of great importance.

Factors affecting the content of scenarios for development of the Arctic transport system

In work [14, p. 10], the authors note the influence of several factors on the content of scenarios for development of the Arctic (physical and geographical features of the region; state of the world economy and demand for hydrocarbon resources; state of technology and their possession by a limited number of countries; state of international relations, etc.), and conditionally divide the prospects for development of the Arctic until 2035 into optimistic, pessimistic and intermediate ones.

In December 2019, the Government of the Russian Federation approved the Plan for development of the Northern Sea Route infrastructure until 2035 prepared by the State Atomic Energy Corporation Rosatom.

The plan is divided into three stages:

1) Until 2024, mainly the western part of NSR will be developed.

2) By 2030, it is planned to organise year-round shipping in the entire water area.



3) By 2035 the NSR should become the national transport corridor of the Russian Federation competitive in the world market⁴.

In October 2020, the Strategy⁵ for development of the Arctic Zone of the Russian Federation and provision of national security for the period up to 2035 was approved. The Strategy assessed the state of affairs, identified the main directions and tasks for development of AZRF, including those of individual constituent entities of the Russian Federation. The expected results, the main implementation mechanisms, and target indicators for development of AZRF have been determined.

Target-based scenarios

Targets⁶ for reaching the traffic volumes at the NSR of 80 million tons by 2024 will activate two scenarios for development of the ATS and its feeder network: *optimistic* (the specified traffic volume will be achieved) and *pessimistic* (the named traffic volume will not be achieved) ones.

It is planned that the cargo base of NSR will be formed thanks to the projects listed in [12, p. 57]. In the schedule, the cargo traffic is determined at 81,9 million tons, of which 76,7 million tons will be achieved through the export of minerals. However, some experts question the feasibility of these plans. According to the estimates of the Analytical Centre under the Government of the Russian Federation, the volume will be of 53,8 million tons for the pessimistic scenario, 63,1 million tons in the baseline, and 76,4 million tons for the optimistic scenario⁷.

⁴ Decree of the President of the Russian Federation of 05.03.2020 «On the fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period until 2035». Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_347129/. Last accessed 25.09.2020.

⁵ Decree of the President of the Russian Federation of 26.10.2020 No. 645 «On the Strategy on development of the Arctic Zone of the Russian Federation and provision of national security for the period up to 2035». Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/. Last accessed 25.11.2020.

⁶ Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 204 (as amend. on 21.07.2020) «On national goals and strategic tasks of development of the Russian Federation for the period until 2024». Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_297432/. Last accessed 25.09.2020.

⁷ Expenditures for development of the Northern Sea Route were estimated at 900 billion roubles [Raskhody na razvitiye Severnogo morskogo puti otsenili v 900 mlrd rublei]. [Electronic resource]: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2019/01/21/791925-plan-osvoeniya-sevmorput>. Last accessed 24.07.2020.

The implementation of these plans will require strengthening of feeder network of the ATS, as well as of the seaports in AZRF.

The federal project «Sea Ports», which is part of the Comprehensive Plan for modernization and expansion of trunk infrastructure until 2024, provides for an increase in capacity of seaports by more than 330 million tons by the specified year. «To effectively solve this problem, an integrated approach and synchronization of development of port, railway and road infrastructures is required, first, development of near and long-distance feeder routes to ports», noted the ex-Minister of Transport of the Russian Federation E. I. Dietrich in his speech at the 13th International Forum «Transport of Russia-2019»⁸.

The state in 2020–2022 will spend 1,4 trillion roubles to finance the Comprehensive Plan for modernization and expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024. Main objectives of the Comprehensive Plan comprise construction and modernization of Russian sections of highways related to the Europe–Western China international transport route, an increase in capacity of seaports of the Russian Federation to 1,3 billion tons, including the ports of the Far East, Arctic, North-West (Baltic), Volga-Caspian and Azov-Black Sea basins, development of the NSR, and an increase in cargo traffic along it to 80 million tons.

Implementation of the project «Integrated development of Murmansk transport hub» will require an increase in transit capacity along the long railway section Vokhovstroy–Murmansk. In early June 2020, the authorities of Murmansk region were forced to introduce a regional emergency due to destruction of the railway bridge across the river Cola⁹, which led to disruption of movement of goods by rail. The emergency mode was in effect until completion of work on laying a backup line to Murmansk station. As a result, several large customers of Murmansk port redirected part of their cargo to Baltic ports¹⁰. The

⁸ Investments in ports and railways need synchronization [Investitsiyam v porty i v zheleznuyu dorogu nuzhna sinkhronizatsiya]. [Electronic resource]: http://morvesti.ru/analitika/1688/83520/?sphrase_id=3149684. Last accessed 08.05.2020.

⁹ The regional emergency regime was introduced in the Murmansk region due to an accident on the railway bridge [Regionalniy rezhim ChS vveli v Murmanskoy oblasti iz-za avarii na zh.d. mostu]. [Electronic resource]: <https://tass.ru/obschestvo/8710919>. Last accessed 11.06.2020.

¹⁰ Due to the collapsed bridge, part of cargo from Murmansk will go to the ports of the Baltic [Iz-za rukhnuvshego mosta chast' gruzov iz Murmanskaya uidet v porty Pribaltiki]. [Electronic resource]: <https://www.rbc.ru/business/09/06/2020/Seda75319a7947558656f517>. Last accessed 09.06.2020.

situation revealed the problem that «the nearest ports of the North-West, according to their technical features, can be used as an alternative to Murmansk port». At the same time, the promising port in the Indiga Bay can also be such an alternative option.

The process of climate change in the Arctic and the associated melting of permafrost poses serious risks¹¹. This is a serious threat to permanent structures, which include transport facilities.

Is this the most likely scenario?

Until March 2020, it could be assumed that development of the ATS and its feeder network would proceed according to the optimistic scenario. The growth rates of freight traffic along the NSR even outpaced the forecasted values. In 2019, the total volume of cargo transportation along NSR increased by 56,7 % reaching 31,5 million tons (in 2018 this figure was of 20,1 million tons). In particular, 20,5 million tons of cargo were handled in the port of Sabetta, 1,5 million tons in the port of Dudinka and 7,7 million tons at the terminal near Cape Kamenny. The total number of transit journeys reached 37, the volume of transit cargo transportation in 2019 increased by almost 41,9 % and amounted to 697,2 thousand tons (as compared to 491,3 thousand tons in 2018)¹².

Events associated with spread of coronavirus infection have led to a drop in production in many countries. In this regard, the likelihood of the event developing according to the pessimistic scenario increases.

Regardless of that, in 2020 there was no decline in the volume of the ATS traffic compared to the volume of traffic in 2019: the cargo turnover along the NSR amounted to 32,97 million tons, which is almost 1,5 million tons more than in 2019¹³.

However, the growth rates of traffic volumes must be more significant to achieve an increase in cargo traffic along NSR up to 80 million tons in 2024.

At the same time, the turnover of seaports of the Arctic basin in 2020 decreased by 8,4 % compared to 2019 and amounted to 96,0 million tons, of which the volume of dry cargo transshipment amounted to 30,1 million tons (-4,9 %), of liquid cargo to 65,9 million tons (-9,9 %)¹⁴. Freight turnover of main ports of European and Ural Arctic in 2019–2020 is shown in Pic. 1. It can be seen that there was a decrease in cargo turnover in the port of Murmansk (by 9,3 %) and in the port of Varandey (by 31,8 %), while the increase took place in the port of Arkhangelsk (by 22,4 %), and approximately the same volumes were maintained in the port of Sabetta.

The reduction in incomes of such monopolists as PJSC Gazprom, PJSC Lukoil and some others led to a reduction in funding of infrastructure projects, which comprise projects to develop feeder network of the ATS. Thus, Gazprom planned to spend on investments in 2020 a quarter less than a year earlier: 1,6 trillion roubles. Due to the worsened economic situation in 2020, the company decided to further cut costs by 20 % to 1,3 trillion roubles. This may lead to postponement of implementation of some investment projects planned for 2021–2024.

Perhaps, in these conditions, the target settings should be changed since strategic planning is primarily adaptive [15].

Priority should be given to the use of hydrocarbons for domestic consumption. The ATS feeder network should be used for development of the territories of AZRF, and for provision of the Northern Delivery.

Ensuring smooth operation of transport is a strategic challenge during the coronavirus pandemic. This was announced by the President of the Russian Federation V. V. Putin during a meeting on development of transport¹⁵. Opening it, the head of state urged to preserve investment programs of companies in the transport industry as much as possible. In addition, in the context of spread of coronavirus infection, international

¹¹ The Nornickel disaster is just the beginning. Half of the country is threatened by the melting permafrost [*Katastrofa «Nornikelya» – tolko nachalo. Polstrany pod ugrozoi iz-za tayaniya vechnoi merzloty*]. [Electronic resource]: <https://pogoda.mail.ru/news/42182462/>. Last accessed 15.05.2020.

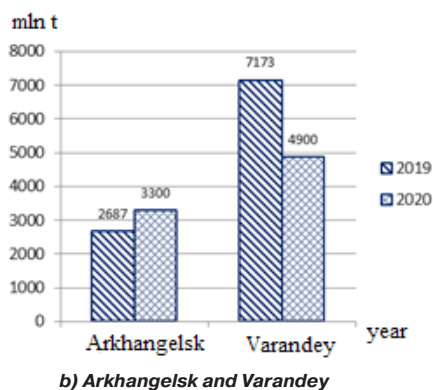
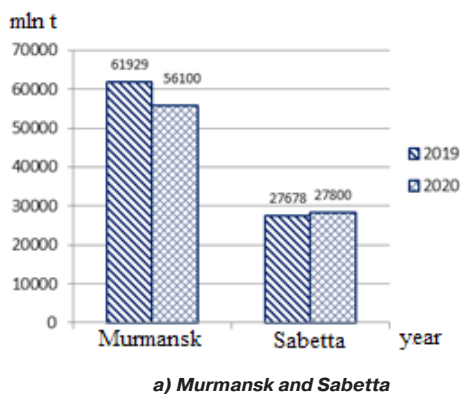
¹² In 2019, the volume of cargo transportation along the Northern Sea Route increased by 56,7 % [V 2019 godu ob'em gruzoperevozok po Sevmorputi vyros na 56,7 %]. [Electronic resource]: https://www.korabel.ru/news/comments/v_2019_godu_obem_gruzoperevozok_po_sevmorputi_vyros_na_56_7.html. Last accessed 25.02.2020.

¹³ The volume of cargo transportation along the Northern Sea Route increased to 33 million tons in 2020 [Ob'em gruzoperevozok po Sevmorputi vyros do 33 millionov ton v 2020 godu]. [Electronic resource]: https://lprime.ru/transport/20210111/832783531.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&nw=1610538416000. Last accessed 25.09.2020.

¹⁴ Freight turnover of seaports of Russia for 12 months of 2020 [*Gruzooborot morskikh portov Rossii za 12 mesyatsyev 2020*]. [Electronic resource]: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskih-portov-rossii-za-12-mesyacev-2020-goda>. Last accessed 24.12.2020.

¹⁵ President named strategic objective during COVID-19 pandemic [*Prezident nazval strategicheskuyu zadachu v period pandemii COVID-19*]. [Electronic resource]: <https://kianews24.ru/news/prezident-nazval-strategicheskuyu-zad/>. Last accessed 07.05.2020.





Pic. 1. Cargo turnover of main ports of European and Ural Arctic in 2019–2020¹⁴.

tourism has actually been stopped. In this regard, the head of state called on «to use the emerging reserves of the transport complex, to focus them on the development of domestic tourism and interregional transportation».

If the situation with ATS transportation develops according to the pessimistic scenario, the importance of construction of the deep-water seaport of Indiga and the railway to it from the city of Sosnogorsk will increase. This direction is the main one in implementation of the Strategy¹⁶ in Nenets autonomous district.

With a focus on domestic consumption of petroleum products, it is necessary to increase the capacity for production of gasoline and diesel fuel in the area of the city of Sosnogorsk. Construction of a railway to the south from the city of Sosnogorsk through the settlement Troitsko-Pechorsk to the station Polunochnoe of Sverdlovsk railway will ensure transportation of hydrocarbons to the industrial regions of the Urals.

In addition, there are forecasts¹⁷ that after the end of the pandemic in 2021, the growth of the economies of the Asia-Pacific region will resume. Thus, in the People's Republic of China in 2021, economic growth should resume at an increased rate up to the level of 7,3 %, and then the economy will

return to its normal state. In India, economic growth is projected to pick up 6,2 % in fiscal year 2021 after a slowdown. Thus, the volumes of oil and liquefied natural gas unclaimed by Western economies can be redirected to the East.

Accounting for emergence of new modes of transport

Development of technology, new materials and design solutions contribute to emergence of new modes of transport, which, as they develop and achieve the required level of transport safety, can become operational, and this must be considered when developing scenarios for formation of ATS feeder network.

New modes of transport can provide linking of remote objects to trunk transport networks or eliminate the gaps arising in them. For example, during off-season periods, transport links between the cities of Salekhard and Labytnangi in Yamalo-Nenets autonomous district are provided by air-cushion vehicles (ACV, hovercraft)¹⁸. ACV are also used in Nenets autonomous district to connect the city of Naryan-Mar with the settlements of Nelmin Nos, Kuya, Andega, Oksino, Khongurei, Kamenka, Velikovochny, Toshviski, Labozhskoe and Telviski during the inter-navigation period¹⁹. A problem of operation

¹⁶ Decree of the President of the Russian Federation of 26.10.2020 r. No. 645 «On the Strategy of development of the Arctic Zone of the Russian Federation and provision of national security for the period until 2035». Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/. Last accessed 25.09.2020.

¹⁷ Economic growth in developing countries in Asia will decline in 2020 due to the coronavirus (COVID-19) [Ekonomicheskiy rost v razvivayushchikhsya stranakh Azii v 2020 godu spadet iz-za koronavirusa (COVID-19)]. [Electronic resource]: <https://www.adb.org/ru/news/developing-asia-growth-fall-2020-covid-19-impact>. Last accessed 03.04.2020.

¹⁸ Hovercraft launched on Salekhard-Labytnangi crossing [Na pereprave «Salekhard–Labytnangi» zarabotali suda na vozdukhnoi podushke]. [Electronic resource]: <http://west-zap.ru/auto/23955-na-pereprave-salekhard-labytnangi-zarabotali-suda-na-vozdushnoy-podushke.html>. Last accessed 25.09.2020.

¹⁹ Northern Transport Company switches to an international navigation schedule [Severnaya transportnaya kompaniya perekhodit na mezhnavigatsionnoe raspisanie]. [Electronic resource]: <https://nao24.ru/transport/17828-severnaya-transportnaya-kompaniya-perekhodit-na-mezhnavigatsionnoe-raspisanie.html>. Last accessed 25.09.2020.

of the hovercraft is linked to frequent repair of engines.

A promising direction for development of air transport in exploration of northern territories can be linked to the use of specialized unmanned aerial vehicles (UAV). At the same time, due to the absence of a person or life support systems on board the aircraft, the cost of cargo transportation can be reduced. However, the main obstacle to the use of UAV is associated with the unsolved problem of safety during their movement in populated areas [16].

Among the promising developments that will be able to complement trains and cars in the future are magnetic levitation (maglev), vacuum, and string transport.

In China, a high-speed maglev line with an estimated speed of 600 km/h was successfully tested at Tongji University in Shanghai. China plans to commercialize a 500 km high-speed maglev line by 2025²⁰. Shanghai–Hangzhou maglev road for movement at a speed of 600 km/h is officially included in the ten transport super-projects in Zhejiang province for the forthcoming years. After completion of the project in 2025, residents of Hangzhou will be able to reach the centre of Shanghai in 20 minutes. An extension of maglev route from Hangzhou to Ningbo is also planned.

To achieve breakthrough results in achieving increased speed of movement, it is promising to use magnetic levitation in combination with the use of a vacuum environment through creation of vacuum-levitation transport systems [17]. The businessman and inventor Elon Musk proposed the Hyperloop project, which is based on the use of vacuum tube trains²¹. Hyperloop vacuum tube trains will run through a special tunnel completely isolated from the outside environment at a speed of up to 1220 km/h. Several large companies from all over the world are involved in the project.

Systems based on Yunitskiy's string transport are actively developing in the Republic of Belarus.

In the SkyWay²² Eco-Technopark near Minsk, five demonstration and certification test complexes of different types with a total length of more than four kilometres and the entire infrastructure of the «second level» were built: stations, turnouts, engineering networks of water supply and sewerage, power supply systems with networks with a total capacity of about 1000 kW, communication systems and intelligent control equipped with a sensor system and technical vision.

Degradation of permafrost in the Arctic zone carries serious risks to transport infrastructure, railways and roads, oil and gas pipelines. A way to ensure transport accessibility of territories and remote industrial facilities in such conditions may be associated with development of small-sized flyover-type transport systems [18].

The use of new modes of transport in AZRF should be carried out only after testing them at specialized test sites, where their safety for transportation of passengers and goods, as well as the environment, will be confirmed. Such scientific testing grounds are being created, in particular, at the North-Eastern Federal University n.a. M. K. Ammosov²³. At such test sites, experimental development of equipment will be carried out in the harsh weather conditions of the Arctic, and the results of the research will entail further improvement of structures and technologies.

Brief conclusions.

1) Development and maintenance of the Arctic transport system feeder network should be linked to development of ATS itself and the Arctic zone of the Russian Federation.

2) Political, environmental, epidemiological, natural disasters' risks and other ones might cause in turn risks for development of the ATS itself and its feeder network according to the pessimistic scenario.

3) To ensure the conditions for implementation of the optimistic scenario, investment programs in the transport industry should be maintained.

²⁰ China's 600 km/h high-speed maglev prototype completes successful trial run. [Electronic resource]: <https://news.cgtn.com/news/2020-06-21/China-s-600-km-h-high-speed-maglev-completes-trial-run-RvueEECTm/index.html>. Last accessed 24.07.2020.

²¹ The vacuum train that will revolutionize transportation [Vakuumnyi poezd, kotoriy sovershit perevorot v sfere transporta]. [Electronic resource]: <https://novate.ru/blogs/290815/32737/>. Last accessed 01.09.2020.

²² Centre for practical implementation of innovative SkyWay technologies, their international expertise and certification [Tsentr prakticheskoi realizatsii innovatsionnykh tekhnologii SkyWay, ikh mezhdunarodnoy ekspertizy i sertifikatsii]. [Electronic resource]: <http://www.unitsky.com/ecotechnopark>. Last accessed 01.07.2020.

²³ Matveev, D. Heavy road [Tyazhelaya doroga]. Website of JSC Kommersant. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/4602853/>. Last accessed 17.12.2020.

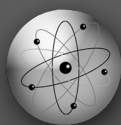




4) When developing scenarios for formation of the ATS feeder network, one should consider the emergence of new modes of transport.

REFERENCES

1. Melamed, I. I., Avdeev, M. A., Pavlenko, V. I., Kutsenko, S. Yu. The Arctic zone of Russia in socio-economic development of the country [*Arkticheskaya zona Rossii v sotsialno-ekonomicheskom razvitiy strany*]. *Vlast'*, 2015, Iss. 1, pp. 5–11. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/arkticheskaya-zona-rossii-v-sotsialno-ekonomicheskom-razvitiy-strany/pdf>. Last accessed 24.07.2020.
2. Zamyatina, N. Yu., Pilyasov, A. N. A new approach to development of the northern and arctic territories of Russia: local transport system [*Noviy podkhod k osvoeniyu severnykh i arkticheskikh territorii Rossii: lokalnaya transportnaya sistema*]. *Problemy razvitiya territorii*, 2018, Iss. 4, pp. 26–41. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-podhod-k-osvoeniyu-severnykh-i-arkticheskikh-territoriy-rossii-lokalnaya-transportnaya-sistema/pdf>. Last accessed 24.07.2020.
3. Matveev, D. S., Matveev, D. O., Matveev, O. A. Development of the transport infrastructure of the Arctic – the most important condition for attracting investment for using the resource base of the macro-region [*Razvitiye transportnoi infrastruktury Arktiki – vazhneishee uslovie privilecheniya investitsii dlya ispolzovaniya resursnoi bazy makroregiona*]. Colloquium-Journal. Publishing house: Holopristskiy regional center of employment = Holopristskiy regional employment center (Golaya Pristan), 2019, Iss. 15, pp. 19–24. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitiye-transportnoy-infrastruktury-arkitiki-vazhneishee-uslovie-privlecheniya-investitsiy-dlya-ispolzovaniya-resursnoy-bazy/pdf>. Last accessed 24.07.2020.
4. Fadeev, A. M., Cherepovitsyn, A. E., Larichkin, F. D. Strategic management of the oil and gas complex in the Arctic: Monograph [*Strategicheskoe upravlenie neftegazovym kompleksom v Arktike: Monografiya*]. Apatity, KSC RAS publ., 2019, 289 p.
5. Podsvetova, T. V. Transport component of the Arctic economy [*Transportnaya sostavlyayushchaya ekonomiki Arktiki*]. *Vestnik MGTU*, 2014, Vol. 17, Iss. 3, pp. 552–555. [Electronic resource]: <https://readera.org/transportnaya-sostavlyayushchaya-ekonomiki-arkitiki-14294723>. Last accessed 24.07.2020.
6. Zagorodnikov, M. A. Investment support of effective year-round shipping along the Northern Sea Transport Trunk Route (SMTM) [*Investitsionnoe obespechenie effektivnogo kruglogodichnogo sudokhodstva po Severnoi morskoi transportnoi magistrali (SMTM)*]. *Gorizonty ekonomiki*, 2018, Iss. 1, pp. 12–19. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32739037>. Last accessed 24.07.2020.
7. Aston, F. Rise of the icebreaker [Arctic Ocean vessels]. *Engineering & Technology*, February 2017, Vol. 12 (1), pp. 48–51. DOI: 10.1049/et.2017.0104.
8. Liu, M., Kronbak, J. The potential economic viability of using the Northern Sea Route as an alternative route between Asia and Europe. *Journal of Transport Geography*, 2010, Iss. 18, pp. 434–444. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.08.004.
9. Schøyen, H., Bråthen, S. The Northern Sea Route versus the Suez Canal: cases from bulk shipping. *Journal of Transport Geography*, 2011, Iss. 19, pp. 977–983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.003>.
10. Verny, J., Grigentin, Ch. Container shipping on the Northern Sea Route. *International Journal of Production Economics*, 2009, Iss. 122, pp. 107–117. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Jerome_Verny/publication/46487269_Container_shipping_on_the_Northern_Sea_Route/links/5bfc2278a6fdcc76e721f355/Container-shipping-on-the-Northern-Sea-Route.pdf. Last accessed 24.07.2020. DOI: 10.1016/j.ijspe.2009.03.018.
11. Abdul Rahman, N. S. F., Saharuddin, A. H., Rasdi, R. Effect of Northern Sea Route opening to the shipping activities at Malacca straits. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 2014, Iss. 1, pp. 85–98. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/414042.pdf>. Last accessed 24.07.2020. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.08.
12. Kiselenko, A. N., Malashchuk, P. A., Sundukov, E. Yu., Fomina, I. V. Scenarios for formation of transport approaches to the Arctic transport system [*Stsenarii formirovaniya transportnykh podkhodov k Arkticheskoi transportnoi sisteme*]. Actual problems, directions and mechanisms of development of production forces of the North-2020: Proceedings of 7th All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) (September 9–11, 2020, Syktyvkar): in 2 parts. Syktyvkar: Komi Republican Printing House LLC, 2020, Part 2, pp. 52–60.
13. Gruzinov, V. M., Zvorykina, Yu. V., Ivanov, G. V. [et al]. Arctic transport trunks on land, water areas and airspace [*Arkticheskie transportnie magistrali na sushe, akvatoriyakh i v vozduzhnom prostranstve*]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, Iss. 1, pp. 6–20. [Electronic resource]: [http://www.ibrae.ac.ru/docs/1\(33\)_2019_Arctic/006_020_%20Arctic_%201\(33\)%202019.pdf](http://www.ibrae.ac.ru/docs/1(33)_2019_Arctic/006_020_%20Arctic_%201(33)%202019.pdf). Last accessed 24.07.2020.
14. Zaikov, K. S., Kondratov, N. A., Kudryashova, E. V., Lipina, S. A., Chistobaev, A. I. Development scenarios for the Arctic region (2020–2035) [*Stsenarii razvitiya Arkticheskogo regiona (2020–2035)*]. *Arktika i Sever*, 2019, Iss. 35, pp. 5–24. [Electronic resource]: http://www.arcticandnorth.ru/upload/iblock/68c/01_Zaikov_i_dr.pdf. Last accessed 24.07.2020.
15. Kiselenko, A. N. Forecasting and planning [*Prognozirovanie i planirovanie*]. Syktyvkar, KRAGS i U, 2003, 87 p.
16. Shvetsova, S. V., Shvetsov, A. V. Safety analysis of goods transportation by unmanned aerial vehicles. *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 5, pp. 286–297. [Electronic resource]: <https://mir.elpub.ru/jour/article/view/1757/2174>. Last accessed 24.07.2020. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-286-297>.
17. Lapidus, B. M. Magnetic levitation is a fundamental basis for ultra-high-speed vacuum-levitation transport technologies [*Magnitnaya levitatsiya – fundamentalnaya osnova sverhskorostnykh vakuumno-levitatsionnykh transportnykh tekhnologii*]. *Transportnie sistemy i tekhnologii*, 2018, Vol. 4, Iss. 3, pp. 26–35. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitnaya-levitatsiya-fundamentalnaya-osnova-dlya-sverhskorostnykh-vakuumno-levitatsionnykh-transportnykh-tehnologiy/pdf>. Last accessed 24.07.2020. DOI: 10.17816/transsyst20184326-35.
18. Sundukov, E. Yu., Tarabukina, N. A. Using two-sided levitation of transport modules relative to the arch overpass [*Ispolzovanie dvukhstoronnei levitatsii transportnykh modulei otnositelno arochnoi estakady*]. *Transportnie sistemy i tekhnologii*, 2019, Vol. 5, Iss. 2, pp. 83–91. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-dvukhstronney-levitatsii-transportnykh-moduley-otnositelno-arochnoy-estakady/pdf>. Last accessed 24.07.2020. DOI: 10.17816/transsyst20195283-91.



МОСТЫ 64

Вероятностный метод проверки технического состояния.

КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ 74

Цифровизация дорожного развития и эксплуатации.



ИНФРАСТРУКТУРА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ 88

Георадарное обследование откосов насыпей.

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ 108

Ресурсосберегающий потенциал низко-потенциальной энергии.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ 118

Использование промышленных датчиков автоматизации для железных дорог.

BRIDGES 69

Probabilistic method for assessing technical condition of bridge structures.



COMPUTER VISION 81

Digitalisation of road development and operation.

RAILWAY INFRASTRUCTURE 98

GPR survey of the embankment slopes.

HEAT SUPPLY 113

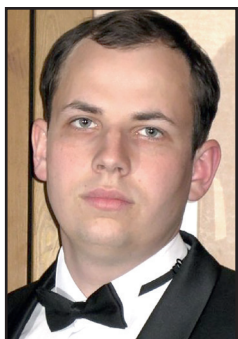
Resource saving capacity of low-grade energy.

INDUSTRIAL IOT 127

Is it possible to use industrial automation sensors for railways?



Риск-ориентированный подход при оценке технического состояния фундаментов мостовых сооружений



Каимов Евгений Витальевич – Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия.*

Евгений КАИМОВ

Целью данной статьи является рассмотрение применения прогнозных математических моделей для оценки рисков, связанных с критической потерей показателей функционального качества несущих конструктивных элементов (фундаментов) мостовых сооружений с применением методов вероятностного анализа и прогноза рисков снижения показателей технического состояния конструктивных элементов.

Результатом исследований является разработка алгоритма и математической модели, характеризующих особенности снижения показателей технического состояния несущих конструкций в течение проектного срока службы. Приведены результаты оценки поте-

ри функционального качества фундаментов, полученные при помощи данной модели.

Практической значимостью исследования является возможность и целесообразность применения вероятностных методов для прогнозной оценки технического состояния несущих конструкций. С помощью соответствующей математической модели становится возможным проектное обоснование показателей функционального качества фундаментов мостовых сооружений.

Показана необходимость совершенствования нормативных положений по проектированию и прогнозу показателей технического состояния объектов транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: транспортное строительство, мостовые сооружения, характеристика технического состояния, анализ рисков, математическая модель фундаментов, физический износ, срок службы.

*Информация об авторе:

Каимов Евгений Витальевич – доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия, evgen-kaimov@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 03.11.2020, принята к публикации 15.01.2021.

For the English text of the article please see p. 69.

В ходе рассмотрения вопроса оценки технического состояния транспортных сооружений отечественными и зарубежными учёными был проделан значительный объём исследований. Так, предложена методика прогнозирования состояния эксплуатируемых мостов с учётом сложности и специфики содержания в городских условиях с использованием аппарата теории надёжности, а также введены и обоснованы параметрические значения функции зависимости состояния сооружения от времени эксплуатации [1], выполнено построение линейной динамической дискретной окрестностной модели процесса износа элементов мостового сооружения [2], проведён анализ опыта ряда стран по внедрению экспертных систем управления состоянием мостовых сооружений на автомобильных дорогах, основанных на базе знаний, закладываемой в процессе разработки и редактируемой при использовании [3].

На железных дорогах предлагается создание региональных центров мониторинга, прогнозирования и обеспечения безопасности сложных технических систем для контроля над их состоянием, накопления статистической информации и формирования баз данных об объектах инфраструктуры, критериях рисков и размерах запаса остаточного ресурса [4].

В работах иностранных исследователей проводится оценка риска прерывания строительной деятельности мостовых объектов с целью выявления основных причин его возникновения, а также определения потенциальных результатов, вытекающих из возникновения риска. Для этого применяются методы анализа дерева неисправностей и дерева событий (ЕТА). Поскольку применение традиционного подхода в рамках этих двух методов во многих случаях затруднено из-за ограниченного доступа к информации, нечёткую арифметику можно рассматривать как полезный инструмент. В одном из исследований структура дерева неисправностей вначале создаётся в соответствии с последствиями, полученными в результате применения метода Delphi. Затем вероятность возникновения риска вычисляется с помощью анализа дерева

неисправностей (FTA) на основе нечёткой логики. Устанавливая структуру дерева отказов, связанную с риском отказа стратегий смягчения последствий, выявляются основные причины, связанные с отказом стратегий. Структура дерева событий создаётся с использованием полученных результатов; кроме того, показывается ожидаемая денежная стоимость (EMV) [5].

Строительство мостовых проектов зачастую начинается в сложных и динамичных условиях, приводящих к высокой неопределённости и риску, которые усугубляются многочисленными ограничениями. Общая методология исследования в значительной степени опирается на опросный лист, заполнение которого различными подрядчиками по строительству мостов и руководителями проектов различных размеров осуществляется по почте или на совещании персонала. Анкета, подготовленная для опроса, составляется путём ознакомления с соответствующей литературой в области управления строительством. Этот подход направлен на выявление факторов риска, влияющих на эффективность мостовых проектов в целом, и их анализ с использованием соответствующих инструментов и методов, а также на разработку системы управления рисками. Анкета в описываемом случае была разделена на семь категорий, по которым всего респондентам было задано 50 вопросов. Ответы были проанализированы с помощью программного обеспечения SPSS. Статистический анализ ответов касательно факторов был разделён на отдельные наборы критических факторов. Это исследование направлено на выявление факторов, повлиявших на проект строительства моста, и учёт тех из них, которые являются критическими, для улучшения анализа рисков. Однако было замечено, что степень их вклада варьируется в зависимости от конкретного уровня эффективности проекта. Предполагалось, что результаты анализа помогут специалистам проекта сосредоточиться на нескольких факторах и получить оптимальные результаты, а не уделять внимание всем факторам и не получать пропорциональные им результаты [6].



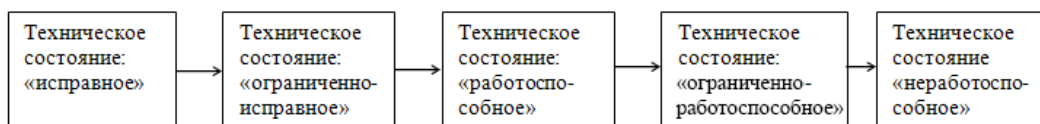


Рис. 1. Модель ухудшения показателей технического состояния (физического износа) фундаментов мостовых сооружений [11; 12].

Риски ухудшения основных функциональных свойств фундаментов мостовых сооружений (формирование и накопление физического износа) отображаются снижением первоначальных (проектных) показателей несущей способности по принятым группам предельных состояний [7; 8].

Для корректного учёта и отображения технического состояния фундаментов предлагается вероятностная модель, которая позволяет на этапе проектирования осуществить прогноз изменения функционального качества рассматриваемых несущих конструкций [9; 10].

Целью настоящей статьи является демонстрация возможности применения математической модели для оценки технического состояния несущих конструкций в течение проектного срока службы посредством использования методов статистической обработки ретроспективных информационных данных о послед-

ствиях проявлений эксплуатационных факторов различной физической природы, математического моделирования процессов и явлений, а также аналитического обзора инженерных решений случайных (вероятностных) задач при неполных исходных данных. За исследуемый критерий принимается показатель физического износа фундамента с точки зрения количественного значения функции последствий проявлений негативных эксплуатационных факторов. Обосновывается применение показателя вероятности наступления неработоспособного технического состояния фундаментов при оценке рисков снижения функционального качества транспортных сооружений.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ

Техническое состояние фундаментов мостовых сооружений может быть отображено посредством математической

Таблица 1

Характеристика принятых технических состояний фундаментов [13; 14]

№ п/п	Название состояния	Обобщённая характеристика технического состояния	Показатель физического износа, (ориентировочно), %
1	Исправное	Объекты исследований (фундаменты) полностью соответствуют проектным параметрам и условиям эксплуатации	0÷3
2	Ограниченно-исправное	Объекты исследований (фундаменты) частично не соответствуют проектным параметрам, но соответствуют условиям эксплуатации	4÷12
3	Работоспособное	Объекты исследований (фундаменты) практически полностью не соответствуют проектным параметрам, но соответствуют хотя бы одному варианту условий эксплуатации	13÷38
4	Ограниченно-работоспособное	Объекты исследований (фундаменты) практически полностью не соответствуют проектным параметрам, а единственный вариант эксплуатации допускается с ограничениями	39÷60
5	Неработоспособное	Объекты исследований (фундаменты) полностью не соответствуют проектным параметрам, требуется немедленная остановка эксплуатации	61÷100

**Вероятность наступления неработоспособного технического состояния фундаментов
(физического износа более чем 60 %) [15; 16]**

Наименование показателя	Значения функции (интенсивности накопления) физического износа							
	0,1	0,08	0,05	0,03	0,01	0,008	0,004	0,001
Срок службы, t лет	50							
Вероятность отказа, P_t	0,17547	0,15629	$6,6801 \cdot 10^{-2}$	$1,4120 \cdot 10^{-2}$	$1,5795 \cdot 10^{-4}$	$5,7201 \cdot 10^{-5}$	$2,1833 \cdot 10^{-6}$	$2,4772 \cdot 10^{-9}$
Срок службы, t лет	100							
Вероятность отказа, P_t	$3,7834 \cdot 10^{-2}$	$9,1604 \cdot 10^{-2}$	0,17547	0,10082	$3,06571 \cdot 10^{-3}$	$1,2270 \cdot 10^{-3}$	$5,7201 \cdot 10^{-5}$	$7,5403 \cdot 10^{-8}$
Срок службы, t лет	150							
Вероятность отказа, P_t	$1,9358 \cdot 10^{-3}$	$1,2741 \cdot 10^{-2}$	0,10938	0,17083	$1,4120 \cdot 10^{-2}$	$6,2456 \cdot 10^{-3}$	$3,5563 \cdot 10^{-4}$	$5,4467 \cdot 10^{-7}$

модели непрерывного однородного процесса Марковского типа (рис. 1).

В табл. 1 приведён качественный и количественный состав показателей, характеризующих каждое из принятых к рассмотрению возможных технических состояний.

Например, значение физического износа, соответствующее неработоспособному техническому состоянию («Состояние 5», табл. 1) конструктивных элементов фундаментов, определяет высокий уровень рисков снижения эффективности и безопасности эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.

Вероятность проявления последствий снижения технического состояния (накопления физического износа) фундаментов в течение установленного (проектного) срока службы t характеризуется аналитической зависимостью вида:

$$P_t = \frac{1}{n!} \cdot (\lambda \cdot t_i)^n \cdot e^{-\lambda \cdot (t_i - t_0)}, \quad (1)$$

где P_t – вероятность наступления неработоспособного технического состояния (отказа) фундаментов;

λ – интенсивность снижения уровня технического состояния (накопления физического износа);

t_0 – количество времени, отводимого на приработку фундаментов (лет);

n – количество видов технических состояний;

t_i – расчётный срок службы (лет).

В табл. 2 представлены расчётные значения вероятности наступления неработоспособного технического состояния (отказа) для некоторых значений интенсивности снижения уровня технического

состояния (накопления физического износа) и проектного срока службы фундаментов мостовых сооружений.

Определение значений параметра λ для конкретных видов фундаментов и условий эксплуатации мостовых сооружений производится с использованием следующих методов:

- аналитического, численного или численно-аналитического моделирования процессов и воздействий;
- корреляционного анализа или экспертных оценок;
- ретроспективного анализа с применением статистических данных о выявленных особенностях эксплуатации, динамике изменения технического состояния (физического износа) фундаментов за некоторый фиксированный период времени;
- перспективного анализа с применением других видов математических (прогнозных) моделей;
- принятия определённого директивного значения показателя, обоснованного техническими, экономическими или иными факторами.

Рациональная область применения каждого из рассмотренных методов зависит от типа решаемой задачи и наличия необходимой для получения результата информационной базы.

Широкий выбор методов определения значений параметра λ , с одной стороны, позволяет оптимизировать процесс выбора наиболее конкретных видов фундаментов и условий эксплуатации фундаментов, но, с другой стороны, нуждается в определённом нормативном регулиро-



вании количественных значений допустимых рисков, связанных с предполагаемым снижением функционального качества несущих конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показатели технического состояния фундаментов мостовых сооружений являются ключевым фактором при оценке рисков снижения эффективности эксплуатации транспортной системы.

Математическая (прогнозная) модель учёта и прогноза снижения показателей функционального качества несущих конструкций может быть использована в качестве обоснования проектных решений по выбору конструктивного решения и срока службы фундаментов мостовых сооружений.

Количественные и качественные значения параметров рисков, полученные в результате проведения анализа, определяют уровень технического состояния фундаментов и возможность обеспечения выполнения функционально-технологических (транспортных) процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белый А. А. Вероятностное прогнозирование технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса // Вестник гражданских инженеров. — 2017 — № 2 (61). — С. 64–74. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29434851>. Доступ 03.11.2020. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-2-64-74.
2. Бондарев Б. А., Седых И. А., Сметанников А. М. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния элементов конструкций проезжей части мостовых сооружений с помощью окрестностных моделей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2018. — Т. 9. — № 4. — С. 47–57. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-transportno-ekspluatatsionnogo-sostoyaniya-elementov-konstruktsiy-proezhney-chasti-mostovykh-sooruzheniy-s-pomoschyu/pdf>. Доступ 03.11.2020.
3. Нигаматова О. И., Овчинников И. Г. Международный опыт применения экспертных систем для оценки состояния мостовых сооружений // Наукоедение. — 2016. — Т. 8. — № 1 (32). [Электронный ресурс]: <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN116.pdf>. Доступ 03.11.2020.
4. Быкова Н. М., Белялов Т. Ш. Подходы к оценке и способам прогнозирования безопасности состояния сложных технических объектов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 4 (48). — С. 113–118. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-i-sposobam-prognozirovaniya-bezopasnosti-sostoyaniya-slozhnykh-tehnicheskikh-obektov/pdf>. Доступ 03.11.2020.

5. Abdollahzadeh, G., Rastgoo, Sima. Risk Assessment in Bridge Construction Projects Using Fault Tree and Event Tree Analysis Methods Based on Fuzzy Logic. ASCE-ASME J. Risk and Uncertainty in Engineering systems, Part B: Mechanical Engineering, 2015, Vol. 1, Iss. 3. [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1115/1.4030779>. Доступ 03.11.2020.

6. Vidiwelli, B., Vidhyasagar, E., Jayasudha, K. Risk Analysis in Bridge Construction Projects. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2017, Vol. 6, Iss. 5. DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0605168.

7. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*: утв. Министерством регионального развития РФ № 822 от 28 декабря 2010 г. — М.: ФАУ «ФЦС», 2010. — 346 с. [Электронный ресурс]: https://nostroy.ru/nostroy_archive/nostroy/443423296-SP%2035.13330.pdf. Доступ 03.11.2020.

8. EN 1992-2. Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 2: Concrete bridges. Design and detailing. Brussel, European Committee for Standardization, 2009, 98 p. [Электронный ресурс]: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.2.2005.pdf>. Доступ 03.11.2020.

9. Melsa, J. L., Sage, A. P. An Introduction to Probability and Stochastic Processes. Courier Corporation, 2013, 416 p. ISBN 0486315959, 9780486315959.

10. Гинис Л. А. Обзор методов научного прогнозирования // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2009. Тематический выпуск. — С. 231–236. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-nauchnogo-prognozirovaniya>. Доступ 03.11.2020.

11. Кельберт М. Я., Сухов М. Ю. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Том 2. Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. — М.: Издательство МЦНМО, 2017. — 560 с. [Электронный ресурс]: <https://11klasov.com/index.php?do=download&id=9346>. Доступ 03.11.2020.

12. Kirkwood, J. R. Markov Processes. New York, CRC Press, 2015, 340 p. [Электронный ресурс]: <https://arxiv.org/pdf/1107.1337v2.pdf>. Доступ 03.11.2020.

13. Шабалина Л. А. Искусственные сооружения. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. — 264 с. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/28515369-Iskusstvennye-sooruzheniya.html>. Доступ 03.11.2020.

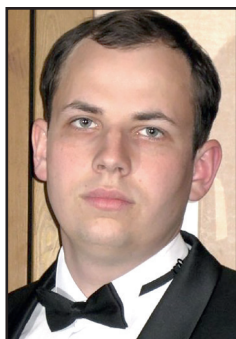
14. Ганиев И. Г. Определение среднего срока службы эксплуатируемых бетонных и железобетонных опор железнодорожных мостов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2008. — № 3. — С. 184–189. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-srednego-sroka-sluzhby-ekspluatiruemyyh-betonnyh-i-zhelezobetonnyh-opor-zheleznodorozhnykh-mostov/pdf>. Доступ 03.11.2020.

15. Алехин В. Н., Ханина А. Б. Внедрение экспертных систем в процесс проектирования строительных конструкций // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2011. — № 2. — С. 84–87. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-ekspertnykh-sistem-v-protsess-proektirovaniya-stroitelnykh-konstruktsiy/pdf>. Доступ 03.11.2020.

16. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. — Москва: ЮНИТИ-Дана, 2002. — 543 с. [Электронный ресурс]: <https://11klasov.com/7824-teoriya-verojatnostej-i-matematicheskaja-statistika-kremer-nsh.html>. Доступ 03.11.2020. ●



Risk-Based Approach in Assessing the Technical Condition of Foundations of Bridge Structures



Kaimov, Evgeny V., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.*

Evgeny V. KAIMOV

ABSTRACT

The objective of this article is to consider the use of predictive mathematical models for assessing risks associated with a critical loss of values of functional quality of bearing structural elements (foundations) of bridge structures using methods of probabilistic analysis and forecasting the risks of reducing of values of indicators of the technical state of structural elements.

The research results in development of an algorithm and a mathematical model that characterise the features of the process of reducing of values of indicators of the technical condition of load-bearing structures during the service life cycle. The

results of assessing the loss of functional quality of foundations obtained using this model are presented.

The practical significance of the study relates to the possibility and expediency of using probabilistic methods for predictive assessment of the technical state of load-bearing structures. With the help of an appropriate mathematical model, it becomes possible to proceed with design rationale of indicators of functional quality of foundations of bridge structures.

The need to improve regulatory provisions for design and forecasting of indicators of the technical condition of transport infrastructure objects is substantiated.

Keywords: *bridge structures, technical condition characteristics, risk analysis, mathematical model of foundations, physical wear, service life.*

*Information about the author:

Kaimov, Evgeny V. – Associate Professor at the Department of Construction of Railways, Bridges and Tunnels of Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, eugen-kaimov@yandex.ru.

Article received 03.11.2020, accepted 15.01.2021.

For the original Russian text of the article please see p. 64.

Domestic and foreign scientists have done a significant amount of research while considering the issue of assessing the technical condition of transport facilities. Thus, a method has been proposed for predicting the state of bridges in operation, considering complexity and specifics of their maintenance in urban conditions using the apparatus of the reliability theory, while parametric values of the function of dependence of the state of the structure on operating time have been also introduced and substantiated [1]. A linear dynamic discrete neighbourhood model of wear process elements of a bridge structure [2], and an analysis of the experience of several countries in implementation of expert systems for managing the condition of bridge structures on highways, based on the knowledge base, laid down in the development process and edited when using [3], have been carried out.

On railways, it is proposed to create regional centres for monitoring, forecasting, and ensuring safety of complex technical systems, to control their condition, accumulate statistical information and form databases on infrastructure facilities, risk criteria and the amount of the residual resource [4].

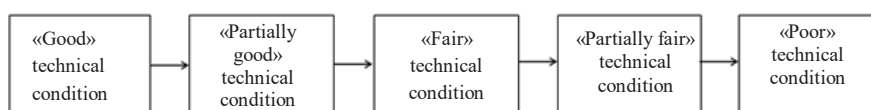
The works of international researchers assess the risk of interruption of construction of bridge objects to identify the main causes

of its occurrence, as well as to determine the potential results arising from the occurrence of the risk. For this, Fault Tree Analysis and Event Tree Analysis (ETA) techniques are used. Since the use of the traditional approach to these two methods is difficult in many cases due to limited access to information, fuzzy arithmetic can be considered as a useful tool. In a study, the fault tree structure is first created according to the implications of the Delphi method. The likelihood of risk occurrence is then calculated using Fault Tree Analysis (FTA) based on fuzzy logic. By establishing the failure tree structure associated with the risk of failure of mitigation strategies, the main reasons associated with failure of strategies are identified. The structure of the event tree is created using the results obtained; in addition, the expected monetary value (EMV) is shown [5].

The implementation of bridge projects starts frequently in a challenging and dynamic environment, resulting in high uncertainty and risk, exacerbated by numerous constraints. The overall research methodology relies heavily on a questionnaire, the responses to it being collected from various bridge contractors and managers of projects of various size by mail or at staff meetings. The questionnaire prepared for the survey is compiled by reviewing the



Illustrative image retrieved from website of KSGroup <http://ksgroup.su/monolitnye-iskusstvennye-sooruzheniya>.



Pic. 1. Model of deterioration of indicators' of technical condition (physical wear) of foundations of bridge structures [11; 12].

Table 1

Characteristics of accepted technical conditions of foundations [13; 14]

No.	Name of condition	Generalized characteristics of technical condition	Indicator of physical wear (approximately), %
1	Good	Research objects (foundations) fully comply with design parameters and operating conditions	0÷3
2	Partially good	Research objects (foundations) partially do not correspond to design parameters, but correspond to operating conditions	4÷12
3	Fair	Research objects (foundations) almost completely do not correspond to design parameters, but correspond to at least one variant of operating conditions	13÷38
4	Partially fair	Research objects (foundations) almost completely do not correspond to design parameters, and the only option for operation is allowed with restrictions	39÷60
5	Poor	Research objects (foundations) do not fully comply with design parameters, an immediate shutdown of operation is required	61÷100

relevant literature in the field of construction management. This approach is aimed at identifying risk factors affecting efficiency of bridge projects in general, and analysing them using appropriate tools and methods, as well as developing a risk management system. The questionnaire in the described case was divided into seven categories, which totalled 50 questions asked to the respondents. The responses were analysed using SPSS software. The statistical analysis of responses regarding factors was divided into separate sets of critical factors. This study aimed to identify the factors that influenced the bridge construction project, and to consider the critical factors to improve risk analysis. However, it has been observed that the degree of their contribution varies depending on the specific level of project performance. It was assumed that the results of the analysis would help the project specialists to focus on several factors and obtain optimal results, rather than to pay attention to all the factors not getting proportional results [6].

Risks of deterioration of basic functional properties of foundations of bridge structures (formation and accumulation of physical wear and tear) are reflected by a decrease in initial (design) values of indicators of the bearing capacity according to the accepted groups of limiting states [7; 8].

For correct accounting and display of the technical state of foundations, a probabilistic model is proposed, which allows at the design stage to predict changes in functional quality of the considered load-bearing structures [9; 10].

The *objective* of this article is to demonstrate the possibility of using a mathematical model to assess the technical state of load-bearing structures during the service life cycle by using *methods* of statistical processing of retrospective information data on consequences of manifestations of operational factors of various physical nature, of mathematical modelling of processes and phenomena, as well as of an analytical review of engineering solutions of random (probabilistic) problems with incomplete initial data. The criterion under study is assumed to be an indicator of physical deterioration of the foundation from the point of view of the quantitative value of the function of consequences of manifestations of negative operational factors. The use of the indicator of

¹ Some of the original terms in Russian version in Pic. 1 and in Table 1 are translated to make them more universal, thus the term «serviceable» condition is translated as «good», «limited serviceable condition» as «partially good», «working condition» as «fair condition», «limited working» condition as «partially fair» condition, and «nonworkable» condition as «poor» condition. — *Translator's note.*



Table 2

The probability of a poor technical condition of foundations
(physical wear, more than 60 %) [15; 16]

Indicator's name	Value of the function (accumulation intensity) of physical wear and tear							
	0,1	0,08	0,05	0,03	0,01	0,008	0,004	0,001
Service life, t years	50							
Failure probability, P_t	0,17547	0,15629	$6,6801 \cdot 10^{-2}$	$1,4120 \cdot 10^{-2}$	$1,5795 \cdot 10^{-4}$	$5,7201 \cdot 10^{-5}$	$2,1833 \cdot 10^{-6}$	$2,4772 \cdot 10^{-9}$
Service life, t years	100							
Failure probability, P_t	$3,7834 \cdot 10^{-2}$	$9,1604 \cdot 10^{-2}$	0,17547	0,10082	$3,06571 \cdot 10^{-3}$	$1,2270 \cdot 10^{-3}$	$5,7201 \cdot 10^{-5}$	$7,5403 \cdot 10^{-8}$
Service life, t years	150							
Failure probability, P_t	$1,9358 \cdot 10^{-3}$	$1,2741 \cdot 10^{-2}$	0,10938	0,17083	$1,4120 \cdot 10^{-2}$	$6,2456 \cdot 10^{-3}$	$3,5563 \cdot 10^{-4}$	$5,4467 \cdot 10^{-7}$

the probability of an inoperative, faulty technical condition of foundations while assessing the risks of decrease in functional quality of transport structures is substantiated.

Probabilistic model of the technical condition of foundations

The technical condition of foundations of bridge structures can be displayed by means of a mathematical model of a continuous homogeneous process of Markov type (Pic. 1).

Table 1 shows the qualitative and quantitative composition of indicators characterizing each of the possible technical conditions accepted for consideration.

For example, the value of physical deterioration corresponding to a poor technical condition («Condition 5», Table 1) of structural elements of foundations identifies a high level of risks of decrease in efficiency and safety of operation of transport infrastructure facilities.

The likelihood of manifestation of the consequences of a decrease in the technical condition (accumulation of physical wear) of foundations during the established (design) service life cycle t is characterized by an analytical dependence of the form:

$$P_t = \frac{1}{n!} \cdot (\lambda \cdot t_i)^n \cdot e^{-\lambda(t_i - t_0)}, \quad (1)$$

where P_t is probability of a poor technical condition (failure) of foundations;

λ is intensity of the decrease in the level of technical condition (accumulation of physical wear and tear);

t_0 is amount of time allotted for running-in of foundations (years);

n is number of types of technical conditions;

t_i is estimated service life (years).

Table 2 shows the calculated values of the probability of the onset of a poor technical condition (failure) for some values of intensity of the decrease in the level of technical condition (accumulation of physical wear) and the design life of foundations of bridge structures.

The identification of values of the parameter λ for specific types of foundations and operating conditions of bridge structures is carried out using the following methods:

- Analytical, numerical, or numerical-analytical modelling of processes and impacts.
- Correlation analysis or expert judgment.
- Retrospective analysis using statistical data on the revealed features of operation, the dynamics of changes in the technical condition (physical wear) of foundations for a certain fixed time period.
- Prospective analysis using other types of mathematical (predictive) models.
- Acceptance of a certain guideline value of the indicator, justified by technical, economic, or other factors.

The rational area of application of each of the methods considered depends on the type of the problem being solved and availability of the data base necessary to obtain the result.

A wide range of methods for determining the values of the parameter λ allows, on the one hand, to optimise the process of choosing the most specific types of foundations and operating conditions of foundations, but, on the other hand, it requires a certain regulation of the quantitative values of permissible risks associated with the expected decrease in the functional quality of load-bearing structures.

Conclusion. Indicators of the technical condition of the foundations of bridge structures constitute a key factor in assessing the risks of decrease in efficiency of the transport system operation.

The mathematical (predictive) model of accounting and forecasting a decrease in indicators of functional quality of load-bearing structures can be used as a rationale for design decisions on the choice of a structural solution and duration of the service life of foundations of bridge structures.

The quantitative and qualitative values of risk parameters obtained as a result of the analysis determine the level of the technical condition of foundations and the possibility of ensuring the performance of functional and technological (transport) processes.

REFERENCES

1. Belyi, A. A. Probabilistic forecasting of the technical condition of the operation of reinforced concrete bridge structures of the megalopolis [*Veroyatnostnoe prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemyykh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy megalopolisa*]. *Bulletin of civil engineers*, 2017, Iss. 2 (61), pp. 64–74 (in Russian). [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29434851>. Last accessed 03.11.2020. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-2-64-74.
2. Bondarev, B. A., Sedykh, I. A., Smetannikov, A. M. Assessment of the transport and operational state of structural elements of the roadway of bridge structures using neighbourhood models [*Otsenka transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya elementov konstruktivnykh proezzhey chasti mostovykh sooruzheniy s pomosh'yu okrestnostnykh modeley*]. *Bulletin of Permian National Research Polytechnic University. Building and architecture*, 2018, Vol. 9, Iss. 4, pp. 47–57 (in Russian). [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-transportno-ekspluatatsionnogo-sostoyaniya-elementov-konstruktivnykh-proezzhey-chasti-mostovykh-sooruzheniy-s-pomoshchyu/pdf>. Last accessed 03.11.2020.
3. Nigmatova, O. I., Ovchinnikov, I. G. International experience in the use of expert systems for assessing the condition of bridge structures [*Mezhdunarodnyi opyt primeneniya ekspertnykh sistem dlya otsenki sostoyaniya mostovykh sooruzheniy*]. *Naukovedenie*, 2016, Vol. 8, No. 1 (32) (in Russian). [Electronic resource]: <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN116.pdf>. Last accessed 03.11.2020.
4. Bykova, N. M., Belyalov, T. Sh. Approaches to assessing and predicting safety of the condition of complex technical objects [*Podkhody k otsenke i sposobam prognozirovaniya bezopasnosti sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov*]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2015, No. 4 (48), pp. 113–118 (in Russian). [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-i-sposobam-prognozirovaniya-bezopasnosti-sostoyaniya-slozhnyh-tekhnicheskikh-obektov/pdf>. Last accessed 03.11.2020.
5. Abdollahzadeh, G., Rastgoo, S. Risk Assessment in Bridge Construction Projects Using Fault Tree and Event Tree Analysis Methods Based on Fuzzy Logic. *ASCE-ASME J. Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 1, Iss. 3. [Electronic resource]: <https://doi.org/10.1115/1.4030779>. Last accessed 03.11.2020.
6. Vidiwelli, B., Vidhyasagar, E., Jayasudha, K. Risk Analysis in Bridge Construction Projects. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2017, Vol. 6, Iss. 5. DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0605168.
7. SP 35.13330.2011. Bridges and culverts. Revised edition of SNiP [Construction norms and rules] 2.05.03-84* [*SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03-84**]. Approved by the Ministry of Regional Development of the Russian Federation No. 822, 28th, December 2010. Moscow, Federal Centre for regulation and standardization publ., 2010, 346 p. [Electronic resource]: https://nostroy.ru/nostroy_archive/nostroy/443423296-SP%2035.13330.pdf. Last accessed 03.11.2020.
8. EN 1992-2. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 2: Concrete bridges. Design and detailing. Brussel, European Committee for Standardization, 2009, 98 p. [Electronic resource]: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.2.2005.pdf>. Last accessed 03.11.2020.
9. Melsa, J. L., Sage, A. P. An Introduction to Probability and Stochastic Processes. Courier Corporation, 2013, 416 p. ISBN 0486315959, 9780486315959.
10. Ginis, L. A. Review of methods of scientific forecasting [*Obzor metodov nauchnogo prognozirovaniya*]. *Bulletin of the Southern Federal University. Technical science*, 2009, Thematic issue, pp. 231–236 (in Russian). [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-nauchnogo-prognozirovaniya>. Last accessed 03.11.2020.
11. Kelbert, M. Ya., Sukhov M. Yu. Probability and statistics in examples and problems. Vol. 2. Markov chains as a starting point of the theory of random processes and their applications [*Veroyatnost' i statistika v primerakh i zadachakh. Tom 2. Markovskiy tepey kak otravnaya tochka teorii sluchaynykh protsessov i ikh prilozheniya*]. Moscow, Publishing house MCNMO, 2017, 560 p. [Electronic resource]: <https://11klasov.com/index.php?do=download&id=9346>. Last accessed 03.11.2020.
12. Kirkwood, J. R. Markov Processes. New York, CRC Press, 2015, 340 p. [Electronic resource]: <https://arxiv.org/pdf/1107.1337v2.pdf>. Last accessed 03.11.2020.
13. Shabalina, L. A. Engineering structures [*Iskusstvennyye sooruzheniya*]. TMC for education on railway transport, 2007, 264 p. [Electronic resource]: <https://docplayer.ru/28515369-Iskusstvennyye-sooruzheniya.html>. Last accessed 03.11.2020.
14. Ganiev, I. G. Determination of the average service life of the operated concrete and reinforced concrete supports of railway bridges [*Opreделение srednego sroka sluzhby ekspluatiruemyykh betonnykh i zhelezobetonnykh opor zheleznodorozhnykh mostov*]. *Bulletin of Petersburg State Transport University*, 2008, No. 3, pp. 184–189 (in Russian). [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-srednego-sroka-sluzhby-ekspluatiruemyykh-betonnykh-i-zhelezobetonnykh-opor-zheleznodorozhnykh-mostov/pdf>. Last accessed 03.11.2020.
15. Alekhin, V. N., Khanina, A. B. Implementation of expert systems in design of building structures [*Vnedreniye ekspertnykh sistem v protsess proyektirovaniya stroitel'nykh konstruktivnykh sistem*]. *Academic Bulletin UralNIIProekt RASN*, 2011, Iss. 2, pp. 84–87 (in Russian). [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-ekspertnykh-sistem-v-protsess-proyektirovaniya-stroitelnykh-konstruktivnykh-sistem/pdf>. Last accessed 03.11.2020.
16. Kremer, N. Sh. Theory of Probability and Mathematical Statistics [*Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika*]. Moscow, YUNITY-Dana publ., 2002, 543 p. [Electronic resource]: <https://11klasov.com/7824-teoriya-veroyatnostey-i-matematicheskaya-statistika-kremer-nsh.html>. Last accessed 03.11.2020.





Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения



Чебыкин Иван Андреевич — ООО «ТраффикДэйта», Пермь, Россия.*

Иван ЧЕБЫКИН

Целью статьи является описание практического применения технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта для решения задач проектирования дорожной инфраструктуры.

В статье методом сравнительного анализа оцениваются традиционные способы количественного и качественного анализа транспортных потоков по показателям трудоёмкости и точности, указаны преимущества и недостатки рассмотренных способов. Предложен новый метод анализа транспортного потока, основанный на применении беспилотных летательных аппаратов и технологии компьютерного зрения на базе свёрточных нейронных сетей. Рассмотренный метод позволяет полностью автоматизировать сбор и анализ данных о транспортных потоках. В статье описывается первое применение предложенного метода при выполнении транспортно-экономических изысканий в рамках проектирования объекта «Северный обход г. Перми». Описаны преимущества применённого метода по отношению к традиционным. Для реализации данного проекта было разработано программное обеспечение для анализа транспортных потоков по видеоматериалам.

В статье рассматривается мониторинг дорожного движения, описаны его цели, задачи, указан необходимый функционал системы автоматизации мониторинга дорожного движения, перечислены параметры дорожного движения, которые она должна определять. Рассматривается методология реализации автоматизированной системы мониторинга дорожного движения по видеоматериалам на одном участке дороги.

Представлен проект системы мониторинга дорожного движения, позволяющий расширить рассмотренный ранее подход на всю улично-дорожную сеть. Описаны технологии, позволяющие реализовать данную систему на основе видеоаналитики материалов с камер видеонаблюдения. Предложен метод реидентификации автомобиля, продемонстрирована реализация данного метода. Метод позволяет строить матрицу корреспонденции автомобилей, зафиксированных на камерах видеонаблюдения, расположенных на разных участках дорожной сети, а также определять все параметры дорожного движения для всей УДС.

В выводах обозначаются перспективы развития разработанного программного обеспечения с точки зрения применения в интеллектуальных транспортных системах.

Ключевые слова: дорожное движение, мониторинг, данные о транспортном потоке, транспортное моделирование, транспортно-экономические изыскания, компьютерное зрение, искусственный интеллект, видеоаналитика, параметры дорожного движения, интеллектуальные транспортные системы.

*Информация об авторе:

Чебыкин Иван Андреевич – инженер-проектировщик транспортных сооружений, генеральный директор ООО «ТраффикДэйта», Пермь, Россия, info@trafficdata.ru.

Статья поступила в редакцию 22.03.2020, актуализирована 27.08.2020, принята к публикации 28.08.2020.

For the English text of the article please see p. 81.

В данной статье ставится *цель* рассмотреть возможности, которые могут предоставить для транспортной отрасли технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта. Впервые в России транспортно-экономические изыскания были выполнены с применением искусственного интеллекта в рамках проектирования объекта «Северный обход г. Перми», выполняемого ОАО «Институт Гипростроймост». Учёт интенсивности движения осуществлялся посредством видеосъёмки с беспилотного летательного аппарата и последующего анализа видеоматериалов с помощью программного комплекса TrafficData по методологии транспортных исследований.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УЧЁТА ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Достаточно подробно провёл анализ «современных» методов учёта интенсивности движения профессор МАДИ М. Р. Якимов в своей монографии [1]. На примере исследований, проводимых в Перми, профессор Якимов рассмотрел три основных способа, применяемых на практике:

1. Ручной способ — непосредственный сбор данных производится учётчиками. «Это специально обученные люди, которые стоят на перекрёстках в течение дня и проводят замеры интенсивности движения с различных направлений».

2. Полуавтоматический — сбор информации осуществляется с помощью видеоборудования, которое позволяет производить видеосъёмку на всём обследуемом перекрёстке, а обработка собранной информации производится вручную.

3. Автоматический — с помощью детекторов учёта транспорта, способ актуален для участков улично-дорожной сети, где установлено оборудование.

Способы оценивались по следующим показателям:

- единовременные затраты;
- текущие затраты;
- временные затраты на сбор/обработку информации;
- оценка качества собранных данных.

Метод сравнительного анализа показал, что наиболее затратным, с финансовой точки зрения, является третий способ, так как он требует установки датчиков под

каждую полосу движения. Соответственно первый способ является наименее затратным. На обработку собранных материалов по первому способу был потрачен один час, по второму способу — три часа, по третьему — 15 мин. Самым точным является второй способ, так как он позволяет производить подсчёт автомобилей с видеозаписи несколько раз, что исключает фактор человеческой ошибки. Поэтому полуавтоматический способ был принят за эталонный. При сравнении с эталоном первый способ показал относительные отклонения от 3 до 33,5 %, третий — от 7 до 57 %. Такие погрешности третьего способа вызваны неточностями при считывании информации и несовершенством устройств, имеющих в распоряжении исследователей.

Таким образом, сравнительный анализ показал, что для получения исходной информации для единичных перекрёстков необходимо использовать полуавтоматический способ сбора информации. Если использование полуавтоматического способа сбора информации невозможно на исследуемом перекрёстке, то целесообразно использовать натурный способ сбора данных. Сбор данных с использованием датчиков учёта транспорта показал достоверность получаемых данных, погрешности составляют более 20 %.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

С приходом в нашу жизнь квадрокоптеров способ с видеофиксацией стал ещё более актуальным, так как теперь мы не привязаны к местам, где установлены камеры наблюдения за дорожной обстановкой, и можем охватывать перекрёсток целиком, что позволяет одновременно фиксировать движение автомобилей по всем направлениям. Однако статистический анализ затрат на аналогичные задачи показал, что обработка таких видеоматериалов представляет определённую сложность. Например, определить интенсивность движения в каждом из девяти направлений на круговой развязке в створе улицы генерала Буткова (г. Калининград) оказалось достаточно трудно.

Развитие технологий компьютерного зрения и машинного обучения позволило авто-





Рис. 1. Съёмка кругового пересечения с квадрокоптера (предоставлено ОАО «Институт Гипростроймост»).

матерализовать данную задачу. Построенный на базе новейших архитектур свёрточных сетей разработанный программный комплекс дал возможность довести полуавтоматический способ, описанный М. Р. Якимовым, до полностью автоматизированного. В очередной раз искусственный интеллект избавил человека от рутинного утомительного труда.

С его помощью существенно снижаются трудозатраты на сбор данных о транспортных потоках для перекрёстка, участка дороги. В результате чего в рамках обычных транспортно-экономических изысканий методом простого математического анализа удалось вывести реальное распределение интенсивности движения в течение всего дня. Теперь нет необходимости пользоваться коэффициентами неравномерности для определения среднесуточной интенсивности, приведёнными в [2]. Известно, что данные коэффициенты определены на основе замеров, выполненных на МКАД с помощью датчиков [3]. По существу, эти данные являются частным случаем и не могут использоваться повсеместно.

Таким образом автоматизируется сбор данных на перекрёстке или на участке дороги *методом анализа видеоизображений с помощью компьютерного зрения*, например, с целью оптимизации транспортных потоков по методу *математического моделирования*.

В России, в рамках осуществления государственной программы «Безопасные и качественные дороги» Министерство транспорта Российской Федерации утвердило приказы о необходимости выполнения мониторинга дорожного движения [4; 5]. Для реализации этих мероприятий

в объёмах страны необходимо автоматизировать макроисследования.

Аналогичные системы начали появляться и за рубежом, особенно в Европе и Северной Америке, где регулярно проводится мониторинг дорожного движения по основным транспортным артериям агломераций, а также в городах. Яркими примерами являются продукты таких компаний, как DataFromSky (Чехия), GoodVision (Великобритания), Miovision (Канада).

МОНИТОРИНГ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Для начала сформулируем цели мониторинга дорожного движения. В России, в соответствии с анализом документов [4; 5], цели следующие:

- оценить текущее качество организации дорожного движения;
- определить приоритетные мероприятия повышения качества организации дорожного движения дорожной сети;
- оценить эффективность мероприятий, предпринятых для повышения качества организации дорожного движения.

Для достижения этих целей необходимо, чтобы система мониторинга дорожного движения (СМДД) могла решать следующие задачи:

- определять параметры дорожного движения;
- накапливать данные о параметрах движения;
- формировать отчёты об изменениях параметров движения в наглядном виде.

Речь идёт о параметрах дорожного движения, указанных в [2; 5] и изображённых на рис. 2.

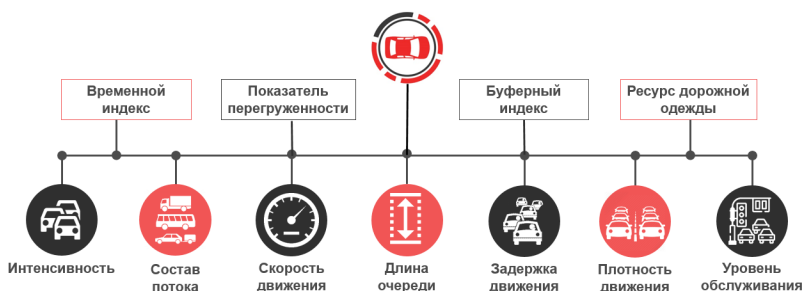


Рис. 2. Параметры дорожного движения (выполнено автором).

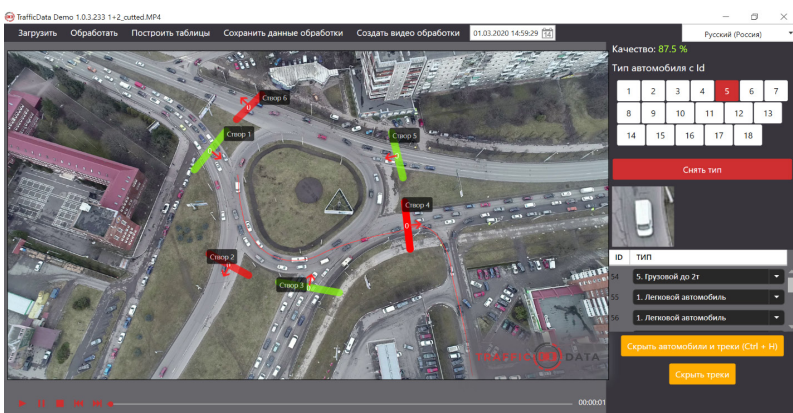


Рис. 3. Расстановка створов на видео в интерфейсе (предоставлено автором).

Для решения описанных выше задач систематизированы и адаптированы к автоматизированной реализации указанные приказы Министерства транспорта Российской Федерации и сформулирована методика автоматизации мониторинга дорожного движения. Также на базе этой методики был разработан проект организации СМДД, который позволяет определять все параметры движения для оценки качества дорожного движения не только на каждом участке дороги (перекрёстке, между перекрёстками), но и на всей трассе, или сети дорог в режиме 24/7.

Для того чтобы решать поставленные задачи, СМДД должна обладать следующим функционалом:

- круглосуточно выполнять видеосъёмку дорожной сети;
- обрабатывать видеоматериалы в поточном режиме со скоростью выше, чем видео поступают;
- считывать регистрационные номера автомобилей;
- определять параметры движения;
- формировать базу параметров движения по всем участкам дороги на весь период наблюдения;

- обеспечивать работу с базой данных (осреднение, фильтрация, вывод отчётов).

Рассмотрим, как этот функционал реализован в разработанном программном комплексе.

Интенсивность потока

Интенсивность движения определяется по направлениям. Направления задаются створами, указываемыми пользователем на видео (рис. 3). Доступны три типа створов: входной, выходной и сквозной.

Состав потока

Качественный анализ транспортного потока, поддерживаемый в разработанной программе, учитывает требования как приказа Министерства транспорта Российской Федерации [5], так и нормативов [6] — для загородных дорог, [7] — для городских дорог. Таким образом, наш программный комплекс распознаёт 21 тип транспортных средств и пешеходов.

Скорость движения

- По видеоизображению определяются:
- мгновенная скорость в каждой точке траектории;



Описание детектируемых участников дорожного движения
(из отчёта по обработке видео, генерируемого программным комплексом)

Сокращение	Расшифровка
1. Легковой автомобиль	1. Легковой автомобиль
2. Микроавтобус	2. Микроавтобус
3. Мотоцикл и мопед	3. Мотоцикл и мопед
4. Велосипед	4. Велосипед
5. Небольшой грузовик (фургон)	5. Небольшой грузовик (фургон)
6. 2-о грузовик 2–6 т	6. Двухосный грузовой автомобиль 2–6 т
7. 2-о грузовик 6–8 т	7. Двухосный грузовой автомобиль 6–8 т
8. 3-о грузовик 8–14 т	8. Трёхосный грузовой автомобиль 8–14 т
9. 3-о грузовик > 14 т	9. Трёхосный грузовой автомобиль более 14 т
10. 4-о грузовик	10. Четырёхосный грузовой автомобиль
11. 4-о а-поезд (2-о гр + п)	11. Четырёхосный автопоезд (двухосный грузовой автомобиль с прицепом)
12. 5-о а-поезд (3-о гр + п)	12. Пятиосный автопоезд (трёхосный грузовой автомобиль с прицепом)
13. 3-о сед. а-поезд (2-о сед. т + пп)	13. Трёхосный седельный автопоезд (двухосный седельный тягач с полуприцепом)
14. 4-о сед. а-поезд (2-о сед. т + пп)	14. Четырёхосный седельный автопоезд (двухосный седельный тягач с полуприцепом)
15. 5-о сед. а-поезд (3-о сед. т + пп)	15. Пятиосный седельный автопоезд (трёхосный седельный тягач с полуприцепом)
16. 5-о сед. а-поезд (2-о сед. т + пп)	16. Пятиосный седельный автопоезд (двухосный седельный тягач с полуприцепом)
17. 6-о сед. а-поезд	17. Шестиосный седельный автопоезд, автобус особо большого класса
18. Автомобиль с >= 7 осями	18. Автомобиль с семью и более осями
19. Автобус малой вместимости	19. Автобус малой вместимости
20. Автобус средней вместимости	20. Автобус средней вместимости
21. Автобус большой вместимости	21. Автобус большой вместимости
22. Троллейбус	22. Троллейбус
23. Сочленённый автобус / троллейбус	23. Сочленённый автобус и сочленённый троллейбус
24. Пешеходы	24. Пешеходы

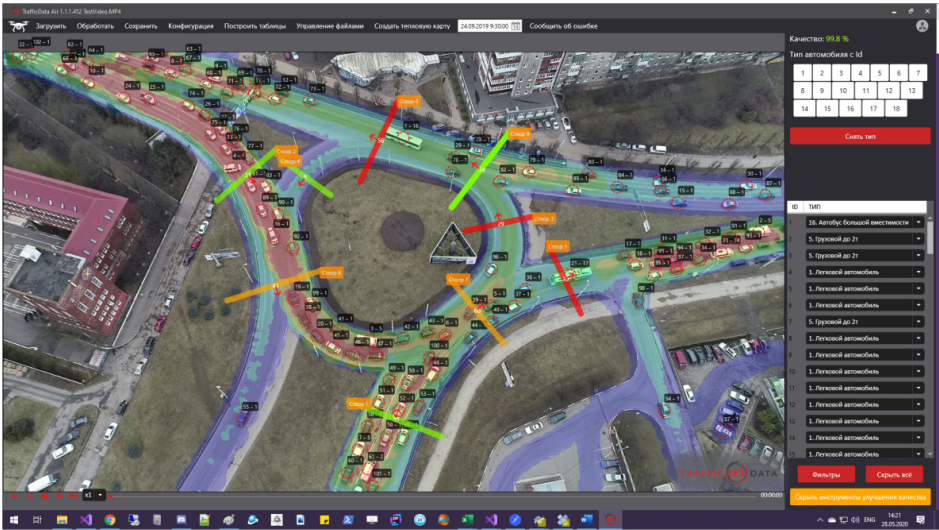


Рис. 4. Тепловая карта распределения скоростей движения по участку дороги (предоставлено автором).

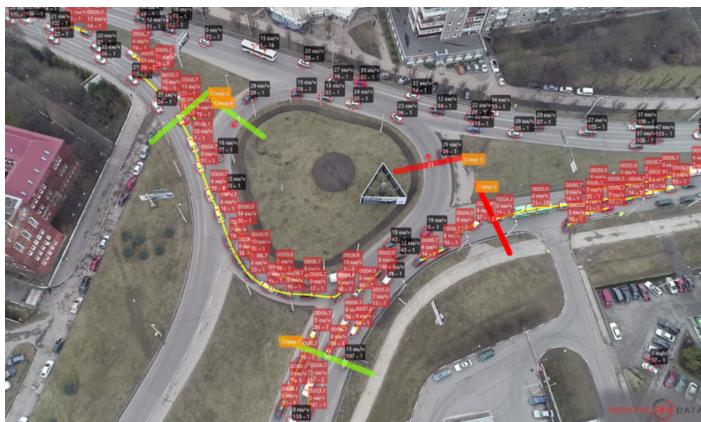


Рис. 5. Скриншот визуализации формирования очередей на перекрёстке (автомобили, попавшие в очередь, объединены жёлтыми (светлыми) линиями, ярлычки сменяют цвет с чёрного на красный, отображается время, проведённое в очереди).



Рис. 6. Детекция номеров (слева) и анализ потока автомобилей по видеоизображению (справа). (Данные номерного знака в публикации заретушированы).

- средняя скорость на участке между створами;
- скорость с 85 %, 95 % обеспеченностью.

Для наглядного отображения распределения скоростей движения на перекрёстке доступна тепловая карта.

Плотность движения

Плотность движения для участка дороги определяется по формуле:

$$\rho = \frac{1}{\bar{I} \cdot \bar{V}}, \text{ автомобилей, приведённых}$$

к легковому, на километр, где $\bar{I}$ — средний временной интервал между приведёнными автомобилями;

$\bar{V}$ — средняя скорость движения транспортных средств на участке дороги.

Длина очереди

Разработанный программный комплекс позволяет по видеоизображению определить длину очереди и время, проведённое

автомобилем в очереди по рассматриваемому направлению, а также время стоянки. Критерием попадания автомобиля в очередь является расстояние между автомобилями в свету не более 5 м.

Задержка в движении

Для определения времени задержки движения вначале необходимо определить время преодоления участка дороги при свободном движении. Критерий свободного движения задаётся пользователем как минимальный интервал между автомобилями при скорости движения более порогового значения. В случае, если нет данных по свободному движению, то они определяются через максимально разрешённую скорость на участке дороги.

Далее на основе собранных видеоданных определяются вычисляемые параметры движения:

- уровень обслуживания;
- показатель перегруженности;





- временной индекс;
- буферный индекс.

По запросу результаты анализа выводятся в MS Excel.

ПРОЕКТ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ (СМДД)

Был разработан проект СМДД для трассы 1500 км, которая разделена на 300 участков. Вход и выход каждого участка оснащается камерами. Система ведёт мониторинг дорожного движения 24/7 полностью автоматически, закрывая все требования документов [4; 5].

Для реализации данного проекта были объединены две технологии: распознавание номеров и детекция автомобилей по видеоизображению.

Это позволило: во-первых, строить матрицу корреспонденции, наблюдая автомобиль с разных камер, т.е. по всей сети дорог, оснащённой СМДД; во-вторых, получать все необходимые данные об автомобиле по видеоизображению без подключения к базе данных ГИБДД, что решило вопрос с персональными данными.

При этом, проведя глубокую оптимизацию алгоритмов компьютерного зрения, удалось настолько снизить системные требования, что это позволило управлять сетью из 100 камер всего одним сервером в потоковом режиме. Общая стоимость системы составила всего 100 тыс. руб./км.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Потребность в данных о транспортном потоке настолько созрела, что есть готовность выставлять по человеку на каждые 300 м дороги для их сбора [4]. При этом качество таких данных оставляет желать лучшего [1]. С помощью СМДД, которой создатели комплекса предлагают оснастить сеть обследуемых дорог, эти данные можно получать каждые пять минут с точностью 95 %.

Для того чтобы управлять каким-то процессом, необходимо обладать данными о нём. Только регулярно собирая полные и достоверные данные о дорожном движении, мы сможем перейти к созданию ИТС. Для решения задачи сбора данных и был создан описанный программный комплекс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якимов. М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: Монография. — М.: Логос, 2013. — 188 с. [Электронный ресурс]: <http://simulation.su/uploads/files/default/2013-yakimova-monography-1.pdf>. Доступ 03.11.2020.
2. ОДМ 218.2.020-2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200092512>. Доступ 03.11.2020.
3. Менделев Г. А. Закономерности изменения во времени интенсивности городского автомобильного движения / Дис... канд. техн. наук. — 2001. — 164 с. [Электронный ресурс]: <https://www.dissercat.com/content/zakonomenosti-izmeneniya-vo-vremeni-intensivnosti-gorodskogo-avtomobilnogo-dvizheniya>. Доступ 03.11.2020.
4. Приказ Минтранса РФ от 18 апреля 2019 г. № 114 «Об утверждении порядка мониторинга дорожного движения». [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72171658/>. Доступ 03.11.2020.
5. Приказ Минтранса РФ от 26 декабря 2018 г. № 479 «Об утверждении методических рекомендаций по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения в части расчёта значений основных параметров дорожного движения». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/552196818>. Доступ 03.11.2020.
6. СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200095524>. Доступ 03.11.2020.
7. СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населённых пунктов. Правила градостроительного проектирования». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/552304870>. Доступ 03.11.2020.
8. ВСН 42-87 «Инструкция по проведению экономических изысканий для проектирования автомобильных дорог». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200006881>. Доступ 03.11.2020.
9. Минтранс РФ, «Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях», 2017 г. [Электронный ресурс]: <https://mintrans.gov.ru/file/404210>. Доступ 03.11.2020.
10. ОДМ 218.6.003-2011 «Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200098292>. Доступ 03.11.2020.
11. Распоряжение Минтранса РФ от 25 марта 2020 г. «Об утверждении Методики оценки и ранжирования локальных проектов в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/564654235>. Доступ 03.11.2020.
12. Джафаров Р. М. Исследование скоростей движения на транспортных развязках с направленными съездами // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2020. — № 2 (92). — С. 7–9. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825363>. Доступ 03.11.2020.
13. Джафаров Р. М. Расчёт скоростей движения при разработке планировочных решений транспортных развязок с направленными съездами // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2020. — № 2 (92). — С. 13–16. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825365>. Доступ 03.11.2020.



Automating Road Traffic Monitoring Using Computer Vision



Chebykin, Ivan A., LLC TrafficData, Perm, Russia.*

Ivan A. CHEBYKIN

ABSTRACT

The objective of the article is to describe application of computer vision and artificial intelligence technologies for solving the problems of road infrastructure design.

The article evaluates the traditional methods of quantitative and qualitative analysis of traffic flows in terms of labour intensity and accuracy using the method of comparative analysis, the advantages and disadvantages of the considered methods are indicated. A new method of traffic flow analysis using unmanned aerial vehicles and computer vision technology based on convolutional neural networks is proposed. The considered method makes it possible to fully automate collection and analysis of data on traffic flows. The article describes the first application of the proposed method when performing transport and economic surveys within the framework of the design of «Northern bypass of the city of Perm». The advantages of the applied method in relation to the traditional ones are described. To implement this project, software was developed for analysing traffic flows using video materials.

Further, traffic monitoring is considered, its goals and objectives are described, the necessary functionality of the road traffic monitoring automation system is indicated, the traffic parameters that it should determine are listed. The methodology for implementation of an automated traffic monitoring system based on video materials on a section of the road is considered.

A presented project of a traffic monitoring system makes it possible to extend the previously considered approach to the entire road network. Technologies are described that make it possible to implement this system based on video analytics of materials from CCTV cameras. A method for vehicle re-identification is proposed, and the implementation of this method is demonstrated. The method allows building a correspondence matrix of vehicles recorded by CCTV cameras located on different segments of the road network, as well as determining all traffic parameters for the entire street and road network.

The conclusions outline the prospects for development of the developed software in terms of application in intelligent transport systems.

Keywords: road traffic, monitoring, traffic data, traffic modelling, transport and economic research, computer vision, artificial intelligence, video analytics, traffic parameters, intelligent transport systems.

*Information about the author:

Chebykin, Ivan A. – Engineer-designer of transport facilities, General Director of LLC TrafficData, Perm, Russia, info@trafficdata.ru.

Article received 22.03.2020, revised 27.08.2020, accepted 28.08.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 74.

The objective of the article is to consider the opportunities that computer vision and artificial intelligence technologies can provide for the transport industry. For the first time in Russia, transport and economic surveys were carried out using artificial intelligence, as part of the design of «Northern Bypass of the city of Perm», carried out by JSC Giprostroymost Institute. Traffic intensity was recorded through video filming from an unmanned aerial vehicle and subsequent analysis of video materials using TrafficData software package according to the methodology of transport research.

Modern methods of recording of traffic intensity

Professor of MADI [Moscow automobile and road construction state technical university] M. R. Yakimov analysed in detail the «modern» methods of accounting for traffic intensity in his monograph [1]. At the example of research carried out in Perm, professor Yakimov considered three main methods used in practice:

1. Manual method: direct data collection is performed by the accountants. «These are specially trained people who stand at intersections during the day and measure traffic from different directions».

2. Semi-automatic method: data collection is carried out using video equipment, which allows video filming at the entire surveyed intersection, and the collected information is processed manually.

3. Automatic method: with the help of transport accounting detectors. The method is relevant for the sections of the road network where the equipment is installed.

The methods were evaluated according to the following indicators:

- One-time costs.
- Current costs.
- Time costs for collection/processing of information.
- Assessment of quality of data collected.

The method of comparative analysis has shown that the third method is the costliest from a financial point of view, since it requires installation of sensors for each lane. Accordingly, the first method is the least expensive. An hour was spent on processing the collected materials according to the first method, three hours were spent according to the second method, and 15

minutes were spent according to the third method. The second method is the most accurate, because it allows to count and re-count cars from video recording several times, which eliminates the factor of human error. Therefore, the semi-automatic method was taken as a reference. When compared with the standard, the first method showed relative deviations from 3 to 33,5 %, the third – from 7 to 57 %. Such errors of the third method are caused by inaccuracies in reading information and imperfection of the devices available to researchers.

Hence, comparative analysis has shown that to obtain initial information for single intersections, it is necessary to use a semi-automatic method of collecting information. If the use of a semi-automatic method of collecting information is impossible at the intersection under study, then it is advisable to use a natural method of collecting data. Data collection with the use of transport metering sensors showed unreliability of data received, the errors are more than 20 %.

Experience of application of computer vision technology and artificial intelligence

With the advent of quadcopters in our life, the method of video recording has become even more relevant, since now we are not tied to the places where cameras for monitoring traffic conditions are installed and can cover the entire intersection, which allows us to simultaneously record movement of cars in all directions. However, statistical analysis of the costs of similar tasks has shown that processing of such video materials presents a certain complexity. For example, it turned out to be rather difficult to determine the traffic intensity in each of the nine directions at the roundabout in the gate of General Butkov Street (Kaliningrad) shown in Pic. 1.

The development of computer vision and machine learning technologies has made it possible to automate this task. The developed software, built based on the latest convolutional network architectures, made it possible to bring the semi-automatic method described by M. R. Yakimov to a fully automated one. Once again, artificial intelligence has made it possible to save a person from routine tedious work.

With its help, labour costs for collecting data on traffic flows at an intersection or on



Pic. 1. Surveying a circular intersection from a quadcopter (provided by JSC Giprostroymost Institute).

a road section are significantly reduced. As a result, within the framework of ordinary transport and economic surveys, using the method of simple mathematical analysis, it was possible to deduce real distribution of traffic intensity throughout the day. Now there is no need to use the coefficients of unevenness to determine the average daily intensity given in [2]. It is known that these coefficients are determined based on measurements made on Moscow Ring Road using sensors [3]. Essentially, this data constitute a particular case and cannot be used universally.

In this way, data collection at an intersection or road section is automated by *analysing video images using computer vision*, for example, in order to optimise traffic flows using the method of *mathematical modelling*.

In Russia as part of implementation of the state program «Safe and High-Quality Highways», the Ministry of Transport of the Russian Federation approved orders on the need to monitor road traffic [4; 5]. To implement these activities in the country, it is necessary to automate macro-research.

Similar systems have recently appeared abroad, especially in Europe and North America, where traffic monitoring is regularly carried out along the main transport arteries of agglomerations, as well as in cities. The products of such companies as DataFromSky (Czech Republic), GoodVision (Great Britain), Miovision (Canada), etc. are excellent examples there-of.

Road traffic monitoring

To begin with, let us formulate the goals of traffic monitoring. In Russia in conformity with the analysis of the documents [4; 5] they are as follow:

- To assess the current quality of traffic management.
- To determine priority measures to improve quality of traffic management of the road network.
- To evaluate the effectiveness of measures taken to improve quality of traffic management.

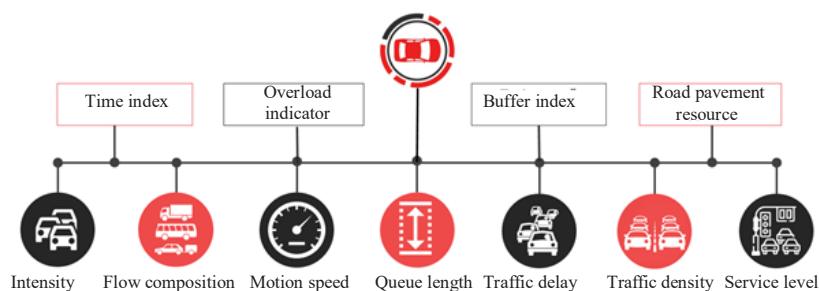
To achieve these goals, it is necessary that the road traffic monitoring system (RTMS) could solve the following tasks:

- To identify the parameters of road traffic.
- To accumulate data on traffic parameters.
- To generate reports on changes in traffic parameters in a visualised form.

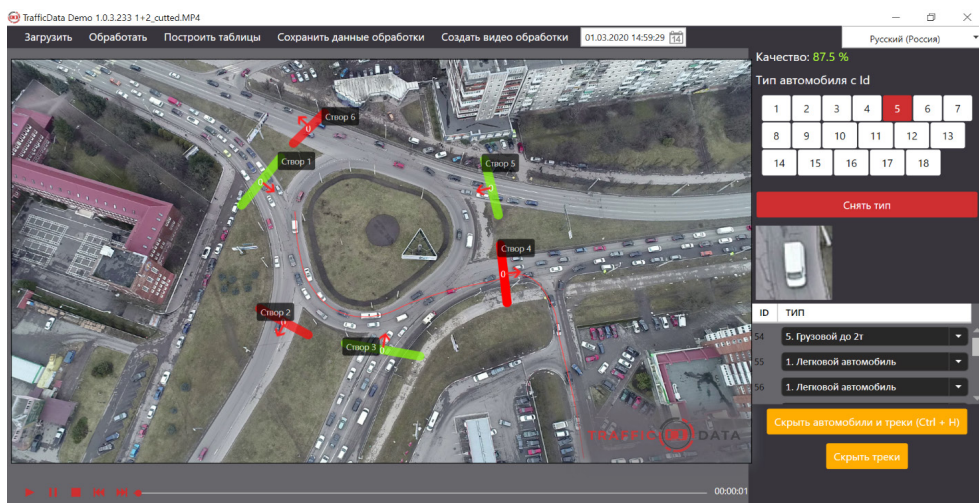
So, we are talking about the parameters of the road traffic specified in [2; 5] and shown in Pic. 2.

To solve the problems described above, the cited orders of the Ministry of transport of Russian Federation were systemised and adapted to automated implementation, and a methodology for automating traffic monitoring was developed. Also, based on this methodology, a project for the organization of RTMS was developed, which allows determining all traffic parameters to assess quality of traffic not only on each section of the road (intersection, between intersections), but also on the entire highway, or road network in 24/7 mode.





Pic. 2. Road traffic parameters (author's drawing).



Pic. 3. Arrangement of gates on video using the interface (provided by the author).

To solve the assigned tasks, RTMS must have the following functionality:

- Video filming of the road network around the clock.
- Processing video materials in streaming mode at a speed higher than the incoming video.
- Reading of license plates of vehicles.
- Identifying of traffic parameters.
- Development of a data base of traffic parameters for all road sections and for the entire observation period.
- Ensuring work with database (averaging, filtering, development of reports).

Let us see how this functionality is implemented in the developed software system.

Flow intensity

Traffic intensity is determined according to directions. The directions are set by the gates indicated by the user in the video (Pic. 3). There are three types of gates: entrance, exit and through ones.

Flow composition

The qualitative analysis of traffic flow, supported in the developed software considers the requirements of both the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation [5] and the standards for suburban roads [6] and for urban roads [7]. Thus, our software complex recognizes 21 types of vehicles and pedestrians.

Motion speed

By video image it is possible to determine:

- Instantaneous speed at each point of the trajectory.

- Average speed in the section between gates.

- Speed detection capacity ensured with 85 %, 95 % rate.

A heat map is available for visual display of distribution of motion speeds at the intersection.

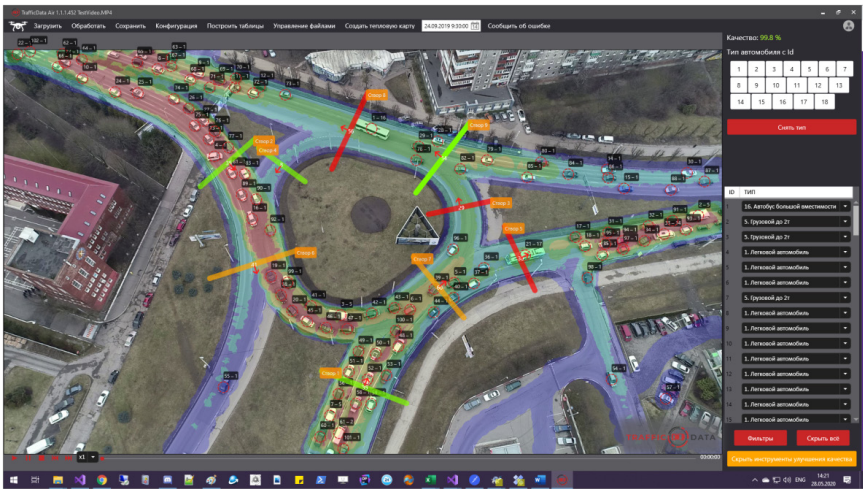
Traffic density

Traffic density for a road section is determined according to the formulae:

Table 1

Description of detected road users (from the video processing report generated by the software complex)

Abbreviation	Explanation
1. Passenger car	1. Passenger car
2. Minibus	2. Minibus
3. Motorcycle and moped	3. Motorcycle and moped
4. Bicycle	4. Bicycle
5. Small truck (van)	5. Small truck (van)
6. 2-a truck 2–6 t	6. Two-axle truck of 2–6 t
7. 2-a truck 6–8 t	7. Two-axle truck of 6–8 t
8. 3-a truck 8–14 t	8. Three-axle truck of 8–14 t
9. 3-a truck > 14 t	9. Three-axle truck over 14 t
10. 4-a truck	10. Four-axle truck
11. 4-a r-train (2-a truck + t)	11. Four-axle road train (two-axle truck with a trailer)
12. 5-a r-train (3-a truck + t)	12. Five-axle road train (three-axle truck with a trailer)
13. 3-a sem. r-train (2-a sem. t + st)	13. Three-axle semitrailer road train (two-axle semitrailer tractor)
14. 4-a sem. r-train (2-a sem.t + st)	14. Four-axle semitrailer road train (two-axle semitrailer tractor)
15. 5-a sem. r-train (3-a sem.t + st)	15. Five-axle semitrailer road train (three-axle semitrailer tractor)
16. 5-a sem. r-train (2-a sem. t + st)	16. Five-axle semitrailer road train (two-axle semitrailer tractor)
17. 6-a sem. r-train	17. Six-axle semitrailer road train, extra large bus
18. Car with >= 7 axes	18. Car with seven or more axes
19. Bus of small capacity	19. Bus of small capacity
20. Bus of average capacity	20. Bus of average capacity
21. Bus of large capacity	21. Bus of large capacity
22. Trolleybus	22. Trolleybus
23. Articulated bus/trolleybus	23. Articulated bus and articulated trolleybus
24. Pedestrians	24. Pedestrians



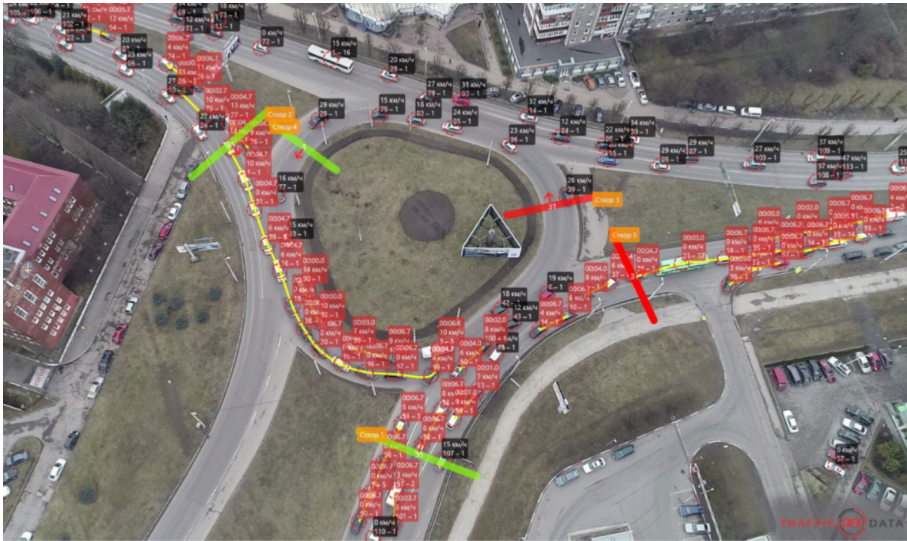
Pic. 4. Heat map of distribution of motion speeds on the road section (provided by the author).

$\rho = \frac{1}{l \cdot \bar{V}}$, cars, normalized to passenger cars,
per kilometre,
where $\bar{l}$ is average time interval between
normalized cars, and $\bar{V}$ is average motion speed
of vehicles at the road section.

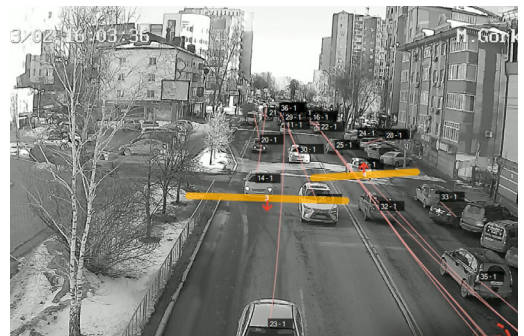
Queue length

The developed software complex allows
determining the length of the queue and time
spent by a car in the queue in the considered
direction, as well as the parking time using the
video image. The criterion for getting a car into





Pic. 5. Screenshot of visualization of queuing at the intersection (cars in the queue are united by yellow (lighter) lines, the labels change colour from black to red, time spent in the queue is displayed).



Pic. 6. License plate detection (left) and analysis of car traffic by video image (right). (License plate is partially retouched for publication).

the queue is the distance between cars which in the light is no more than 5 m.

Traffic delay

To determine traffic delay time, first it is necessary to determine time to overcome the road section while there is a free movement. The free movement criterion is set by the user as the minimum interval between cars at a speed of more than a threshold value. If there are no data on free movement, then they are determined through the maximum permitted speed on the road section.

Then, based on data collected from the video, the calculated traffic parameters are determined:

- Service level.
- Overload indicator.
- Time index.
- Buffer index.

Upon request analysis results are displayed in MS Excel.

Project of road traffic monitoring system

The project of RTMS for a highway of 1500 km, divided into 300 sections, was developed. The entrance and exit of each section is equipped with cameras. The system monitors traffic 24/7, fully automatically, responding to all requirements [4; 5].

To implement this project, two technologies were combined: license plate recognition and vehicle detection with video.

This allowed: first, to build a correspondence matrix, observing the car from different cameras, i.e. across the entire road network equipped with RTMS; second, to receive all the necessary data about the car from the video images without connecting to the traffic police

database, which resolved the issue with personal data.

At the same time, after deep optimisation of computer vision algorithms, it became possible to reduce system requirements to such extent that it made it feasible to manage a network of 100 cameras with just a single server in streaming mode. The total cost of the system was only 100 thousand roubles/km.

Brief conclusions. The need for traffic data has matured so much that readiness was manifested to set up a person per each 300 m of road every year to collect those data [4], while quality of such data leaves much to be desired [1]. With the help of RTMS, with which the authors of the system propose to equip the network of surveyed roads, this data can be obtained every five minutes with an accuracy of 95 %.

To manage any process, it is necessary to have data about it. Only by regularly collecting complete and reliable traffic data we can move on to the creation of ITS. The described software system was created to solve that problem of data collection.

REFERENCES

1. Yakimov, M. R. Transport planning: creation of transport models of cities: Monograph [*Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnykh modelei gorodov: monografiya*]. Moscow, Logos publ., 2013, 188 p. [Electronic resource]: <http://simulation.su/uploads/files/default/2013-yakimova-monography-1.pdf>. Last accessed 03.11.2020.
2. ODM 218.2.020-2012 Methodological recommendations for assessing the throughput of highways [ODM 218.2.020-2012 *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke propusknoi sposobnosti avtomobilnykh dorog*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200092512>. Last accessed 03.11.2020.
3. Mendelev, G. A. Regularities of changes in intensity of urban automobile traffic», Ph.D. thesis, 2001, 164 p. [*Dissertatsiya na soiskanie zvaniya k.t.n. «Zakonomernosti izmeneniya vo vremeni intensivnosti gorodskogo avtomobilnogo dvizheniya», 2001*]. [Electronic resource]: <https://www.dissercat.com/content/zakonomernosti-izmeneniya-vo-vremeni-intensivnosti-gorodskogo-avtomobilnogo-dvizheniya>. Last accessed 03.11.2020.
4. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of April 18, 2019, No. 114 «On approval of the procedure for monitoring road traffic» [*Prikaz Mintrans RF ot 18 aprelya 2019 No. 114 «O utverzhenii poryadka monitoring dorozhnogo dvizheniya»*]. [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72171658/>. Last accessed 03.11.2020.
5. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 26, 2018, No. 479 «On approval of methodological recommendations for development and implementation of measures to organize traffic in terms of calculating the values of the main parameters of road

traffic» [*Prikaz Mintrans RF ot 26 dekabrya 2018 No. 479 «Ob utverzhenii metodicheskikh rekomendatsii po razrabotke i realizatsii meropriyatiy po organizatsii dorozhnogo dvizheniya v chasti rascheta znachenii osnovnykh parametrov dorozhnogo dvizheniya»*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/552196818>. Last accessed 03.11.2020.

6. SP [Construction rules] 34.13330.2012 «Highways» [*SP 34.13330.2012 «Avtomobilnie dorogi»*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200095524>. Last accessed 03.11.2020.

7. SP [Construction rules] 396.1325800.2018 «Streets and roads of settlements. Urban planning rules» [*SP 396.1325800.2018 «Ulitsy i dorogi naselennykh punktov. Pravila gradostroitel'nogo projektirovaniya»*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/552304870>. Last accessed 03.11.2020.

8. VSN 42-87 «Instruction for conducting economic surveys for the design of highways» [*VSN 42-87 «Instruktsiya po provedeniyu ekonomicheskikh izyskaniy dlya projektirovaniya avtomobilnykh dorog»*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200006881>. Last accessed 03.11.2020.

9. Ministry of Transport of the Russian Federation, «Guidelines for development and implementation of measures to organize traffic. Organization of traffic at regulated intersections», 2017 [*Mintrans RF, «Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke i realizatsii meropriyatiy po organizatsii dorozhnogo dvizheniya. Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya na reguliruemyykh peresecheniyakh», 2017*]. [Electronic resource]: <https://mintrans.gov.ru/file/404210>. Last accessed 03.11.2020.

10. ODM 218.6.003-2011 «Guidelines for design of traffic lights on highways» [ODM 218.6.003-2011 *«Metodicheskie rekomendatsii po projektirovaniyu svetofornyykh ob'ektov na avtomobilnykh dorogakh»*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200098292>. Last accessed 03.11.2020.

11. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of March 25, 2020 «On approval of the Methodology for assessing and ranking local projects in order to implement the event «Implementation of intelligent transport systems providing for automation of traffic management processes in urban agglomerations, including cities with a population of over 300 thousand people» the project «Safe and high-quality highways» [*Rasporyazhenie Mintrans RF ot 25 marta 2020 «Ob utverzhenii Metodiki otsenki i ranzhirovaniya lokalnykh projektov v tselyakh realizatsii meropriyatiya «Vnedrenie intellektualnykh transportnykh sistem, predusmatrivayushchikh avtomatizatsiyu protsessov upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodskikh aglomeratsiyakh, vklyuchayushchikh goroda s naseleniem svyshe 300 tysyach chelovek» natsionalnogo proekta «Bezopasnie i kachestvennie avtomobilnie dorogi»*]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/564654235>. Last accessed 03.11.2020.

12. Dzhaifarov, R. M. Study of speed of traffic at traffic intersections with directional ramps [*Issledovanie skorostei dvizheniya na transportnykh razvyazkakh s napravlennymi s'ezdami*]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*, 2020, Iss. 2 (92), pp. 7–9. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825363>. Last accessed 03.11.2020.

13. Dzhaifarov, R. M. Calculation of speed of movement in development of planning solutions for transport interchanges with directional ramps [*Raschet skorostei dvizheniya pri razrabotke planirovochnykh reshenii transportnykh razvyazok s napravlennymi s'ezdami*]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*, 2020, Iss. 2 (92), pp. 13–16. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825365>. Last accessed 03.11.2020.

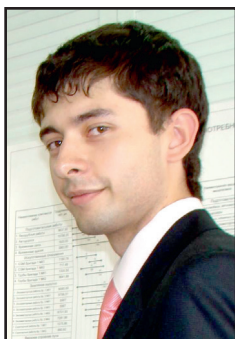




Определение электрофизических свойств грунтов в откосных зонах земляного полотна при георадарном обследовании



Виктор ПУПАТЕНКО



Юрий СУХОБОК



Геннадий СТОЯНОВИЧ

Пупатенко Виктор Викторович — Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия.

Сухобок Юрий Андреевич — Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия.

Стоянович Геннадий Михайлович — Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия*.

В статье описан новый способ проведения георадиолокационного обследования откосных зон грунтовых объектов транспортной инфраструктуры. В литологическом разрезе этих объектов присутствуют субгоризонтальные и наклонные границы раздела грунтов, а также откосные зоны. Традиционные методы обследования (бурение, шурфование), а также стандартный метод георадиолокации позволяют достоверно обследовать на этих объектах, как правило, лишь зоны под горизонтальной основной площадкой земляного полотна и субгоризонтальные участки основания вне его границ. Обследование под наклонными поверхностями часто затруднено или технически — геофизические методы, также как и традиционные, дают весьма сложную для дальнейшей расшифровки исходную информацию. Разрезы заполнены переотражениями и помехами, а процесс их расшифровки связан с большими методическими проблемами.

В данной работе представлен новый способ определения скоростей распространения радиоволн в приоткосных зонах дорожного земляного полотна. Исходной информацией являются данные, полученные при обследовании методом общей глубинной точки (ОГТ), при этом применяется известная

методика обследования и стандартный набор аппаратных средств. Новизна результатов статьи определяется разработанным авторами алгоритмом обработки результатов измерений. Выполненная на его основе программная реализация даёт возможность получения уравнения годографа с учётом наклона слоёв. Учтены определяющие геометрические характеристики насыпей — наличие откосов переменной крутизны. Предложена методика расчёта скорости распространения радиоволн для двухслойной среды с границей, наклонённой к поверхности сканирования. Выполнена проверка достоверности разработанного способа с помощью моделирования методом конечных разностей во временной области.

В статье приведены примеры практического применения разработанного метода при георадарном обследовании реальных объектов земляного полотна (объектов транспортной инфраструктуры). Предложенный в статье метод даёт возможность увеличения информативной площади обследуемых поперечников. При этом сохраняется точность георадарного метода, увеличивается зона его применения для получения достоверной информации до 60 % от площади поперечного сечения земляного полотна.

Ключевые слова: транспорт, железные дороги, георадиолокация, георадар, земляное полотно, метод общей глубинной точки, годограф, диэлектрическая проницаемость, откос.

*Информация об авторах:

Пупатенко Виктор Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожного пути Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, pw@festu.khv.ru.

Сухобок Юрий Андреевич — кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожного пути Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, yusukhobok@mail.ru.

Стоянович Геннадий Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры железнодорожного пути Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, oif@festu.khv.ru.

Статья поступила в редакцию 26.10.2020, принята к публикации 27.12.2020.

For the English text of the article please see p. 98.

ВВЕДЕНИЕ

Качественные инженерные решения должны быть основаны на достоверной исходной информации. Для проектирования земляного полотна, обеспечения его прочности и надёжности требуются не только прочностные и деформационные характеристики грунтов, но и данные о геометрии слоёв грунта. Задача получения объективной информации при обследовании объекта (инженерно-геологическом, геофизическом и других) является актуальной. Метод георадиолокации позволяет решать задачи определения границ слоёв грунтов земляного полотна, его основания [1; 2], позволяет выявить особенности строения объекта, восстановить историю его сооружения, последовательность работ по реконструкции и восстановлению. Не менее актуальными являются задачи поиска поверхностей смещения оползневых массивов [3; 4]. В особых условиях, например, при наличии многолетнемёрзлых грунтов в земляном полотне и его основании [5], георадарное обследование в сочетании с другими геофизическими методами позволяет определять различные по физическим характеристикам слои.

К преимуществам георадарного обследования следует отнести его невысокую стоимость (сравнительно с традиционными методами), возможность выполнения работ в таких условиях, где применение, например, буровой установки затруднено или вообще невозможно. Небольшой вес оборудования и состав исполнителей (как правило, два-три человека), высокая скорость обследования протяжённых транспортных сооружений также является важным преимуществом.

Особенностью исходных георадиолокационных данных (радарограмм) является то, что они являются временными разрезами, то есть на них отображается зависимость амплитуды сигнала от времени его возвращения к приёмной антенне. Однако для решения инженерных задач требуется построение глубинного разреза. Для выполнения преобразования исходного временного разреза в глубинный разрез (миграции) требуется выбрать корректную скоростную модель среды [6–8].

Скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от её электро-

физических свойств, в частности, от относительной диэлектрической проницаемости ϵ . Диэлектрическая проницаемость, в свою очередь, определяется видом грунта и его физическими свойствами. Экспериментами установлено [6; 7; 9], что наибольшее влияние на диэлектрическую проницаемость оказывает влажность грунта и, в меньшей степени, — температура грунта, плотность и другие параметры.

Существуют справочные таблицы, по которым можно оценить скорость распространения радиоволн в зависимости от вида грунта и качественной оценки его состояния (влажное, сухое, талое или мёрзлое) [6; 9]. Однако анализ данных показывает, что даже для одного типа грунта диапазон изменения характеристик значителен. Это приводит к погрешности в определении геометрии слоёв грунтов. Кроме того, вид грунта и его состояние зачастую заранее неизвестны. Поэтому необходимы методы, позволяющие непосредственно в полевых условиях определять скоростные характеристики сред. За последние годы был разработан ряд таких методов.

Метод подбора [10] основан на использовании результатов контрольного бурения. Привязка слоёв осуществляется сверху вниз, по осям синфазности. Каждая ось синфазности на радарограмме предположительно коррелирует с границей слоёв на скважине. По известной толщине слоёв и временным отметкам рассчитываются искомые скорости. В случае недостоверности полученных значений текущая ось синфазности отбраковывается и процесс повторяется. Недостаток этого способа заключается в том, что проведение буровых работ дорого, трудоёмко и зачастую не настолько оперативно; при работе на ряде объектов не всегда можно быть уверенным в достоверности предоставляемых геологами данных. Также нет никаких гарантий того, что выделенная ось синфазности коррелирует именно с границей раздела слоёв, а не с помехой или переотражением. Кроме того, инженерно-геологическое бурение даёт информацию только в одной точке (сечении) разреза, тогда как скоростные характеристики грунтовых сред могут существенно меняться вдоль профиля.

Ряд других методов основан на прямом измерении диэлектрической проницаемо-



сти. Отбирается проба, которая затем испытывается в лабораторных условиях рефлектометром [6]. Сложность этого способа заключается в необходимости использования дорогостоящего лабораторного оборудования. Известна модификация этого метода [11], связанная с откопкой шурфа и проведением испытания с помощью георадара, конструкция которого позволяет разносить антенны. Однако и этот метод трудоёмок, а результаты привязаны к конкретной точке. Кроме того, с его помощью можно определить скорости лишь в приповерхностных слоях земляного полотна.

Наиболее распространённый способ определения скоростей основан на выделении дифракционных гиперболических волн на радарограмме. Дифракционные гиперболы возникают при наличии в среде объекта, поперечные размеры которого не превышают длину радиоволны [6]. Искомые скорости определяются по углу наклона ветвей дифракционной гиперболической волны. Недостатком этого метода является то, что часто эти объекты располагаются неравномерно по длине и глубине профиля. Не всегда очертания гиперболических волн можно уверенно выделить.

Если конструкция георадара позволяет изменять расстояние между антеннами, то определять скорости можно с использованием георадарного зондирования на переменной базе по методу общей глубинной точки [2; 10; 12]. При обработке радарограмм, полученных при таком испытании, выделяют гиперболические годографы отражённых волн. По ним определяются среднеквадратичные значения скорости распространения волн, которые затем пересчитываются в пластовые скорости в слоях по формуле Урупова–Дикса [13; 14]. Работа этим методом требует хорошего качества исходной информации, так как при большом количестве помех и неверно подобранных характеристиках оборудования годографы выявляются неуверенно (если вообще выявляются), что приводит к погрешностям в определении значений скоростей.

Есть и другие методы, связанные с анализом амплитуд отражений от границ [15; 16]. Однако они также в основном работают только для верхней части обследуемой

среды. Таким образом, современные методы позволяют определять скорости лишь в верхней части разреза. Наиболее, на наш взгляд, универсальному и недорогому способу — георадарному зондированию на переменной базе — также присуща эта особенность. При выполнении работ на основной площадке земляного полотна скорости распространения радиоволн в верхних его слоях определяются достоверно, а в средней и нижней частях разреза — зачастую лишь оценочно.

Вместе с тем, георадарное зондирование можно выполнять и на откосах насыпей. Основное препятствие для проведения зондирования на переменной базе на откосных частях состоит в том, что базовый метод общей глубинной точки предполагает, что границы раздела сред горизонтальны или субгоризонтальны (углом их наклона можно пренебречь). Однако под откосами насыпей границы раздела сред не параллельны поверхности съёмки (откосу).

Таким образом, *цель* работы заключается в разработке способа определения скоростей распространения радиоволн в приоткосных зонах по результатам георадарного зондирования на переменной базе. Для этого разработана *методика* расчёта скорости распространения радиоволн в среде с наклонными границами.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДЛЯ СРЕДЫ С НАКЛОННОЙ ГРАНИЦЕЙ

Испытание методом георадарного зондирования на переменной базе может проводиться двумя способами. В первом — обе антенны одновременно разносятся от общего центра (ОГТ — метод общей глубинной точки). Во втором — одна из антенн не меняет своего положения, а вторая постепенно отдаляется от первой. При обследовании откоса земляного полотна удобно использовать вторую модификацию.

Расчётная схема проведения зондирования на переменной базе с одной наклонной границей раздела слоёв приведена на рис. 1. Обозначим текущее расстояние между антеннами георадара за x , толщину верхнего слоя — за H , искомую скорость распространения радиоволн в нём — за V ,

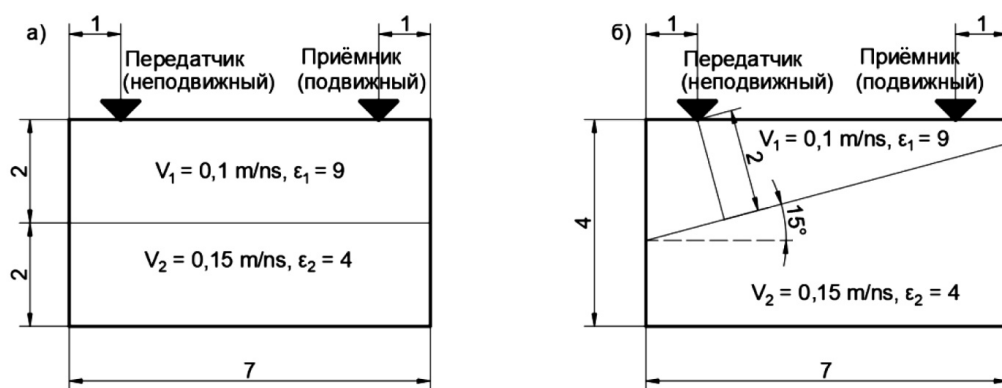


Рис. 2. Расчётные схемы: а – горизонтальная граница раздела слоёв; б – наклонная граница раздела слоёв ($\beta = 15^\circ$) (выполнено авторами).

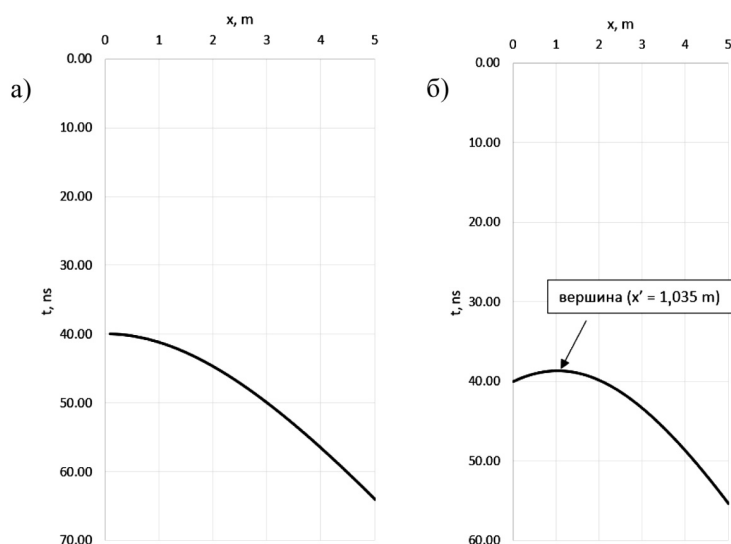


Рис. 3. Результаты расчёта годографов отражённых волн: а – горизонтальная граница раздела слоёв; б – наклонная граница раздела слоёв ($\beta = 15^\circ$) (выполнено авторами).

границей и по представленной в этой работе методике для среды с наклонной границей приведены на рис. 3. Как видно, для среды с наклонной границей вершина гиперболы смещается на величину $x' = 1,035$ м. При этом значение времени для $x = 0$ для обеих схем постоянное, 40 нс.

Для проверки правильности расчёта выполнено моделирование методом конечных разностей во временной области (FDTD) в программе grgMax [19]. В качестве зондирующего импульса в модели использован импульс в виде МНАТ-вейв-лета.

Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Результаты моделирования полностью соответствуют расчёту. Положение расчётных гипербол (рис. 3), определённых по формулам (1–5), полностью совпадает с результатами численного моделирования (рис. 4).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАДИОВОЛН В ПРИОТКОСНЫХ ЗОНАХ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В [14] показано, что для многослойной среды с несколькими непараллельными друг другу границами годографы отражённых волн невозможно представить в виде гиперболических функций и определить скоростные характеристики. Чтобы обойти

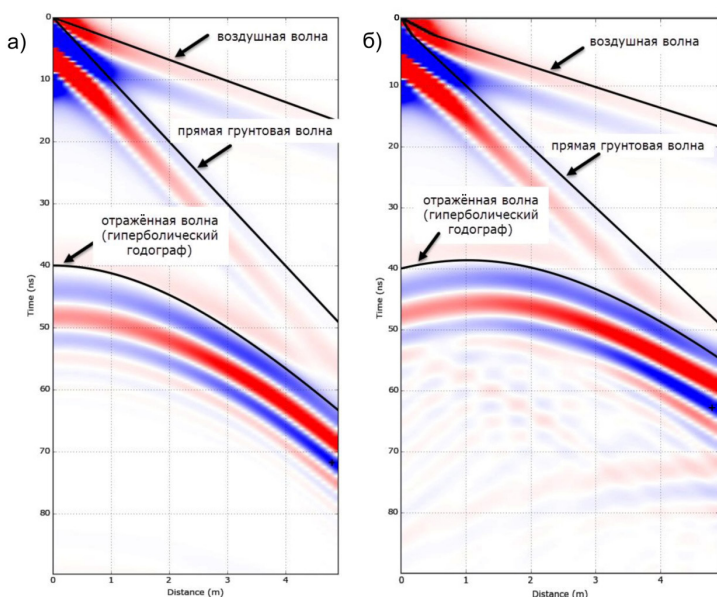


Рис. 4. Синтетические радарограммы, полученные при моделировании методом конечных разностей во временной области: а – горизонтальная граница раздела слоёв; б – наклонная граница раздела слоёв ($\beta = 15^\circ$) (выполнено авторами).

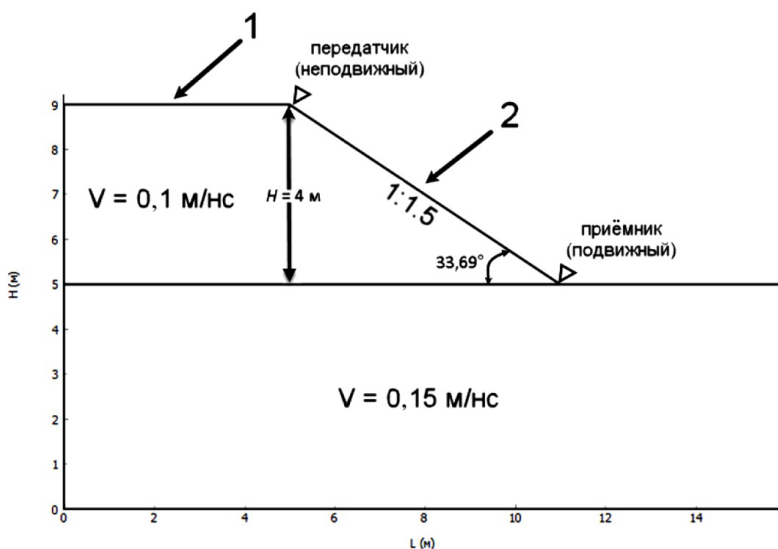


Рис. 5. Расчётная схема насыпи; обозначены участки георадарного зондирования на переменной базе: 1 – участок с горизонтальной границей (традиционный вариант), 2 – участок с наклонной границей (составлено авторами).

это ограничение, предлагается определять скорости распространения радиоволн непосредственно в приоткосной зоне для среды с одной наклонной границей.

Рассмотрим, каким образом по разработанной методике определения скоростных характеристик среды можно рассчитывать скорости в приоткосных зонах земляного полотна. На рис. 5 приведена расчётная схема насыпи и основания. Угол

наклона границы между насыпью и основанием по отношению к откосу составляет $33,69^\circ$ (уклон откоса 1:1,5).

Расчёт выполнен в двух вариантах: соответственно, с двухслойной средой с горизонтальной границей и двухслойной средой с наклонной границей. В первом варианте использована традиционная методика скоростного анализа [2], во втором – разработанная методика определе-



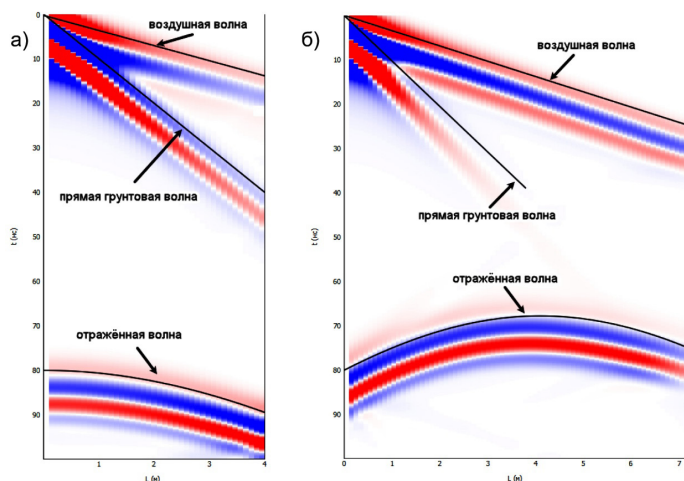


Рис. 6. Синтетические радарограммы, полученные при моделировании методом конечных разностей во временной области: а – первый участок, б – второй участок (составлено авторами).

Таблица 1
Результаты сравнения расчётных параметров с данными моделирования
(составлено авторами)

Параметр	Рассчитанное значение	Заданное значение	Погрешность, %
Скорость распространения радиоволн, м/нс	0,096	0,1	4
Толщина слоя, м	3,86	4	3,5
Угол наклона границы, °	32,103	33,69	4,7

ния скоростей для среды с наклонной границей.

Для проверки результатов расчёта выполнено синтетическое моделирование в программе grtMax [19]. На полученные синтетические радарограммы (рис. 6) нанесены прямая воздушная волна, прямая грунтовая волна и гиперболические очертания годографа отражённых волн.

Результаты сравнения расчётных параметров с данными моделирования приведены в табл. 1.

Погрешности определения параметров, определённых по первому и второму участку в сечении бровки – откос, не превышают 5 %. Таким образом, при установке неподвижного передатчика в любой точке откоса можно определить толщину слоя под точкой установки и наклон границы слоёв грунта.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Разработанная методика применена при георадарном обследовании участков строи-

тельства земляного полотна. Обследование выполнено сотрудниками кафедры «Железнодорожный путь» Дальневосточного государственного университета путей сообщения. Использовался георадар «ЛО-ЗА-В» в комплекте с антеннами различной длины от 1,5 до 6 м. Пройдено несколько продольных профилей по основной площадке земляного полотна антеннами длиной шесть и три метра (центральная частота сигнала 25 и 50 МГц). При обследовании поперечных профилей использовались антенны длиной 1,5 м (центральная частота сигнала – 100 МГц). В зоне под основной площадкой, благодаря применению низкочастотных антенн, получены разрезы глубиной до 18...20 м. Глубина георадарного разреза в откосных зонах оказалась ниже. Остались «слепые» зоны, в которых определить положение границ за пределами основной площадки не удалось. Контрольное бурение выполнялось только на основной площадке земляного полотна. Для определения скоростных характеристик грунтов под поверхностью откосов была применена предлагаемая методика.

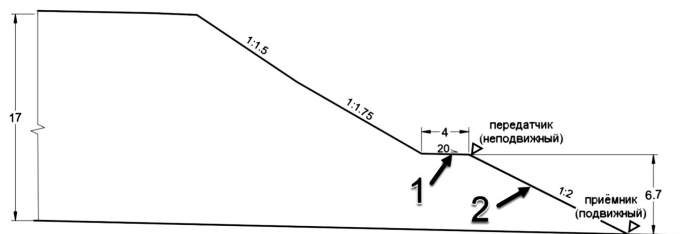


Рис. 7. Фрагмент поперечного профиля обследуемой насыпи; обозначены участки георадарного зондирования на переменной базе: 1 – на берме, 2 – на откосе бермы (составлено авторами).



Рис. 8. Проведение георадарного зондирования на переменной базе на откосе бермы (предоставлено авторами).

На поперечном профиле (рис. 7) выполнено георадарное зондирование на переменной базе в двух вариантах.

В первом варианте испытание проводилось на берме, с шагом 10 см. Во втором варианте – вдоль откоса бермы (рис. 8); при этом изначально антенны георадара были расположены вплотную друг к другу на бровке бермы, затем передающая антенна отодвигалась от приёмной в направлении к подошве откоса с шагом 10 см.

Полученные радарограммы приведены на рис. 9.

При расчёте годографа на берме использована традиционная методика скоростного анализа. В результате её использования получено, что скорость распространения радиоволн составляет 0,06 м/нс, толщина слоя – 0,756 м.

При расчёте годографов на откосе бермы обнаружилось, что присутствуют два вида гиперболических очертаний. Одно из них (рис. 9, 2) соответствует наклонной границе (со смещённой вершиной), другое (рис. 9, 3) – границе, параллельной откосу. Расчёт для первого годографа производился по традиционной методике скоростного анализа, для второго – по предлагаемой в работе методике.

Результаты расчёта по наклонной границе составляют, соответственно: скорость распространения радиоволн – 0,069 м/нс; угол наклона слоя – $35,43^\circ$; толщина слоя – 0,863 м. Результаты расчёта по горизонтальной границе: скорость распространения радиоволн – 0,058 м/нс; толщина слоя – 0,72 м. Скоростные характеристики находятся в интервале 0,058–0,069 м/нс, что соответствует грунту во влажном состоянии.

Полученные результаты позволили определить слои в нижней части обследуемой насыпи (рис. 10). На радарограмме, привязанной к отметкам поперечного профиля насыпи, удалось нанести границы грунтов, проследить их положение в средней части земляного полотна, до выхода на противоположный откос.

Благодаря рассчитанным по предлагаемой методике скоростям распространения радиоволн в грунтах выделены слои во влажном состоянии и выявлены слабые зоны в насыпи.

Проведённые работы показали, что предлагаемая методика может быть расширена и дополнена упрощённым способом определения скоростных характеристик грунтов откосной зоны за счёт перерасчёта предварительной геометрии границ слоёв, полученной непосредственно в полевых



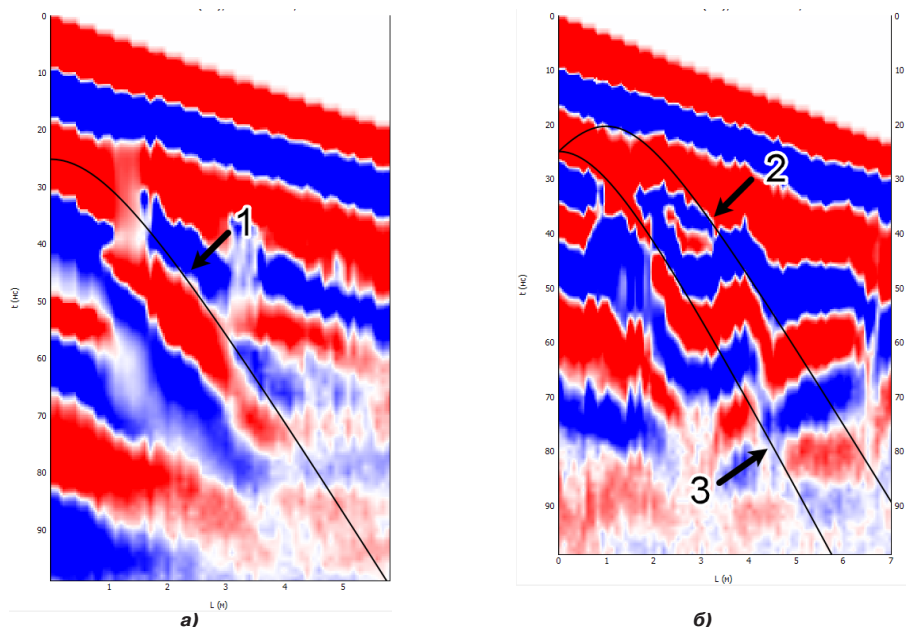


Рис. 9. Радарограммы, полученные при георадарном зондировании на переменной базе: а – первый участок, б – второй участок; 1, 2, 3 – гиперболические годографы отражённых волн (составлено авторами).

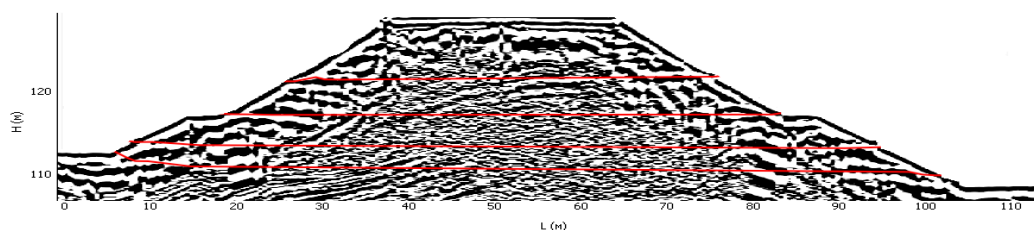


Рис. 10. Пример обработки поперечного профиля насыпи высотой 17 м. Приведено разделение разреза на границы с близкими скоростными характеристиками (выполнено авторами).

условиях. Планируется также использовать радиометки, заложенные в земляное полотно в момент его сооружения.

ВЫВОДЫ

Метод георадиолокации применяется для обследования объектов транспортной инфраструктуры достаточно широко. Задачи, решаемые этим методом, разнообразны, поэтому возникает необходимость разработки новых подходов к их решению. Предлагаемая методика определения скоростей распространения радиоволн в грунтах в «слепых зонах» позволяет получить скоростные характеристики грунтов в откосных зонах насыпей. Площадь таких зон может составлять до 60 % общей площади поперечного сечения насыпи, в зависимости от крутизны заложения откосов.

Разработанная методика не только расширяет сферу применения георадарного обследования, но и позволяет рассчитать значения скоростных характеристик грунтов в откосных зонах. Более достоверная и качественная информация, полученная в результате применения геофизических и традиционных методов обследования, работает на повышение качества принимаемых проектных решений, обеспечение прочности и надёжности объектов транспортной инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владов М. Р., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-vladov-ml-starovojtov-av-vvedenie-v-georadiolokaciyu-mmgu-2004rutk155sgsp.pdf>. Доступ 26.10.2020.

2. Пупатенко В. В., Сухобок Ю. А. Литологическое расчленение разреза по данным георадиолокации // Мир транспорта. — 2013. — № 3. — С. 154–161. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/395>. Доступ 26.10.2020.

3. Pupatenko, V. V., Sukhobok, Y. A., Stoyanovich, G. M. Lithological Profiling of Rocky Slopes using GeoReader Software Based on the Results of Ground Penetrating Radar Method. *Procedia Engineering. Transportation Geotechnics and Geocology, TGG 2017*, Saint Petersburg, Russia, 2017, Vol. 189, pp. 643–649. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/317192027_Lithological_Profiling_of_Rocky_Slopes_using_GeoReader_Software_Based_on_the_Results_of_Ground_Penetrating_Radar_Method/fulltext/592c1845a6fdcc44435e788d/Lithological-Profiles-of-Rocky-Slopes-using-GeoReader-Software-Based-on-the-Results-of-Ground-Penetrating-Radar-Method.pdf. Доступ 26.10.2020. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.102.

4. Pupatenko, V. V., Sukhobok, Y. A., Stoyanovich, G. M., Stetsyuk, A. E., Verkhovtsev, L. R. GPR data interpretation in the landslides and subgrade slope surveys. *Selected issues, MATEC Web of Conferences*, 2019, Vol. 265, 03003. [Электронный ресурс]: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/14/mateconf_gccets2018_03003.pdf. Доступ 26.10.2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926503003>.

5. Стоянович Г. М., Пупатенко В. В., Сухобок Ю. А. Поиск погребённых льдов методом георадиолокации при реконструкции железных дорог // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах: Материалы симпозиума (Новосибирск, 24–26 сентября 2015 г.) / Под ред. проф. А. Л. Исакова и проф. Ц. К. Лю. — Новосибирск: СГУПС, 2015. — С. 78–83. [Электронный ресурс]: <https://drive.google.com/file/d/1sCvvgXD5UwAjwKmKVPCc1hQEEK9kK98Q/view>. Доступ 26.10.2020.

6. Ground Penetrating Radar. Ed. by David J. Daniels. London, The Institution of Electrical Engineers, 2004, 734 p. DOI: 10.1049/PBRA015E.

7. Вопросы подповерхностной радиолокации: Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гринева. — М.: Радиотехника, 2005. — 416 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-grinev-ayu-red-voprosy-podpoverxnostnoj-radiolokacii-radiotekhnika-2005ruk3.pdf>. Доступ 26.10.2020.

8. Попов С. В. Определение диэлектрической проницаемости по географам дифрагированных волн в рамках модели наклонно-слоистой среды // Криосфера Земли. — 2017. — Т. XXI. — № 3. — С. 83–87. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/85796845-Opreделение-dielektricheskoy-pronicaemosti-po-godografam-difragirovannyh-voln-v-ramkah-modeli-naklonno-sloistoy-sredy.html>. Доступ 26.10.2020.

9. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Ed. by H. M. Jol. Amsterdam, Elsevier Science, 2009, 508 p. [Электронный ресурс]: <http://bookfi.net/book/698213>. Доступ 26.10.2020.

10. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных: Учебное пособие. — М.: Издательство МГУ, 2008. — 192 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-interpretaciya-georadiolokacionnyh-dannyh.pdf>. Доступ 26.10.2020.

11. Бричева С. С. Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолока-

ции // Дис... на соискание учёной степени канд. геолого-минерал. наук. — М.: Издательство МГУ, 2018. — 169 с. [Электронный ресурс]: <https://istina.msu.ru/download/102445811/1f4myB:4rMolFBksN6A7nUkgfjcfLhA50g/>. Доступ 26.10.2020.

12. Forte, E., Pipan, M. Review of multi-offset GPR applications: Data acquisition, processing and analysis. *Signal Processing*, 2017, Vol. 132, pp. 210–220. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168416300494?via%3Dihub>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.04.011>. Доступ 26.10.2020.

13. Dix, C. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 1955, Vol. 20, No. 1, pp. 68–86. [Электронный ресурс]: <https://ru.scribd.com/document/260551160/Seismic-Velocities-From-Surface-Measurements-C-Hewitt-Dix>. Доступ 26.10.2020.

14. Сейсморазведка: Справочник геофизика / Под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. — М.: «Недра», 1981. — 464 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-seismorazvedka-spravochnik-geofizikapod-red-gurvicha-nomokonovamedra.djv>. Доступ 26.10.2020.

15. Forte, E., Dossi, M., Pipan, M., Colucci, R. R. Velocity analysis from common offset GPR data inversion: theory and application to synthetic and real data. *Geophysical Journal International*, 2014, No. 297, pp. 1471–1483. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Renato_Colucci2/publication/262980200_Velocity_analysis_from_common_offset_GPR_data_inversion_Theory_and_application_to_synthetic_and_real_data/links/559be0c408ae0035df2336dc/Velocity-analysis-from-common-offset-GPR-data-inversion-Theory-and-application-to-synthetic-and-real-data.pdf. DOI: 10.1093/gji/ggu103. Доступ 26.10.2020.

16. Saarenketo, T., Scullion, T. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, Vol. 43, No. 2–4, pp. 119–138. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926698519900052X?via%3Dihub>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X). Доступ 26.10.2020.

17. Сухобок Ю. А., Курбатов М. С. Программный комплекс для информационного моделирования георадарных данных GeoReader // САПР и ГИС автомобильных дорог. — 2019. — № 2 (13). — С. 26–31. [Электронный ресурс]: [http://www.cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2\(13\)-04.Sukhobok-Kurbatov\(GeoReader\).pdf](http://www.cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2(13)-04.Sukhobok-Kurbatov(GeoReader).pdf). DOI: 10.17273/CADGIS.2019.2.4. Доступ 26.10.2020.

18. Yilmaz, O. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2001, Vol. 1, 1028 p. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>. Доступ 26.10.2020.

19. Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis, I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar. *Computer Physics Communications*, 2016, Vol. 209, pp. 163–170. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Antonios_Giannopoulos2/publication/308044720_gprMax_Open_source_software_to_simulate_electromagnetic_wave_propagation_for_Ground_Penetrating_Radar/links/57eb070208ae5d93a4815e1b/gprMax-Open-source-software-to-simulate-electromagnetic-wave-propagation-for-Ground-Penetrating-Radar.pdf. DOI: 10.1016/j.cpc.2016.08.020. Доступ 26.10.2020.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.





Evaluation of Electrophysical Properties of Soils in the Slope Zones of the Foundation During GPR Survey



Victor V. PUPATENKO



Yuri A. SUKHOBOK



Gennady M. STOYANOVICH

Pupatenko, Victor V., Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Sukhobok, Yuri A., Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Stoyanovich, Gennady M., Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia.*

ABSTRACT

The article describes a new method for conducting a ground penetrating radar survey of slope zones of soil objects of transport infrastructure. In the lithological section of these objects, there are sub-horizontal and inclined soil boundaries, as well as slope zones. Traditional survey methods (drilling, pitting), as well as the standard GPR method, make it possible to reliably survey at these objects, as a rule, only the zones under the horizontal main ground of the subgrade and sub-horizontal sections of the ground outside its boundaries. Survey under inclined surfaces is often difficult or technically impossible; geophysical methods, just like traditional ones, provide initial information that is exceedingly difficult for further decoding. The sections are filled with re-reflections and noises, and the process of decoding them is associated with great methodological problems.

This paper presents a new method for determining speed of propagation of radio waves in the slope zones of the foundation. The initial information is the data obtained during the survey using the common depth point (CDP) method,

using a well-known survey technique and a standard set of hardware. The novelty of the article results is determined by the algorithm for processing the measurement results developed by the authors. The software implementation made on its basis makes it possible to obtain the hodograph equation considering the slope of the layers. Defining geometric characteristics of embankments associated with the presence of slopes of variable steepness have been considered. A technique for calculating propagation speed of radio waves for a two-layer medium with a boundary inclined to the scanning surface has been proposed. The validity of the developed method was verified using finite-difference time-domain modelling.

The article provides examples of practical application of the developed method in the GPR survey of real track foundation objects (transport infrastructure objects). The method proposed in the article makes it possible to increase the informative area of the surveyed diameters. At the same time, the accuracy of the GPR method is preserved, the area of its application for obtaining reliable information is increased to 60 % of the cross-sectional area of the foundation.

Keywords: transport, railways, georadiolocation, georadar, foundation, common depth point method, hodograph, dielectric constant, slope.

*Information about the authors:

Pupatenko, Victor V. – Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Railway Track of Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia, pvw@festu.khv.ru.

Sukhobok, Yuri A. – Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Railway Track of Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia, yusukhobok@mail.ru.

Stoyanovich, Gennady M. – D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Railway Track of Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia, oif@festu.khv.ru.

Article received 26.10.2020, accepted 27.12.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 88.

Background. Good engineering solutions should be based on reliable background information. To design the foundation, to ensure its strength and reliability, not only the strength and deformation characteristics of soils are required, but also data on the geometry of soil layers. The task of obtaining objective information during the engineering-geological, geophysical, and other survey of an object is urgent. The ground penetrating radar (GPR) method allows solving the problem of determining the boundaries of soil layers of the roadbed, its ground [1; 2], identifying the features of the structure of the object, restoring the history of its construction, the sequence of works on its reconstruction and restoration. No less urgent are the problems of finding surfaces of displacement of landslide massifs [3; 4]. Under special conditions, for example, in the presence of long-term permafrost soils in the foundation and its ground [5], GPR survey in combination with other geophysical methods makes it possible to determine layers of different physical characteristics.

The advantages of a GPR survey include its low cost (compared to traditional methods), the ability to perform work in the environment where the use of, for example, a drilling rig is difficult or even impossible. The low weight of the equipment and little staff of performers (as a rule, two or three people), high speed of the survey of lengthy transport structures are also important advantages.

A feature of the initial original GPR data (radarograms) is that they are time sections, i.e., they display the dependence of the signal amplitude on time of its return to the receiving antenna. However, to solve engineering problems, it is required to build a depth section. To transform the initial time section into a depth section (migration), it is necessary to select the correct velocity model of the environment [6–8].

Speed of propagation of electromagnetic waves in a medium depends on its electrophysical properties, in particular, on relative dielectric constant ϵ . The dielectric constant, in turn, is determined by the type of soil and its physical properties. Experiments have established [6; 7; 9] that the greatest influence on the dielectric constant is exerted by soil moisture and, to a lesser extent, by soil temperature, density, and other parameters.

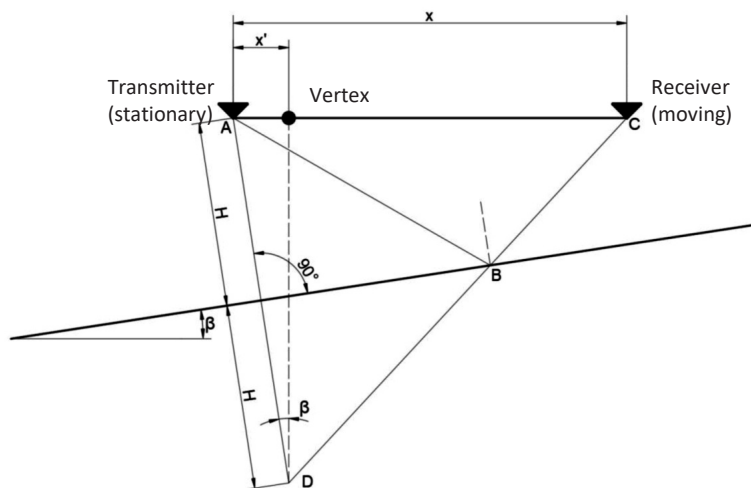
There are reference tables, which can be used to estimate speed of propagation of radio waves, depending on the type of soil and qualitative assessment of its condition (wet, dry, thawed, or frozen condition) [6; 9]. However, analysis of data shows that even for one and the same type of soil, the range of changes in characteristics is significant. This leads to an error in determining the geometry of soil layers. Besides, the type of soil and its condition are often unknown in advance. Therefore, methods are needed that make it possible to determine velocity characteristics of the media directly in the field conditions. Several such methods have been recently developed.

Trial and error method [10] is based on using the results of control drilling. Layers are fixed from top to bottom, along the line-ups. Each line-up on the radarogram presumably correlates with the boundary of the layers in the well. The desired speeds are calculated from the known layer thickness and time stamps. If the resulting values are unreliable, the current line-up is rejected, and the process is repeated. The disadvantage of this method is that drilling operations are expensive, time consuming and often not so prompt; when works are executed at several sites, it is not always possible to be sure of reliability of data provided by geologists. Also, there is no guarantee that the selected line-up correlates precisely with the boundary between the layers, and not with a noise or re-reflection. In addition, engineering-geological drilling provides information only at one point (cross-section) of the section, while the velocity characteristics of soil media can vary significantly along the profile.

A number of other methods are based on direct measurement of the dielectric constant. A sample is taken, which is then tested under laboratory conditions with a reflectometer [6]. The complexity of this method lies in the need to use expensive laboratory equipment. A modification of this method is known [11], that is associated with excavation of a pit and with testing using a GPR, the design of which allows the antennas to be spaced apart. However, this method is also laborious, and the results are tied to a specific point. In addition, it can be used to determine the speed only in the near-surface layers of the foundation.

The most common method for determining velocities is based on selection of diffraction hyperbolas on a radarogram. Diffraction





Pic. 1. Calculated scheme for conducting GPR multi-offset profiling for a two-layer medium with one inclined boundary (compiled by the authors).

hyperbolas arise when there is an object in the medium whose transverse dimensions do not exceed the length of the radio wave [6]. The sought speeds are determined from the angle of inclination of the branches of the diffraction hyperbola. The disadvantage of this method is that often these objects are located unevenly along the length and depth of the profile. The outlines of hyperboles cannot always be distinguished with confidence.

If the design of the georadar allows changing the distance between the antennas, then speed can be determined using GPR multi-offset profiling by the method of the common depth point [2; 10; 12]. When processing radarograms obtained during such a test, hyperbolic hodograph curves of reflected waves are identified. They are used to determine the root-mean-square values of the wave propagation velocity, which are then converted into layer velocities in the layers using Urupov–Dix equation [13; 14]. Working with this method requires a good quality of the input information, since with a large amount of interference and incorrectly selected characteristics of the equipment, the hodograph curves are detected uncertainly (if they are identified at all), which leads to errors in determining the values of velocities.

There are other methods associated with the analysis of the amplitudes of reflections from the boundaries [15; 16]. However, they also work mostly only regarding the upper part of the surveyed environment. Thus, modern methods make it possible to determine velocities

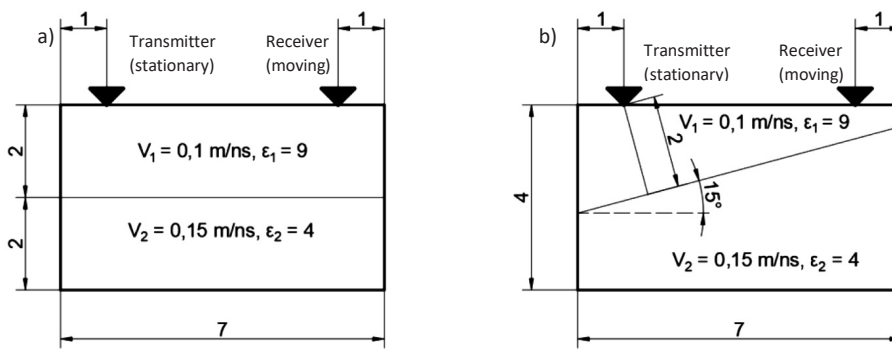
only in the upper part of the section. This feature is also inherent in the most, in our opinion, universal and inexpensive method which is GPR multi-offset profiling. When performing work on the main ground of the foundation, the propagation speed of radio waves in its upper layers is determined reliably, and in the middle and lower parts of the section, velocity is often only estimated.

At the same time, GPR sounding can also be performed on embankment slopes. The main obstacle to conducting GPR multi-offset profiling on slopes is that the basic CDP method assumes that the media boundaries are horizontal or sub-horizontal (their slope can be neglected). However, below embankment slopes, media boundaries are not parallel to the survey surface (slope).

Thus, the *objective* of the work is to develop a method for determining propagation speed of radio waves in near-slope zones based on the results of multi-offset GPR profiling. For this, a *method* has been developed for calculating propagation speed of radio waves in an environment with inclined boundaries.

Method for calculating propagation speed of radio waves for a medium with an inclined boundary

Testing with GPR multi-offset profiling can be carried out in two ways. Following the first method, both antennas are simultaneously removed from a common centre (common depth point/CDP method). With the second



Pic. 2. Design schemes: a – horizontal boundary between the layers; b – inclined boundary between the layers ($\beta = 15^\circ$) (compiled by the authors).

method, one of the antennas does not change its position, and the second is gradually moved away from the first one. When examining the slope of the foundation, it is convenient to use the second modification.

The design scheme for conducting multi-offset profiling with one inclined boundary between the layers is shown in Pic 1. Let us denote the current distance between the antennas of the GPR as x , the thickness of the upper layer as H , the sought speed of propagation of radio waves in it as V , and the angle of inclination of the boundary as β . Layer height H is measured in the position of the stationary transmitter along the normal to the layer boundary. The electromagnetic signal emitted by the transmitting antenna is reflected from the media boundary and is recorded by the receiving antenna some time t after emission.

The hodograph equation of the reflected wave $t(x)$ was obtained from geometric relationships (Pic. 1), where $ABC = DC$:

$$t(x) = \frac{\sqrt{(x - 2H \sin \beta)^2 + (2H \cos \beta)^2}}{V}, \quad (1)$$

$$x' = 2H \cdot \sin \beta. \quad (2)$$

When the distance between the antennas is equal to zero, formula (1) is reduced to the form:

$$t_0 = \frac{2H}{V}. \quad (3)$$

After expressing the values of H and β from (2) and (3) and substituting them in (1), the hodograph equation is obtained:

$$t(x) = \frac{\sqrt{x^2 - 2 \cdot x \cdot x' + t_0^2 \cdot V^2}}{V}. \quad (4)$$

In the case of a horizontal boundary, when $\beta = 0$ and, therefore, $x' = 0$, this equation is reduced to the well-known equation of the

hodograph of the reflected wave with a horizontal arrangement of layers [2]:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \left(\frac{x}{V}\right)^2}. \quad (5)$$

Equation (4) is a hyperbolic function. However, if for the case of a horizontal boundary the vertex of the hyperbolic travel time (hodograph) curve corresponds to zero separation ($x = 0$), then for the case of an inclined boundary the top of the hodograph curve is shifted by the value x' .

Thus, the following sequence of processing GPR data is proposed:

1) On the initial radarogram, the hodograph of a hyperbolic outline with a displaced vertex is revealed.

2) The found hodograph is automatically approximated by the hyperbola equation in accordance with equation (4).

3) The parameters t_0 , V and x' are determined by equation (4).

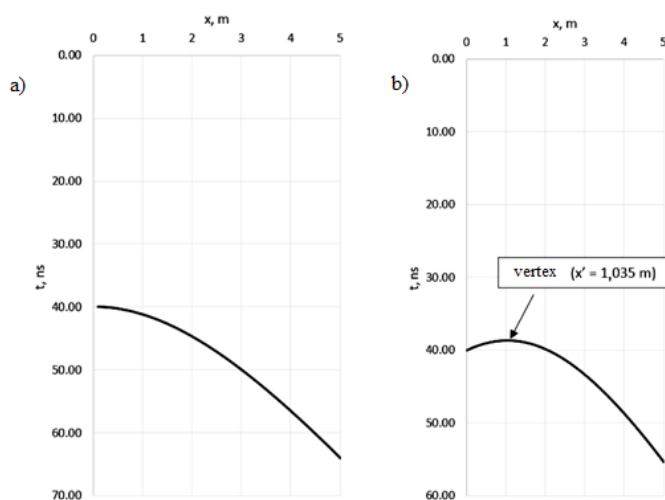
4) According to equation (3), the layer thickness H is calculated.

5) According to equation (2), the angle of inclination of the layer β is determined.

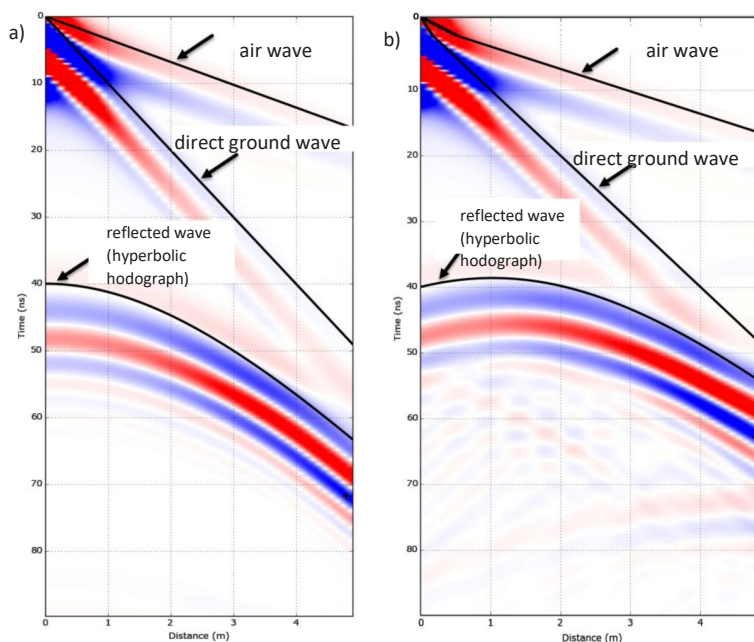
This technique is implemented with the GeoReader software package [17].

To check reliability of the developed technique, we will consider two design schemes for an environment with two soil layers. In the first design scheme, the media boundary is horizontal (Pic. 2a), in the second one, it is located at an angle of 15° to the scanned surface (Pic. 2b). All dimensions are given in meters. The transmitting antenna of the georadar is stationary, the receiving antenna moves with a step of 10 cm in the direction away from the transmitter.





Pic. 3. Results of calculating the hodographs of the reflected waves: a – horizontal boundary between the layers; b – inclined boundary between the layers ($\beta = 15^\circ$) (compiled by the authors).

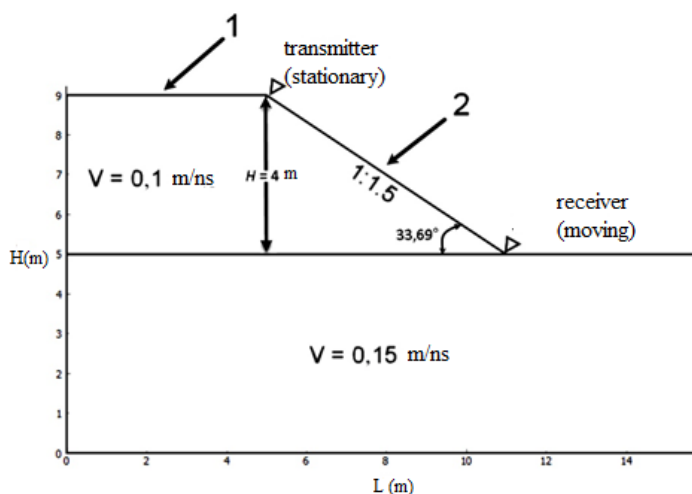


Pic. 4. Synthetic radarograms obtained by finite-difference time-domain simulation: a – horizontal boundary between the layers; b – inclined boundary between the layers ($\beta = 15^\circ$) (compiled by the authors).

The results of calculations by the traditional method [2] for a medium with a horizontal boundary and by the method presented in this work for a medium with an inclined boundary are shown in Pic. 3. As can be seen, for a medium with an inclined boundary, the vertex of the hyperbola is displaced by $x' = 1,035 m$. In this case, the time value for $x = 0$ for both schemes is constant and equal to 40 ns.

To check correctness of the calculation, a finite-difference time-domain (FDTD) simulation was performed in the gprMax software environment [19]. A pulse in the form of an MHAT wavelet was used as a probe sounding pulse in the model.

The simulation results are shown in Pic. 4. The simulation results are fully consistent with the calculation. The position of the



Pic. 5. Design scheme of the embankment; areas of GPR multi-offset profiling are: 1 – a section with a horizontal boundary (traditional version), 2 – a section with an inclined boundary (compiled by the authors).

Table 1

Results of comparing the calculated parameters with simulation data (compiled by the authors)

Parameter	Calculated value	Specified value	Error, %
Radio wave propagation speed, m/ns	0,096	0,1	4
Layer thickness, m	3,86	4	3,5
Boundary inclination angle, °	32,103	33,69	4,7

calculated hyperbolas (Pic. 3), determined by formulas (1–5), completely coincides with the results of numerical simulation (Pic. 4).

Determination of speed of radio waves in the slope zones of the foundation

It is shown in [14] that for a multilayer medium with several boundaries, which are not parallel to each other, the hodograph curves of reflected waves cannot be represented as hyperbolic functions and the velocity characteristics cannot be determined. To overcome this constraint, it is proposed to determine propagation speed of radio waves directly in the near-slope zone for a medium with one inclined boundary.

Let us consider how, according to the developed method for determining the speed characteristics of the environment, it is possible to calculate speeds in the slope zones of the foundation. Pic. 5 shows the design diagram of the embankment and the ground. The slope of the boundary between the embankment and the ground in relation to the slope is 33,69° (slope ratio 1:1.5).

The calculation was carried out in two versions: respectively, with a two-layer medium with a horizontal boundary and a two-layer

medium with an inclined boundary. In the first version, the traditional method of velocity analysis [2] is used, in the second the developed method for determining the velocities for a medium with an inclined boundary is applied.

To check the calculation results, a synthetic simulation was performed using the gprMax software [19]. The obtained synthetic radarograms (Pic. 6) show a direct air wave, a direct ground wave and hyperbolic outlines of the hodograph of reflected waves.

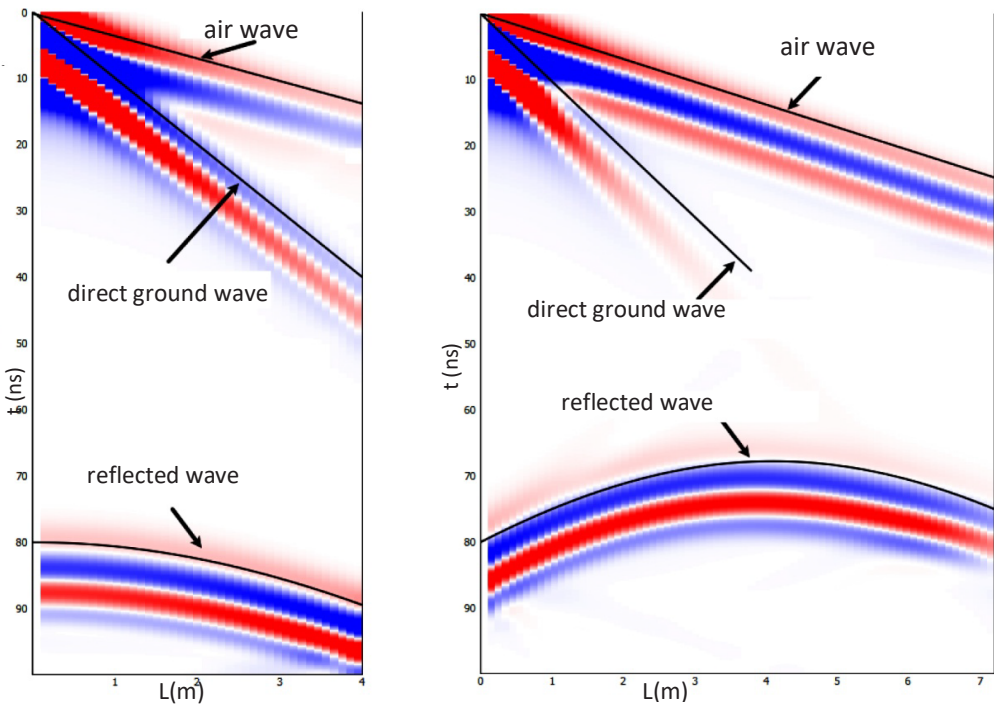
The results of comparing the calculated parameters with simulation data are shown in Table 1.

The errors in determining the parameters determined for the first and second sections in the section of the edge and the slope do not exceed 5 %. Thus, by installing a stationary transmitter at any point of the slope, it is possible to determine the layer thickness under the installation point and the slope of the soil boundary.

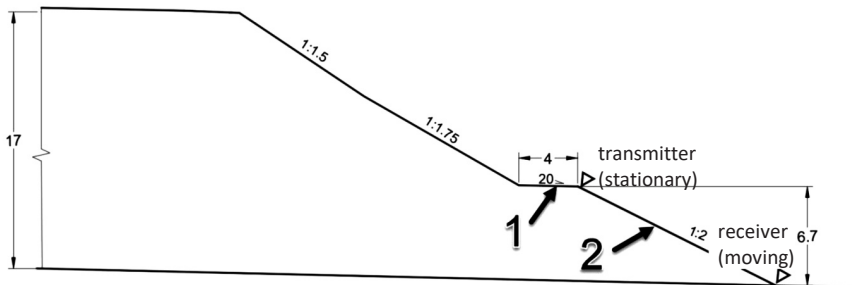
Application of the developed technique when inspecting the foundation

The developed technique is applied in the GPR survey of the foundation construction sites. The survey was carried out by the staff of





Pic. 6. Synthetic radarograms obtained by finite-difference time-domain simulation: a – the first section, b – the second section (compiled by the authors).



Pic. 7. Fragment of the cross-section of the surveyed embankment; areas of GPR multi-offset profiling are: 1 – on the berm, 2 – on the slope of the berm (compiled by the authors).

the Railway Track department of Far Eastern State Transport University. The georadar «LOZA-V» was used complete with antennas of various lengths from 1,5 to 6 m. Several longitudinal profiles were surveyed along the main site of the foundation with antennas long respectively of six and three meters (the central frequencies of the signal were respectively 25 and 50 MHz). When examining the transverse profiles, antennas with a length of 1,5 m (central frequency of the signal 100 MHz) were used. In the area under the main ground, due to the use of low-frequency antennas, sections with a depth of up to 18...20 m were obtained.

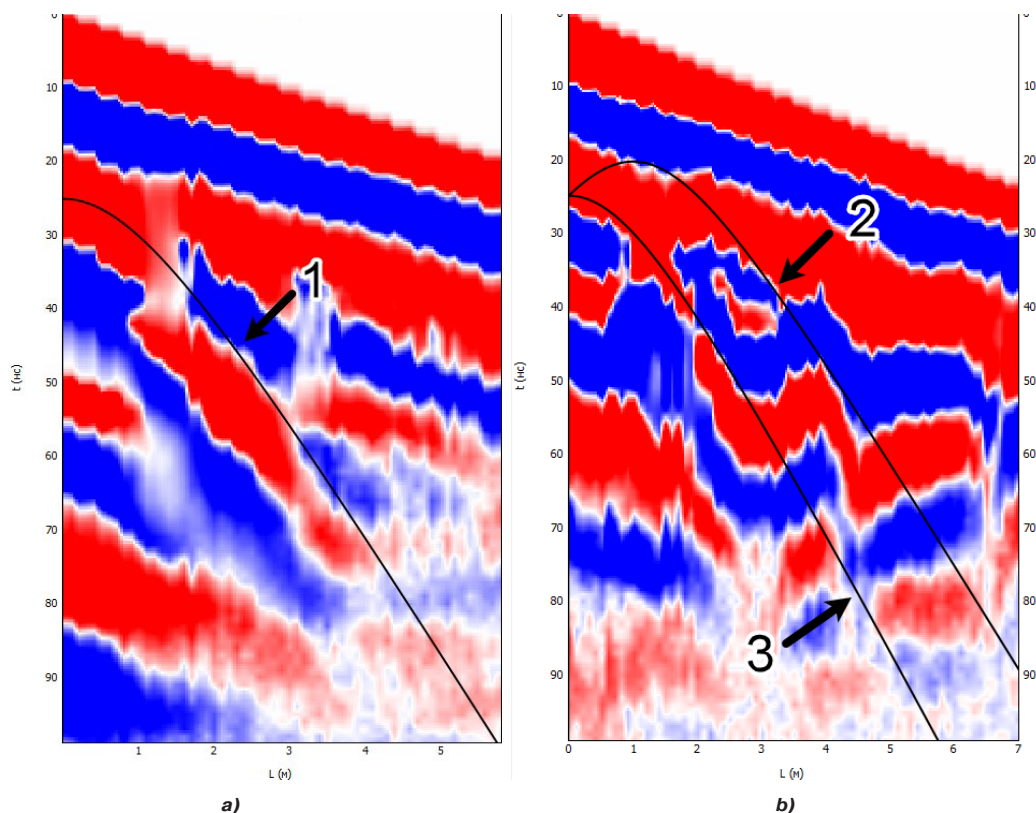
The depth of the GPR section in the slope zones turned out to be lower. There were «blind» zones, in which it was not possible to determine the position of the boundaries outside the main ground. Control drilling was performed only on the ground of the foundation. To determine the velocity characteristics of soils under the surface of the slopes, the proposed method was applied.

On the transverse profile (Pic. 7), GPR multi-offset profiling was performed in two versions.

In the first variant, the test was carried out on a berm, with a step of 10 cm. In the second



Pic. 8. Conducting GPR multi-offset profiling on a berm slope (provided by the authors).



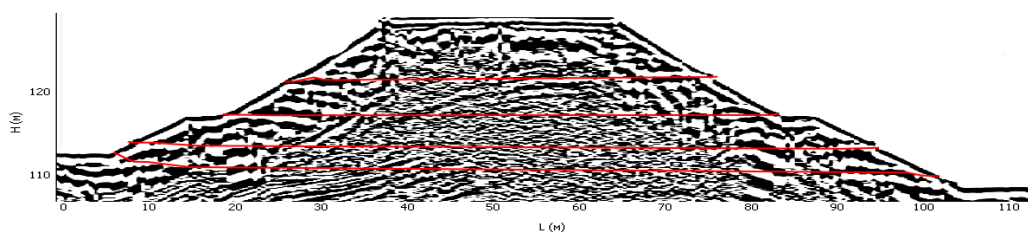
Pic. 9. Radarograms obtained by GPR multi-offset profiling: a – first section, b – second section; 1, 2, 3 – hyperbolic hodograph curves of reflected waves (compiled by the authors).

variant, the test was carried out along the slope of the berm (Pic. 8); initially, the GPR antennas were located close to each other on the edge of the berm, then the transmitting antenna was

moved away from the receiving antenna in the direction towards the bottom of the slope with a step of 10 cm.

The resulting radarograms are shown in Pic. 9.





Pic. 10. An example of processing the transverse profile of an embankment with a height of 17 m. The division of the section into boundaries with similar velocity characteristics is given (compiled by the authors).

When calculating the hodograph on the berm, the traditional method of velocity analysis was used. As a result of its use, it was obtained that propagation velocity of radio waves was 0,06 m/ns, the thickness of the layer was 0,756 m.

When calculating hodographs on the berm slope, it was found that there are two types of hyperbolic outlines. One of them (Pic. 9, 2) corresponds to an inclined boundary (with a displaced top), the other (Pic. 9, 3) – to a boundary parallel to the slope. The calculation for the first hodograph was carried out according to the traditional method of velocity analysis, the calculation for the second one was executed according to the method proposed in the work.

The calculation results for the inclined boundary are, respectively: propagation speed of radio waves – 0,069 m/ns; the angle of inclination of the layer – 35,43°; layer thickness – 0,863 m. Calculation results along the horizontal boundary: radio wave propagation speed – 0,058 m/ns; layer thickness – 0,72 m. Velocity characteristics are within the range of 0,058–0,069 m/ns, which corresponds to the soil in a wet condition.

The results obtained made it possible to determine the layers in the lower part of the surveyed embankment (Pic. 10). On the radarogram, tied to the marks of the transverse profile of the embankment, it was possible to plot the boundaries of soils, to trace their position in the middle part of the foundation, until reaching the opposite slope.

Due to propagation of radio waves in the soils, calculated using the proposed method, layers in a wet condition were identified and weak zones in the embankment were revealed.

The work performed has shown that the proposed method can be expanded and supplemented with a simplified method for determining the velocity characteristics of soils

of the slope zone by recalculating the preliminary geometry of the layer boundaries obtained directly in the field conditions. It is also planned to use RFID tags embedded in the roadbed at the time of its construction.

Conclusions. The GPR method is widely used to survey transport infrastructure facilities. The problems solved by this method are diverse, so there is a need to develop new approaches to their solution. The proposed method for determining propagation speed of radio waves in soils in «blind zones» allows obtaining the speed characteristics of soils in the slope zones of embankments. The area of such zones can be up to 60 % of the total cross-sectional area of the embankment, depending on the steepness of slopes.

The developed technique not only expands the scope of application of GPR surveys, but also allows calculating the values of the speed characteristics of soils in slope zones. More reliable and high-quality information obtained as a result of the use of geophysical and traditional survey methods contributes to further improved quality of design decisions, and ensures strength and reliability of transport infrastructure facilities.

REFERENCES

1. Vladov, M. R., Starovoitov, A. V. Introduction to geo-radiolocation [*Vvedenie v georadiolokatsiyu*]. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 2004, 153 p. [Electronic resource]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-vladov-ml-starovoitov-av-vvedenie-v-georadiolokatsiyu-mmgu-2004rutk155sgsp.pdf>. Last accessed 26.10.2020.
2. Pupatenko, V. V., Suhobok, Yu. A. Lithological Profiling with Ground-Penetrating Radar. *World of Transport and Transportation*, 2013, Vol. 11, Iss. 3, pp. 154–161. [Electronic resource]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/395>. Last accessed 26.10.2020.
3. Pupatenko, V. V., Sukhobok, Y. A., Stoyanovich, G. M. Lithological Profiling of Rocky Slopes using GeoReader Software Based on the Results of Ground Penetrating Radar Method. *Procedia Engineering. Transportation Geotechnics and Geoecology, TGG 2017*, Saint Petersburg, Russia, 2017, Vol. 189, pp. 643–649. [Electronic resource]: <https://www.researchgate.net/>

publication/317192027_Lithological_Profiling_of_Rocky_Slopes_using_GeoReader_Software_Based_on_the_Results_of_Ground_Penetrating_Radar_Method/fulltext/592c1845a6fdcc44435e788d/Lithological-Profiles-of-Rocky-Slopes-using-GeoReader-Software-Based-on-the-Results-of-Ground-Penetrating-Radar-Method.pdf. Last accessed 26.10.2020. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.102.

4. Pupatenko, V. V., Sukhobok, Y. A., Stoyanovich, G. M., Stetsyuk, A. E., Verkhovtsev, L. R. GPR data interpretation in the landslides and subgrade slope surveys. *Selected issues, MATEC Web of Conferences, 2019*, Vol. 265, 03003. [Electronic resource]: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/14/mateconf_gccets2018_03003.pdf. Last accessed 26.10.2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926503003>.

5. Stoyanovich, G. M., Pupatenko, V. V., Sukhobok, Yu. A. Search for buried ice by GPR during reconstruction of railways [*Poisk pogrebennykh ldov metodom georadiolokatsii pri rekonstruktsii zheleznykh dorog*]. Second International Symposium of roadbed in cold regions: Proceedings of the Symposium (Novosibirsk, September 24–26, 2015). Ed. by prof. A. L. Isakov and prof. Ts. K. Liu. Novosibirsk, SGUPS publ., 2015, pp. 78–83. [Electronic resource]: <https://drive.google.com/file/d/1sCvvgXDSUwAjwKMKVPClHqEEK9kK98Q/view>. Last accessed 26.10.2020.

6. Ground Penetrating Radar. Ed. by David J. Daniels. London, The Institution of Electrical Engineers, 2004, 734 p. DOI: 10.1049/PBRA015E.

7. Questions of subsurface radar location: Collective monograph [*Voprosy podpoverkhnostnoi radiolokatsii*]. Ed. by A. Yu. Grinev. Moscow, Radiotekhnika publ., 2005, 416 p. [Electronic resource]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-grinev-ayu-red-voprosy-podpoverkhnostnoj-radiolokatsii-mradiotekhnika-2005ruk3.pdf>. Last accessed 26.10.2020.

8. Popov, S. V. Determination of dielectric constant from traveltime curves of diffracted waves in the framework of a model of an inclined-layered medium [*Opredelenie dielektricheskoi pronicayemosti po godografam diffragirovannykh voln v ramkakh modeli naklonno-sloistoi sredy*]. *Cryosphere of the Earth*, 2017, Vol. 21, Iss. 3, pp. 83–87. [Electronic resource]: <https://docplayer.ru/85796845-Opredelenie-dielektricheskoy-proniceayemosti-po-godografam-diffragirovannykh-voln-v-ramkah-modeli-naklonno-sloistoy-sredy.html>. Last accessed 26.10.2020.

9. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Ed. by H. M. Jol. Amsterdam, Elsevier Science, 2009, 508 p. [Electronic resource]: <http://bookfi.net/book/698213>. Last accessed 26.10.2020.

10. Starovoitov, A. V. Interpretation of ground-penetrating radar data: study guide [*Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh: Uchebnoe posobie*]. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 2008, 192 p. [Electronic resource]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-interpretatsiya-georadiolokatsionnykh-dannykh.pdf>. Last accessed 26.10.2020.

11. Bricheva, S. S. Development of methods for studying cryogenic objects using GPR. Ph.D. (Geological and mineral sciences) thesis [*Razrabotka metodiki izucheniya kriogennykh ob'ektov pri pomoshchi georadiolokatsii. Dis... na soiskanie uchenoi stepeni kand. geologo-mineral. nauk*]. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 2018, 169 p. [Electronic resource]: <https://istina.msu.ru/download/102445811/14>

myB:4rMolFBksN6A7nUkgfjcfLhA50g/. Last accessed 26.10.2020.

12. Forte, E., Pipan, M. Review of multi-offset GPR applications: Data acquisition, processing and analysis. *Signal Processing*, 2017, Vol. 132, pp. 210–220. [Electronic resource]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168416300494?via%3Dihub>. Last accessed 26.10.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.04.011>.

13. Dix, C. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 1955, Vol. 20, No. 1, pp. 68–86. [Electronic resource]: <https://ru.scribd.com/document/260551160/Seismic-Velocities-From-Surface-Measurements-C-Hewitt-Dix>. Last accessed 26.10.2020.

14. Seismic Survey: Geophysics Handbook [*Seismorazvedka: Spravochnik geofizika*]. Ed. by I. I. Gurvich, V. P. Nomokonov. Moscow, Nedra publ., 1981, 464 p. [Electronic resource]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-seismorazvedkaspravochnik-geofizikapod-red-gurvicha-nomokonova-mnedra.djv>. Last accessed 26.10.2020.

15. Forte, E., Dossi, M., Pipan, M., Colucci, R. R. Velocity analysis from common offset GPR data inversion: theory and application to synthetic and real data. *Geophysical Journal International*, 2014, Iss. 297, pp. 1471–1483. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Renato_Colucci2/publication/262980200_Velocity_analysis_from_common_offset_GPR_data_inversion_Theory_and_application_to_synthetic_and_real_data/links/559be0c408ae0035df2336dc/Velocit-analysis-from-common-offset-GPR-data-inversion-Theory-and-application-to-synthetic-and-real-data.pdf. Last accessed 26.10.2020. DOI: 10.1093/gji/ggu103.

16. Saarenketo, T., Scullion, T. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, Vol. 43, Iss. 2–4, pp. 119–138. [Electronic resource]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092698519900052X?via%3Dihub>. Last accessed 26.10.2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X).

17. Sukhobok, Yu. A., Kurbatov, M. S. GeoReader software for information modeling of georadar data [*Programmiy kompleks dlya informatsionnogo modelirovaniya georadarnykh dannykh GeoReader*]. *CAD and GIS of highways*, 2019, Iss. 2 (13), pp. 26–31. [Electronic resource]: [http://www.cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2\(13\)-04.Sukhobok-Kurbatov\(GeoReader\).pdf](http://www.cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2(13)-04.Sukhobok-Kurbatov(GeoReader).pdf). Last accessed 26.10.2020. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.2.4.

18. Yilmaz, O. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2001, Vol. 1, 1028 p. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>

19. Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis, I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar. *Computer Physics Communications*, 2016, Vol. 209, pp. 163–170. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Antonios_Giannopoulos2/publication/308044720_gprMax_Open_source_software_to_simulate_electromagnetic_wave_propagation_for_Ground_Penetrating_Radar/links/57eb070208ae5d93a4815e1b/gprMax-Open-source-software-to-simulate-electromagnetic-wave-propagation-for-Ground-Penetrating-Radar.pdf. Last accessed 26.10.2020. DOI: 10.1016/j.cpc.2016.08.020.

Acknowledgments. The publication was carried out as part of a grant from JSC Russian Railways for development of scientific and pedagogical schools in the field of railway transport.





Особенности расчёта характеристик энергетических комплексов, использующих низкопотенциальную энергию



Артур ДМИТРЕНКО



Мария КОЛОСОВА

*Дмитренко Артур Владимирович – Российский университет транспорта, Москва, Россия.
Колосова Мария Александровна – Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

Развитие стационарной энергетики представляется важным аспектом внедрения энергосберегающих технологий на транспорте. В России оно обусловлено основными положениями Энергетической стратегии Российской Федерации до 2030 года. В связи с этим актуальной является задача эффективного использования низкопотенциальной теплоты на основе органического цикла Ренкина (ОЦР) в стационарных энергетических комплексах транспорта. В частности, эта задача характерна для котельных, переводимых с мазутного топлива на газ. В этом случае эффективность применения ОЦР в первую очередь будет определяться эффективностью используемых теплообменных аппаратов (ТА) с фазовым переходом, вследствие чего как технически, так и теоретически будет представлять большой интерес задача проектирования и расчёта оптимальных характеристик этих ТА.

В статье представлена расчётно-теоретическая модель переноса тепла при фазовых

переходах в турбулентных потоках на основе соотношений, полученных стохастической теорией гидродинамики и теплообмена. Рассматривается моделирование влияния турбулентности при фазовом переходе при неразвитом кипении пузырькового режима. Результаты сравнения показывают удовлетворительное соответствие значений по формуле, полученной на основе стохастических уравнений, со значениями, рассчитанными по эмпирической формуле для течения в трубе, применяемой в инженерной методике проектирования теплообменных аппаратов. Полученные результаты открывают перспективу исследования процессов переноса тепла при фазовых переходах в турбулентных потоках ТА с целью уменьшения их габаритно-массовых характеристик, а также роста энергетической эффективности как самих аппаратов, так эффективности всего энергетического комплекса.

Ключевые слова: транспорт, энергетический комплекс, теплопередача, неразвитое кипение, цикл Ренкина, стохастические уравнения, пузырьковый режим.

*Информация об авторах:

Дмитренко Артур Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики железнодорожного транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, ammsv@yandex.ru.

Колосова Мария Александровна – аспирант кафедры теплоэнергетики железнодорожного транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, m.a.kolosova@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 19.10.2020, принята к публикации 27.12.2020.

For the English text of the article please see p. 113.

ВВЕДЕНИЕ

Важность внедрения энергосберегающих технологий на транспорте определяет вектор развития стационарной энергетики транспорта. В частности, актуальной проблемой является эффективное использование низкопотенциальной теплоты в стационарных транспортных энергетических комплексах на основе органического цикла Ренкина (ОЦР). Эта задача характерна для котельных стационарной энергетики транспорта, эффективность которых во многом определяется теплообменными аппаратами, обеспечивающими функционирование энергокомплекса.

Создание новых компактных теплообменных аппаратов, как известно, сосредоточено на поиске не только различных инженерных решений [1; 2] по увеличению их эффективности, но и новых путей развития теории турбулентности, использование различных идей для описания которой представлено в [3–20]. В связи с этим модернизация объектов стационарной энергетики в России в основном, но не полностью, соответствует основным ориентирам энергетической системы, которая должна удовлетворять требованиям энергетической стратегии Российской Федерации до 2030 года: энергетическая безопасность; энергетическая эффективность экономики; бюджетная эффективность энергетики; экологическая безопасность энергетики [21; 22]. А именно, направление экологической безопасности и энергетической эффективности не полностью использует потенциал инноваций ввиду имеющихся на сегодняшний момент возможностей утилизации энергии выхлопных газов котельной с последующим образованием замкнутого энергетического цикла.

Внимание этой проблеме уделяется и в других странах [23; 24], где рассматриваются принципиальные схемы энергетических комплексов на основе органического цикла Ренкина.

В связи с этим методы теоретико-расчётного исследования процесса теплообмена при фазовых переходах остаются в центре внимания при проектировании компактных теплообменных аппаратов, утилизирующих низкопотенциальную энергию, ввиду проблемы учёта многопараметрических процессов и их взаимного влияния. Несмотря на численные методологии на

основе статистических методов RANS, LES и DNS [25; 26], остаются важными и инженерные методологии, базирующиеся на эмпирических и полуэмпирических соотношениях. Это особенно актуально ввиду результатов, полученных на базе стохастической теории турбулентности. Теория стохастической турбулентности [27–47], основанная на стохастических уравнениях и теории эквивалентных мер, позволяет получить аналитические зависимости для первого и второго критических чисел Рейнольдса [27–31], профилей усреднённых полей скорости и температуры [32–34], коэффициентов трения и теплоотдачи [35–38], корреляций второго порядка, [39–41], корреляционной размерности аттракторов [42; 43], спектральных функций [46; 47]. Такие результаты позволяют изучить задачу по учёту параметров влияния турбулентности на процесс переноса тепла в потоке при наличии фазовых превращений [44; 45]. Подчеркнём, что моделирование гидравлических потерь при пузырьковом режиме течения с учётом характеристик турбулентности потока исследовалось в работах [46; 47].

Цель статьи — представить расчётно-теоретическую модель переноса тепла при фазовых переходах в турбулентных потоках на основе соотношений, полученных стохастической теорией гидродинамики и теплообмена. Рассматривается моделирование влияния турбулентности при фазовом переходе при неразвитом кипении пузырькового режима.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. ПЕРЕНОС ТЕПЛА ПРИ НЕРАЗВИТОМ РЕЖИМЕ КИПЕНИЯ

В инженерной практике моделирование переноса тепла при фазовых переходах на пузырьковом режиме описывается коэффициентом теплоотдачи [25; 26]. Как известно, в экономайзерной области выделяют: область конвективного теплообмена; область неразвитого поверхностного кипения; участок развитого поверхностного кипения. В испарительной области выделяют: область развитого кипения; область ухудшенного теплообмена. В пароперегревательной области имеется один расчётный участок — конвективного теплообмена. В данной работе рассмотрим движение в вертикальной



Таблица 1

Результаты расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от стенки круглой трубы к воде (расчёты авторов)

Re	Re ^{0,8}	Re ^{7/8}	Nu _d , уравнение (5)	Nu _d , уравнение (6)
10 ⁴	1585	3163	57	76,95
5 • 10 ⁴	5743	12930	228	279
10 ⁵	10000	23717	420	485
5 • 10 ⁵	36239	96961	1716	1757
10 ⁶	63095	177827	3152	3063

Таблица 2

Результаты расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от воды к стенке трубы (расчёты авторов)

Re	Re ^{0,8}	Re ^{7/8}	Nu _d , уравнение (6)	Nu _d , уравнение (5)
10 ⁴	1585	3163	32	43
5 • 10 ⁴	5743	12930	130	156
3 • 10 ⁵	24082	62012	620	655
10 ⁶	63095	177827	1778	1715
5 • 10 ⁶	228652	727107	7271	6219

трубе на экономайзерном участке в области неразвитого поверхностного кипения. За начало области неразвитого поверхностного кипения следует принять сечение, в котором $t_{ст} = t_s$. Коэффициент теплоотдачи в зоне неразвитого кипения может быть рассчитан по формуле:

$$\alpha_{н.к.} = \alpha_k + \left[\frac{q}{\frac{q}{\alpha_{р.к.}} - \frac{x_{р.к.} r}{\alpha_0}} - \alpha_k \right] \left[\frac{x - x_{н.к.}}{x_{р.к.} - x_{н.к.}} \right], \quad (1)$$

где α_k — коэффициент теплоотдачи при течении однофазного потока в трубе;

α_0 — коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объёме;

$\alpha_{р.к.}$ — коэффициент теплоотдачи в зоне развитого кипения;

q — плотность теплового потока;

r — удельная теплота парообразования;

x — текущее значение относительной энтальпии рабочего тела;

$x_{н.к.}$ — относительная энтальпия рабочего тела, при которой начинается неразвитое кипение;

$x_{р.к.}$ — относительная энтальпия рабочего тела, соответствующая началу развитого поверхностного кипения.

Величина относительной энтальпии потока в этом сечении определяется для продольного внутреннего и внешнего обтекания теплообменных труб:

$$x_{н.к.} = - \frac{qc_p}{\alpha_k r}. \quad (2)$$

Для течения внутри трубы и внутри кольцевых каналов в диапазоне режимных параметров $p = 2,9 \div 19,6$ МПа; $\rho w = 1000 \div 5500$ кг/(м² • с); $q = 0,7 \div 1,7$ МВт/м².

$$x_{р.к.} = -140 \left(\frac{q}{r(\rho w)_{см}} \right)^{1,1} \left(\frac{(\rho w)_{см} d}{\mu_1} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{-0,2}. \quad (3)$$

Индексы 1 и 2 — соответственно относятся к жидкости, пару;

ρ — плотность;

$w_{см}$ — скорость двухфазного потока.

2. ПЕРЕНОС ТЕПЛА ПРИ ТЕЧЕНИИ ОДНОФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ

Запишем вначале выражение для α_0 — коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объёме (при этом p — давление). Для воды — это $\alpha_0 = 4,34 q^{0,7} \cdot (p^{0,14} + 1,37 \cdot 10^{-2} p^2)$ [29]. При неразвитом кипении и вынужденном турбулентном течении вблизи стенки трубы он, так же, как и коэффициент теплоотдачи при развитом кипении $\alpha_{р.к.}$, как известно [28; 29], играет незначительную роль, по сравнению с величиной коэффициента теплоотдачи при вынужденном течении однофазного потока в трубе α_k . Известно [5; 6], что α_k для однофазной жидкости на турбулентном режиме в диапазонах $0,6 < Pr < 200$, $10^4 < Re_d < 5 \cdot 10^6$ определяется зависимостью:

$$\left\langle \alpha_k = \frac{\lambda Nu}{d} \right\rangle, \quad (4)$$

$$Nu = 0,021 Pr_L^{0,43} Re_d^{0,8} (Pr_L / Pr_w)^{0,25}, \quad (5)$$

где Nu , Pr , Re — числа Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса, индексы L , W — относятся к ядру потока и на стенке;

d — диаметр трубы;

λ — теплопроводность.

Как следует из сопоставления [12–15], отклонение результатов расчёта по зависимости (5) и иных зависимостей для числа Нуссельта с экспериментальными распределениями может составлять $\pm 25\%$. Как отмечено в [3–16], такой разброс может быть объяснён в первую очередь влиянием степени турбулентности и её масштабом, по зависимости:

$$\left\langle Nu_d = 0.2 \left[\left(\frac{\sqrt{E_{st}}}{U_0} \right) Re_d \right]^{(7/8)} \left[(Pr)^{7/12} \right] \right\rangle. \quad (6)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Сравнение результатов расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от стенки круглой трубы к воде дано в табл. 1.

Сравнение результатов расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от воды к стенке трубы представлено в табл. 2.

Таким образом, учёт параметров турбулентности по формуле (6) даёт возможность с большой достоверностью определять перенос тепла при фазовом переходе на пузырьковом режиме по формулам (1), (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена модернизированная модель неразвитого кипения в трубах теплообменных аппаратов, предназначенных для использования низкопотенциальной теплоты на основе органического цикла Ренкина для уже модернизированных котельных, переводимых с мазутного топлива на газ. Результаты сравнения показывают удовлетворительное соответствие значений по формуле (6), полученной на основе стохастических уравнений, со значениями, рассчитанными по эмпирической формуле (5) для течения в трубе, применяемой в инженерной методике проектирования теплообменных аппаратов. Полученные результаты открывают перспективу исследования процессов переноса тепла при фазовых переходах в турбулентных потоках по формулам (1), (2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kalinin, E. K., Dreitser, G. A., Kopp, I. Z., Myakochin, A. S. Efficient Surfaces for Heat Exchangers. Fundamentals and Design. New-York, 2002, 392 p.
2. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Ненарокомов А. В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. — М.: Янус-К, 2009. — 300 с.
3. Ландау Л. Д. К проблеме турбулентности // ДАН СССР. — 1944. — Т. 44. — № 8. — С. 339–342.
4. Колмогоров А. Н. Новый метрический инвариант транзитивных динамических систем и автоморфизмов пространств Лебега // ДАН СССР. — 1958. — Т. 119. — № 5. — С. 861–864.
5. Колмогоров А. Н. Об энтропии на единицу времени как метрическом инварианте автоморфизмов // ДАН СССР. — 1959. — Т. 124. — № 4. — С. 754–755.
6. Колмогоров А. Н. Математические модели турбулентного движения несжимаемой вязкой жидкости // УМН. — 2004. — Т. 59. — Вып. 1 (355). — С. 5–10.
7. Lorenz, E. N. Deterministic nonperiodic flow. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, Vol. 20, pp. 130–141. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2). Доступ 19.10.2020.
8. Ruelle, D., Takens, F. On the nature of turbulence. Communications in Mathematical Physics, 1971, Vol. 20, pp. 167–192. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01646553>. (Erratum Vol. 23, pp. 343–344. <https://doi.org/10.1007/BF01893621>). Доступ 19.10.2020.
9. Feigenbaum, M. The transition to aperiodic behavior in turbulent systems. Communications in Mathematical Physics, 1980, Vol. 77, pp. 65–86. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01205039>. Доступ 19.10.2020.
10. Рабинович М. И. Стохастические автоколебания и турбулентность // УФН. — 1978. — Т. 125. — № 1. — С. 123–168.
11. Монин А. С. О природе турбулентности // УФН. — 1978. — Т. 125. — № 1. — С. 97–122.
12. Рабинович М. И., Сушик М. М. Когерентные структуры в турбулентных течениях. Нелинейные волны. Самоорганизация / Под ред. А. В. Гапонова и М. И. Рабиновича. — М.: Наука, 1983. — С. 58–84.
13. Заславский Г. М. Стохастичность динамических систем. — М.: Наука, 1984. — 272 с.
14. Струминский В. В. Возникновение турбулентности // ДАН СССР. — 1989. — Т. 307. — № 3. — С. 564–567.
15. Самарский А. А., Мажукин В. И., Матус П. П., Михайлик И. А. Z/2-консервативные схемы для уравнения Кортевега–де Фриса // ДАН. — 1997. — Т. 357. — № 4. — С. 458–461.
16. Климонтович Ю. Л. Проблемы статистической теории открытых систем: критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации // УФН. — 1989. — Т. 158. — Вып. 1. — С. 59–91. DOI: [10.3367/UFNr.0158.198905b.0059](https://doi.org/10.3367/UFNr.0158.198905b.0059). Доступ 19.10.2020.
17. Sreenivasan, K. R. Fractals and multifractals in fluid turbulence. Ann. Rev. Fluid Mech., 1991, Vol. 23, pp. 539–600.
18. Orzag, S. A., Kells, L. C. Transition to turbulence in plane Poiseuille and plane Couette flow. Journal of Fluid Mechanics, 1980, Vol. 96 (1), pp. 159–205. DOI: [10.1017/S0022112080002066](https://doi.org/10.1017/S0022112080002066). Доступ 19.10.2020.
19. Priymak, V. G. Splitting dynamics of coherent structures in a transitional round-pipe flow. Dokl. Phys., 2013, Vol. 58, Iss. 10, pp. 457–465.
20. Фурсиков А. В. Моментная теория для уравнений Навье — Стокса со случайной правой частью // Изв. РАН. Сер. матем. — 1992. — Т. 56. — № 6. — С. 1273–1315.
21. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской



Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-п. — М., 2009. — 144 с.

22. Энергетическая стратегия России до 2035 года. Корректировка. — М., 2014. — 25 с.

23. Energy Use, Loss and Opportunities Analysis: US Manufacturing and Mining. US Department of Energy Industrial Technologies Program, 2004, 165 p. [Электронный ресурс]: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/energy_use_loss_opportunities_analysis.pdf. Доступ 19.10.2020.

24. Chudnovsky, Y., Gotovsky, M., Greenman, M. [et al]. Integrated Steam/Organic Rankine Cycle (ISORC) for Waste Heat Recovery in Distributed Generation and Combined Heat and Power Production, Paper No: IHTC14-22704, pp. 77–81. Proc. of IHTC-14, Washington, 2010. DOI: 10.1115/IHTC14-22704. Доступ 19.10.2020.

25. Hinze, J. O. Turbulence, 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1975, 790 p.

26. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory. 6th ed., New York, McGraw-Hill, 1979, 838 p.

27. Dmitrenko, A. V. Equivalence of measures and stochastic equations for turbulent flows. Doklady Physics, 2013, Vol. 58, Iss. 6, pp. 228–235. DOI: 10.1134/S1028335813060098. Доступ 19.10.2020.

28. Dmitrenko, A. V. Calculation of pressure pulsations for a turbulent heterogeneous medium. Doklady Physics, 2007, Vol. 52, Iss. 7, pp. 384–387. DOI: 10.1134/S1028335807120166. Доступ 19.10.2020.

29. Dmitrenko, A. V. Some analytical results of the theory of equivalence measures and stochastic theory of turbulence for non-isothermal flows. Advanced Studies in Theoretical Physics, 2014, Vol. 8, Iss. 25, pp. 1101–1111. DOI: 10.12988/astp.2014.49131. Доступ 19.10.2020.

30. Dmitrenko, A. V. Analytical estimation of velocity and temperature fields in a circular pipe on the basis of stochastic equations and equivalence of measures. J. Eng. Phys. Thermophys, 2015, Vol. 88, Iss. 6, pp. 1569–1576. DOI: 10.1007/s10891-015-1344-x. Доступ 19.10.2020.

31. Dmitrenko, A. V. Determination of critical Reynolds numbers for non-isothermal flows with using stochastic theories of turbulence and equivalent measures. Heat Transfer Research, 2015, Vol. 47, Iss. 1, pp. 338–399. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2015014191. Доступ 19.10.2020.

32. Dmitrenko, A. V. An estimation of turbulent vector fields, spectral and correlation functions depending on initial turbulence based on stochastic equations. The Landau fractal equation. Int J Fluid Mech Res., 2016, Vol. 43, Iss. 3, pp. 82–91. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v43.i3.60. Доступ 19.10.2020.

33. Dmitrenko, A. V. The theory of equivalence measures and stochastic theory of turbulence for non-isothermal flow on the flat plate. Int J Fluid Mech Res., 2016, Vol. 43, Iss. 2, pp. 182–187. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v43.i2.60. Доступ 19.10.2020.

34. Dmitrenko, A. V. Stochastic equations for continuum and determination of hydraulic drag coefficients for smooth flat plate and smooth round tube with taking into account intensity and scale of turbulent flow. Continuum Mechanics and Thermodynamics, Vol. 29, Iss. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00161-016-0514-1. Доступ 19.10.2020.

35. Dmitrenko, A. V. Analytical determination of the heat transfer coefficient for gas, liquid and liquid metal flows in the tube based on stochastic equations and equivalence of measures for continuum. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2017, Vol. 29, Iss. 6, pp. 1197–1206. DOI: 10.1007/s00161-017-0566-x. Доступ 19.10.2020.

36. Dmitrenko, A. V. Estimation of the critical Rayleigh number as a function of an initial turbulence in the boundary layer of the vertical heated plate. Heat Transfer Research, 2017, Vol. 48, Iss. 13, pp. 1195–1202. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2017018750. Доступ 19.10.2020.

37. Dmitrenko, A. V. Determination of the Coefficients of Heat Transfer and Friction in Supercritical-Pressure Nuclear Reactors with Account of the Intensity and Scale of Flow Turbulence on the Basis of the Theory of Stochastic Equations and Equivalence of Measures. J. Eng. Phys. Thermophys, 2017, Vol. 90, Iss. 4, pp. 1288–1294. DOI: 10.1007/s10891-017-1685-8. Доступ 19.10.2020.

38. Dmitrenko, A. V. Regular Coupling between Deterministic (Laminar) and Random (Turbulent) Motions—Equivalence of Measures. Scientific Discovery 2013, Diploma No. 458, registration No. 583 of December 2.

39. Дмитренко А. В. Теория эквивалентных мер и множеств с повторяющимися, счётными фрактальными элементами. Стохастическая термодинамика и турбулентность. Коррелятор «Детерминированность—случайность»: Монография. — М.: Галлея-Принт, 2013. — 226 с.

40. Dmitrenko, A. V. Fundamentals of heat and mass transfer and hydrodynamics of single-phase and two-phase media. Criterial integral statistical methods and direct numerical simulation. Moscow, Galleya print, 2008, 398 p.

41. Dmitrenko, A. V. Uncertainty relation in turbulent shear flow based on stochastic equations of the continuum and the equivalence of measures. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2019. DOI: 10.1007/s00161-019-00784-0. Доступ 19.10.2020.

42. Dmitrenko, A. V. Formation of a turbulence spectrum in the inertial interval on the basis of the theory of stochastic equations and equivalence of measures. J. Eng. Phys. Thermophys, 2020, Vol. 93, Iss. 5, pp. 122–127. DOI: 10.1007/s10891-020-02098-4. Доступ 19.10.2020.

43. Dmitrenko, A. V. The correlation dimension of an attractor determined on the base of the theory of equivalence of measures and stochastic equations for continuum. Continuum Mechanics and Thermodynamics, Vol. 32, Iss. 2, pp. 63–74. DOI: 10.1007/s00161-019-00784-0. Доступ 19.10.2020.

44. Дмитренко А. В. Современные аспекты стохастической теории гидродинамики // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 20–24 августа 2019. — Сб. трудов. — Т. 2. — С. 339–341.

45. Дмитренко А. В., Колосова М. А. Определение гидравлических характеристик промышленных агрегатов на основе стохастической теории гидродинамики // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 20–24 августа 2019. — Сб. трудов. — Т. 2. — С. 342–343.

46. Dmitrenko, A. V., Kolosova, M. A. The possibility of using low-potential heat based on the organic Rankine cycle and determination of hydraulic characteristics of industrial units based on the theory of stochastic equations and equivalence of measures. JP Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, Vol. 21, Iss. 1, pp. 11–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.17654/HM021010200>. Доступ 19.10.2020.

47. Dmitrenko, A. V. Theoretical solutions for spectral function of the turbulent medium based on the stochastic equations and equivalence of measures. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00161-020-00890-4>. Доступ 19.10.2020.

48. Данилова Г. Н., Богданов С. Н., Иванов О. П., Медникова Н. М., Крамской Э. И. Теплообменные аппараты холодильных установок // Под ред. д.т.н. Г. Н. Даниловой. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. — 303 с.

49. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчётам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 360 с. ●



Features of Calculating the Characteristics of Energy Complexes Using Low-Grade Energy

**Arthur V. DMITRENKO****Maria A. KOLOSOVA**

Dmitrenko, Arthur V., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Kolosova, Maria A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

ABSTRACT

The development of stationary energy seems to be an important aspect of introduction of energy-saving technologies in transportation sector. In Russia, it is conditioned by the main provisions of the Energy Strategy of the Russian Federation until 2030. In this regard, the problem of efficient use of low-grade heat based on the organic Rankine cycle (ORC) in stationary heat energy supply units in the transport industry is urgent. In particular, this task is typical for boiler houses converted from heavy fuel oil to gas fuel. In this case, the efficiency of ORC application will primarily be determined by the efficiency of the used heat exchangers (HE) with a phase transition, as a result of which, both technically and theoretically, the problem of designing and calculating the optimal characteristics of these HE will be of great interest.

The article presents a theoretical and computational model of heat transfer during phase transitions in turbulent flows based on the relations obtained by the stochastic theory of hydrodynamics and heat transfer. The modelling of the effect of turbulence during the phase transition with undeveloped boiling of the bubble mode is considered. The comparison results show satisfactory conformity of the values obtained according to the formula based on stochastic equations with the values calculated according to the empirical formula for the flow in a pipe, used in the engineering method of designing heat exchangers. The results obtained open the prospect for studying the processes of heat transfer during phase transitions in turbulent flows of HE to reduce their overall and mass characteristics, as well as to increase the energy efficiency of both the devices themselves and the efficiency of the entire energy complex.

Keywords: transport, energy complex, heat transfer, undeveloped boiling, Rankine cycle, stochastic equations, bubble mode.

*Information about the authors:

Dmitrenko, Artur V. – D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Heat Power Engineering of Railway Transport of Russian University of Transport, Moscow, Russia, ammsv@yandex.ru.

Kolosova, Maria A. – Ph.D. student at the Department of Heat Power Engineering of Railway Transport of Russian University of Transport, Moscow, Russia, m.a.kolosova@yandex.ru.

Article received 19.10.2020, accepted 27.12.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 108.

Background.

The importance of introducing energy-saving technologies in transport determines the vector of development of stationary energy in this sector. In particular, efficient use of low-grade heat in stationary transport energy units based on the organic Rankine cycle (ORC) is quite relevant. This task is typical of boiler houses of stationary power engineering units of transport, the efficiency of which is largely determined by heat exchangers that ensure functioning of the energy complex.

The creation of new compact heat exchangers, as it is known, is focused not only on the search for various engineering solutions [1; 2] to increase their efficiency, but also on the new ways of developing the theory of turbulence, various ideas of description of its use being presented in [3–20]. In this regard, modernization of stationary energy facilities, e.g., in Russia, basically, but not completely, corresponds to the main guidelines of the energy system, which must meet the requirements of the energy strategy of the Russian Federation until 2030: energy security; energy efficiency of the economy; energy budget efficiency; environmental safety of the energy sector [21; 22]. Namely, the area of environmental safety and energy efficiency does not fully use the innovation capacity of existing possibilities regarding utilizing the energy of exhaust gases from a boiler house with subsequent formation of a closed energy cycle.

Attention is paid to this problem in other countries as well [23; 24], where schematic diagrams of energy complexes based on the organic Rankine cycle are considered.

In this regard, the methods of theoretical and computational study of the heat transfer process during phase transitions remain in the focus of attention when designing compact heat exchangers utilizing low-grade energy, and with regard to the problem of considering multi-parametric processes and their mutual influence. Despite the numerical methodologies based on RANS, LES and DNS statistical methods [25; 26], engineering methodologies based on empirical and semi-empirical relationships remain important. This is especially significant in view of the results obtained based on the stochastic theory of turbulence. The theory of stochastic turbulence [27–47], based on stochastic equations and the equivalent circuit theory, makes it possible to

obtain analytical dependences for the first and second critical Reynolds numbers [27–31], profiles of averaged fields of velocity and temperature [32–34], friction and heat transfer coefficients [35–38], second order correlations, [39–41], correlation dimension of attractors [42; 43], spectral functions [46; 47]. Such results allow us to study the problem of considering the influence of turbulence parameters on the process of heat transfer in the flow in the presence of phase transformations [44; 45]. We emphasize that the modelling of hydraulic losses in the bubble flow mode, considering the characteristics of the flow turbulence, was studied in [46; 47].

The *objective* of the article is to present a theoretical and computational model of heat transfer during phase transitions in turbulent flows based on the relations obtained within the stochastic theory of hydrodynamics and heat transfer. The modelling of the effect of turbulence during the phase transition with undeveloped boiling of the bubble mode is considered.

Results

1. Heat transfer in an undeveloped boiling regime

In engineering practices, modelling heat transfer during phase transitions in the bubble mode is described by the heat transfer coefficient [25; 26]. As it is known, in the economiser area there are: the area of convective heat transfer; area of undeveloped surface boiling; area of developed surface boiling. In the evaporation area, there are: area of developed boiling; area of poor heat transfer. In the steam superheating area, there is a single calculation section of convective heat transfer. Here we will consider the motion in a vertical pipe in the economiser section in the area of undeveloped surface boiling. For the beginning of the area of undeveloped surface boiling, one should take the cross section in which $t_{st} = t_s$. The heat transfer coefficient in the undeveloped boiling area can be calculated by the formula:

$$\alpha_{n.k.} = \alpha_k + \left[\frac{q}{\frac{q}{\alpha_{r.k.}} - \frac{x_{r.k.} r}{\alpha_0}} - \alpha_k \right] \left[\frac{x - x_{n.k.}}{x_{r.k.} - x_{n.k.}} \right], \quad (1)$$

where α_k is heat transfer coefficient for a single-phase flow in a pipe;

α_0 is coefficient of heat transfer during boiling in a large volume;

Table 1

Calculation of Nusselt numbers for the characteristic parameters of turbulent heat transfer from the wall of a circular pipe to water (authors' calculations)

Re	Re ^{0,8}	Re ^{7/8}	Nu _d , equation (5)	Nu _d , equation (6)
10 ⁴	1585	3163	57	76,95
5 • 10 ⁴	5743	12930	228	279
10 ⁵	10000	23717	420	485
5 • 10 ⁵	36239	96961	1716	1757
10 ⁶	63095	177827	3152	3063

Table 2

Calculation of Nusselt numbers for the characteristic parameters of turbulent heat transfer from water to the pipe wall (authors' calculations)

Re	Re ^{0,8}	Re ^{7/8}	Nu _d , equation (6)	Nu _d , equation (5)
10 ⁴	1585	3163	32	43
5 • 10 ⁴	5743	12930	130	156
3 • 10 ⁵	24082	62012	620	655
10 ⁶	63095	177827	1778	1715
5 • 10 ⁶	228652	727107	7271	6219

$\alpha_{r,k}$ is coefficient of heat transfer in the area of developed boiling;

q is heat flux density;

r is specific heat of vaporization;

x is current value of the relative enthalpy of the working fluid;

$x_{n,k}$ is relative enthalpy of the working fluid, at which undeveloped boiling begins;

$x_{r,k}$ is relative enthalpy of the working fluid, corresponding to the beginning of the developed surface boiling.

The value of the relative enthalpy of the flow in this section is determined for the longitudinal internal and external flow around the heat exchange tubes:

$$x_{n,k} = -\frac{qc_r}{\alpha_k r} \quad (2)$$

For the flow inside the pipe and inside the annular channels in the range of operating parameters: $p = 2,9 \div 19,6$ MPa; $\rho w = 1000 \div 5500$ kg/(m² • s); $q = 0,7 \div 1,7$ MW/m².

$$x_{r,k} = -140 \left(\frac{q}{r(\rho w)_{sm}} \right)^{1,1} \left(\frac{(\rho w)_{sm} d}{\mu_1} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{-0,2} \quad (3)$$

Indices 1 and 2 – respectively, refer to liquid, steam;

ρ is density;

w_{sm} is two-phase flow speed.

2. Heat transfer during the flow of a single-phase liquid

Let us first write down the expression for α_0 , heat transfer coefficient during boiling in

a large volume (p is for pressure). For water, this is $\alpha_0 = 4,34 q^{0,7} \cdot (p^{0,14} + 1,37 \cdot 10^{-2} p^2)$ [29]. With undeveloped boiling and forced turbulent flow near the pipe wall, it, as well as the heat transfer coefficient at developed boiling $\alpha_{r,k}$, as it is known [28; 29], plays an insignificant role in comparison with the value of the heat transfer coefficient for the forced flow of a single-phase flow in the pipe α_k . It is known [5; 6] that α_k for a single-phase liquid in a turbulent regime in the ranges $0,6 < Pr < 200$, $10^4 < Re_d < 5 \cdot 10^6$ is determined by the dependence:

$$\alpha_k = \frac{\lambda Nu}{d}, \quad (4)$$

$$Nu = 0,021 Pr_L^{0,43} Re_d^{0,8} (Pr_L / Pr_w)^{0,25}, \quad (5)$$

where Nu , Pr , Re are Nusselt, Prandtl and Reynolds numbers, L , W indices refer to the flow core and that on the wall;

d – pipe diameter;

λ – thermal conductivity.

As follows from the comparison [12–15], the deviation of the calculation results using dependence (5) and other dependences for Nusselt number from experimental distributions can be of 25 %. As noted in [3–16], such a spread can be explained primarily by the influence of the degree of turbulence and its scale, according to the dependence:

$$Nu_d = 0,2 \left[\left(\frac{\sqrt{E_{st}/\rho}}{U_0} \right) Re_d \right]^{(7/8)} [Pr]^{(7/12)}. \quad (6)$$



3. Calculation results

Comparison of the results of calculating Nusselt numbers for the characteristic parameters of turbulent heat transfer from the wall of a circular pipe to water is given in Table 1.

Comparison of the results of calculating Nusselt numbers for the characteristic parameters of turbulent heat transfer from water to the pipe wall is presented in Table 2.

Thus, considering the turbulence parameters according to formula (6) makes it possible to calculate according to formulas (1), (2) with high reliability the heat transfer during the phase transition in the bubble mode.

Conclusion.

A modernised model of undeveloped boiling in tubes of heat exchangers designed to use low-grade heat based on the organic Rankine cycle for already modernised boiler houses converted from fuel oil to gas is so presented. The comparison results show satisfactory conformity of the values obtained according to formula (6) based on stochastic equations, with the values calculated according to the empirical formula (5) for the flow in a pipe, used in the engineering method of designing heat exchangers. The results obtained are promising for studying heat transfer processes during phase transitions in turbulent flows according to formulas (1), (2).

REFERENCES

1. Kalinin, E. K., Dreitser, G. A., Kopp, I. Z., Myakochin, A. S. Efficient Surfaces for Heat Exchangers. Fundamentals and Design. New-York, 2002, 392 p.
2. Alifanov, O. M., Artyukhin, E. A., Nenarokomov, A. V. Inverse problems in the study of complex heat exchange [Obratnie zadachi v issledovanii slozhnogo teploobmena]. Moscow, Yanus-K publ., 2009, 300 p.
3. Landau, L. D. On the problem of turbulence [O probleme turbulentnosti]. DAN SSSR, 1944, Vol. 44, Iss. 8, pp. 339–342.
4. Kolmogorov, A. N. A new metric invariant of transitive dynamical systems and automorphisms of Lebesgue spaces [Novie metricskiy invariant tranzitivnykh dinamicheskikh sistem i avtomorfizmov prostranstv Lebeaga]. DAN SSSR, 1958, Vol. 119, Iss. 5, pp. 861–864.
5. Kolmogorov, A. N. On entropy per unit time as a metric invariant of automorphisms [Ob entropii na edinitsu vremeni kak metricskom invariante avtomorfizmov]. DAN SSSR, 1959, Vol. 124, Iss. 4, pp. 754–755.
6. Kolmogorov, A. N. Mathematical models of turbulent motion of an incompressible viscous fluid [Matematicheskie modeli turbulentnogo dvizheniya neszhimaemoi vyzkoi zhidkosti]. UMN, 2004, Vol. 59, Iss. 1 (355), pp. 5–10.
7. Lorenz, E. N. Deterministic nonperiodic flow. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, Vol. 20, pp. 130–

141. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2). Last accessed 19.10.2020.
8. Ruelle, D., Takens, F. On the nature of turbulence. Communications in Mathematical Physics, 1971, Vol. 20, pp. 167–192. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01646553>. (Erratum Vol. 23, pp. 343–344. <https://doi.org/10.1007/BF01893621>). Last accessed 19.10.2020.
9. Feigenbaum, M. The transition to aperiodic behavior in turbulent systems. Communications in Mathematical Physics, 1980, Vol. 77, Iss. 1, pp. 65–86. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01205039>. Last accessed 19.10.2020.
10. Rabinovich, M. I. Stochastic self-oscillations and turbulence [Stokhasticheskie avtokolebaniya i turbulentnost']. UFN, 1978, Vol. 125, Iss. 1, pp. 123–168.
11. Monin, A. S. On the nature of turbulence [O prirode turbulentnosti]. UFN, 1978, Vol. 125, Iss. 1, pp. 97–122.
12. Rabinovich, M. I., Sushchik, M. M. Coherent structures in turbulent flows. Nonlinear waves. Self-organization [Kogerentnie struktury v turbulentnykh techeniyakh. Nelineinnye volny. Samoorganizatsiya]. Eds. by A. V. Gaponov and M. I. Rabinovich. Moscow, Nauka publ., 1983, pp. 58–84.
13. Zaslavsky, G. M. Stochasticity of dynamical systems [Stokhastichnost' dinamicheskikh sistem]. Moscow, Nauka publ., 1984, 272 p.
14. Struminsky, V. V. The emergence of turbulence [Vozniknovenie turbulentnosti]. DAN SSSR, 1989, Vol. 307, Iss. 3, pp. 564–567.
15. Samarsky, A. A., Mazhukin, V. I., Matus, P. P., Mikhailik, I. A. Z/2-conservative schemes for the Korteweg–de Vries equation [Z/2-konservativnye skhemy dlya uravneniya Kortvega–de Frisa]. DAN, 1997, Vol. 357, Iss. 4, pp. 458–461.
16. Klimontovich, Yu. L. Problems of the statistical theory of open systems: criteria for the relative degree of ordering of states in self-organization processes [Problemy statisticheskoi teorii otkrytykh sistem: kriterii otosielnoi stepeni uporyadochennosti sostoyanii v protsessakh samoorganizatsii]. UFN, 1989, Vol. 158, Iss. 1, pp. 59–91 DOI: 10.3367/UFNr.0158.198905b.0059. Last accessed 19.10.2020.
17. Sreenivasan, K. R. Fractals and multifractals in fluid turbulence. Ann. Rev. Fluid Mech, 1991, Vol. 23, pp. 539–600.
18. Orzag, S. A., Kells, L. C. Transition to turbulence in plane Poiseuille and plane Couette flow. Couette flow. Journal of Fluid Mechanics, 1980, Vol. 96 (1), pp. 159–205. DOI: 10.1017/S0022112080002066. Last accessed 19.10.2020.
19. Priymak, V. G. Splitting dynamics of coherent structures in a transitional round-pipe flow. Dokl. Phys., 2013, Vol. 58, Iss. 10, pp. 457–465.
20. Fursikov, A. V. Moment theory for the Navier–Stokes equations with a random right-hand side [Momentnaya teoriya dlya uravnenii Navie–Stoksa so sluchainoi pravo chastiuyu]. Izv. RAS. Ser. mat., 1992, Vol. 56, Iss. 6, pp. 1273–1315.
21. Energy strategy of Russia for the period up to 2030. Order of the Government of the Russian Federation dated November 13, 2009 No. 1715- Γ [Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda. Rasporyazhenie Pravitelstva Rossiiskoi Federatsii ot 13 noyabrya 2009 № 1715- Γ]. Moscow, 2009, 144 p.
22. Energy Strategy of Russia until 2035. Correction. [Energeticheskaya strategiya Rossii do 2035 goda. Korrektirovka]. Moscow, 2014, 25 p.
23. Energy Use, Loss and Opportunities Analysis: US Manufacturing and Mining. US Department of Energy Industrial Technologies Program, 2004, 165 p. [Electronic resource]: <https://www.energy.gov/sites/prod/>

files/2013/11/f4/energy_use_loss_opportunities_analysis.pdf. Last accessed 19.10.2020.

24. Chudnovsky, Y., Gotovsky, M., Greenman, M. [et al]. Integrated Steam/Organic Rankine Cycle (ISORC) for Waste Heat Recovery in Distributed Generation and Combined Heat and Power Production, Paper No: IHTC14-22704, pp. 77–81. Proc. of IHTC-14, Washington, 2010. DOI: 10.1115/IHTC14-22704. Last accessed 19.10.2020.

25. Hinze, J. O. Turbulence, 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1975, 790 p.

26. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory. 6th ed., New York, McGraw-Hill, 1979, 838 p.

27. Dmitrenko, A. V. Equivalence of measures and stochastic equations for turbulent flows. *Doklady Physics*, 2013, Vol. 58, Iss. 6, pp. 228–235. DOI: 10.1134/S1028335813060098. Last accessed 19.10.2020.

28. Dmitrenko, A. V. Calculation of pressure pulsations for a turbulent heterogeneous medium. *Doklady Physics*, 2007, Vol. 52, Iss. 7, pp. 384–387. DOI: 10.1134/S1028335807120166. Last accessed 19.10.2020.

29. Dmitrenko, A. V. Some analytical results of the theory of equivalence measures and stochastic theory of turbulence for non-isothermal flows. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, 2014, Vol. 8, Iss. 25, pp. 1101–1111. DOI: 10.12988/astp.2014.49131. Last accessed 19.10.2020.

30. Dmitrenko, A. V. Analytical estimation of velocity and temperature fields in a circular pipe on the basis of stochastic equations and equivalence of measures. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2015, Vol. 88, Iss. 6, pp. 1569–1576. DOI: 10.1007/s10891-015-1344-x. Last accessed 19.10.2020.

31. Dmitrenko, A. V. Determination of critical Reynolds numbers for non-isothermal flows with using stochastic theories of turbulence and equivalence measures. *Heat Transfer Research*, 2015, Vol. 47, Iss. 1, pp. 338–399. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2015014191. Last accessed 19.10.2020.

32. Dmitrenko, A. V. An estimation of turbulent vector fields, spectral and correlation functions depending on initial turbulence based on stochastic equations. The Landau fractal equation. *Int. J. Fluid. Mech. Res.*, 2016, Vol. 43, Iss. 3, pp. 82–91. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v43.i3.60. Last accessed 19.10.2020.

33. Dmitrenko, A. V. The theory of equivalence measures and stochastic theory of turbulence for non-isothermal flow on the flat plate. *Int. J. Fluid. Mech. Res.*, 2016, Vol. 43, Iss. 2, pp. 182–187. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v43.i2.60. Last accessed 19.10.2020.

34. Dmitrenko, A. V. Stochastic equations for continuum and determination of hydraulic drag coefficients for smooth flat plate and smooth round tube with taking into account intensity and scale of turbulent flow. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol. 29, Iss. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00161-016-0514-1. Last accessed 19.10.2020.

35. Dmitrenko, A. V. Analytical determination of the heat transfer coefficient for gas, liquid and liquid metal flows in the tube based on stochastic equations and equivalence of measures for continuum. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2017, Vol. 29, Iss. 6, pp. 1197–1206. DOI: 10.1007/s00161-017-0566-x. Last accessed 19.10.2020.

36. Dmitrenko, A. V. Estimation of the critical Rayleigh number as a function of an initial turbulence in the boundary layer of the vertical heated plate. *Heat Transfer Research*, 2017, Vol. 48, Iss. 13, pp. 1195–1202. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2017018750. Last accessed 19.10.2020.

37. Dmitrenko, A. V. Determination of the Coefficients of Heat Transfer and Friction in Supercritical-Pressure Nuclear Reactors with Account of the Intensity and Scale of Flow Turbulence on the Basis of the Theory of Stochastic Equations and Equivalence of Measures. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2017, Vol. 90, Iss. 4, pp. 1288–1294. DOI: 10.1007/s10891-017-1685-8. Last accessed 19.10.2020.

38. Dmitrenko, A. V. Regular Coupling between Deterministic (Laminar) and Random (Turbulent) Motions—Equivalence of Measures Scientific Discovery 2013, Diploma No. 458, registration No. 583 of December 2.

39. Dmitrenko, A. V. Theory of equivalent measures and sets with repeating, countable fractal elements. Stochastic thermodynamics and turbulence. Correlator «Determination – randomness»: Monograph [Teoriya ekvivalentnykh mer i mnozhestv s povtoryayushchimsya, schetnymi fraktalnymi elementami. Stokhasticheskaya termodinamika i turbulentnost'. Korrelyator «Determinirovannost'–sluchainost': Monografiya]. Moscow, Galleya-Print publ., 2013, 226 p.

40. Dmitrenko, A. V. Fundamentals of heat and mass transfer and hydrodynamics of single-phase and two-phase media. Criterial integral statistical methods and direct numerical simulation. Moscow, Galleya print, 2008, 398 p.

41. Dmitrenko, A. V. Uncertainty relation in turbulent shear flow based on stochastic equations of the continuum and the equivalence of measures. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2019. DOI: 10.1007/s00161-019-00784-0. Last accessed 19.10.2020.

42. Dmitrenko, A. V. Formation of a turbulence spectrum in the inertial interval on the basis of the theory of stochastic equations and equivalence of measures. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2020, Vol. 93, Iss. 5, pp. 122–127. DOI: 10.1007/s10891-020-02098-4. Last accessed 19.10.2020.

43. Dmitrenko, A. V. The correlation dimension of an attractor determined on the base of the theory of equivalence of measures and stochastic equations for continuum. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. Vol. 32, Iss. 2, pp. 63–74. DOI: 10.1007/s00161-019-00784-0. Last accessed 19.10.2020.

44. Dmitrenko, A. V. Modern aspects of the stochastic theory of hydrodynamics [Sovremennye aspekty stokhasticheskoi teorii gidrodinamiki]. 12th All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics, Ufa, August 20–24, 2019. Collection of works, Vol. 2, pp. 339–341.

45. Dmitrenko, A. V., Kolosova, M. A. Determination of the hydraulic characteristics of industrial units based on the stochastic theory of hydrodynamics [Opredelenie gidravlicheskikh kharakteristik promyshlennykh agregatov na osnove stokhasticheskoi teorii gidrodinamiki]. 12th All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics, Ufa, August 20–24, 2019. Collection of works, Vol. 2, pp. 342–343.

46. Dmitrenko, A. V., Kolosova, M. A. The possibility of using low-potential heat based on the organic Rankine cycle and determination of hydraulic characteristics of industrial units based on the theory of stochastic equations and equivalence of measures. *J.P. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, Vol. 21, Iss. 1, pp. 11–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.17654/HM021010200>. Last accessed 19.10.2020.

47. Dmitrenko, A. V. Theoretical solutions for spectral function of the turbulent medium based on the stochastic equations and equivalence of measures. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00161-020-00890-4>. Last accessed 19.10.2020.

48. Danilova, G. N., Bogdanov, S. N., Ivanov, O. P., Mednikova, N. M., Kramskoy, E. I. Heat exchangers of refrigeration units [Teploobmennye apparaty kholodilnykh ustanovok]. Ed. by D.Sc. (Eng) G. N. Danilova. 2nd ed., rev. and enl. Leningrad, Mashinostroenie publ., Leningrad branch, 1986, 303 p.

49. Kirillov, P. L., Yuryev, Yu. S., Bobkov, V. P. Handbook of thermohydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators) [Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory)]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1990, 360 p.





Система мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе промышленного «Интернета вещей»



Ефанов Дмитрий Викторович — ООО «ВЕГА Групп», Санкт-Петербург, Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

Дмитрий ЕФАНОВ

Рассматриваются особенности систем мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. Описаны основные подходы к организации мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, отмечены их достоинства и недостатки. Основной целью настоящей работы является представление читателю концептуального видения системы мониторинга устройств и систем обеспечения безопасности движения поездов, использующей технологии передачи диагностической информации по радиоканалу. Используются методы теории технической диагностики и мониторинга.

Внимание сфокусировано на применении технологий беспроводной передачи данных и использовании автономных датчиков промышленной автоматизации при организации систем мониторинга устройств железнодорожной автоматики. Представлена архитектура системы мониторинга. Дано описание самой системы и технологии мониторинга, отмечаются основные преимущества представленного подхода, заключающиеся,

прежде всего, в сокращении объемов проектных работ и снижении энергопотребления системы в целом. Недостатком же является необходимость замены автономных источников питания, обеспечения защищенности сети передачи данных, периодической поверки и калибровки средств измерения.

Приведены основные схемы подключения датчиков измерения физических величин к схемным узлам железнодорожной автоматики. Дан перечень необходимых для качественного и эффективного мониторинга устройств железнодорожной автоматики параметров. Отмечается необходимость как контроля механических и геометрических параметров устройств, так и учёт данных от взаимосвязанных объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

Предложенный подход может найти своё применение в сфере железнодорожной автоматики и, прежде всего, на тех объектах, которые расположены на ограниченных площадях помещений (например, в метрополитенах).

Ключевые слова: железная дорога, система мониторинга устройств железнодорожной автоматики, датчики промышленной автоматизации, беспроводная передача данных, диагностический параметр устройства железнодорожной автоматики, эффективность технологии мониторинга.

*Информация об авторе:

Ефанов Дмитрий Викторович – доктор технических наук, доцент, первый заместитель генерального директора – главный инженер ООО «ВЕГА Групп», Санкт-Петербург, профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, TrES-4b@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 27.02.2020, принята к публикации 12.10.2020.

For the English text of the article please see p. 127.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии мониторинга широко используются во всех областях промышленности и транспорта. Датчиками мониторинга оборудуются уникальные искусственные сооружения и здания, технические средства автоматизации, машины и механизмы. При этом спектр измеряемых параметров и их величин весьма разнообразен, а сами приборы и датчики способны как измерять аналоговые значения и преобразовывать их в цифровой вид, так и выдавать только сигналы о достижении предустановленного порогового значения. Цели мониторинга также различны: в некоторых приложениях требуется учёт произведённой работы, потраченной на неё энергии (например, учёт топлива или учёт работы оператора), в некоторых требуется индикация о достижении опасного (докритического) значения измеренного параметра (мониторинг в строительной отрасли), в некоторых — автоматизация измерения (для автоматизации работ по обслуживанию и определения предотказных состояний), а в некоторых — даже использование этой информации в цепях обратной связи для корректировки режима управления (например, в работе системы управления самолётом).

Используются технологии мониторинга и в сфере систем управления движением на железнодорожном транспорте. Основные технические средства регулирования движения поездов (объекты железнодорожной автоматики), а также бортовые средства автоматизации оборудуются средствами автоматизированного технического диагностирования и мониторинга [1; 2]. Данные от бортовых средств мониторинга передаются непосредственно на бортовые устройства автоматизации, а также персоналу по техническому обслуживанию локомотивов. Данные от систем мониторинга объектов железнодорожной автоматики посредством кабельной сети (реже — по беспроводным каналам [3]) передаются в станционные пункты концентрации данных и далее — на верхние уровни иерархии управления, — на оборудование дистанции сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и центров мониторинга [4].

Следует добавить, что кроме использования обозначенных технических средств

измерения параметров устройств автоматизации, производятся мероприятия по периодическому мониторингу состояния верхнего строения пути с помощью дефектоскопов и специализированного подвижного состава, измерению параметров железнодорожной контактной подвески с помощью вагонов-лабораторий, а также производятся измерения параметров подвижных единиц «на ходу» стационарными комплексами контроля технического состояния вагонов и локомотивов. Данные, получаемые от средств измерения состояния пути и контактной сети, аккумулируются и передаются специалистам по их расшифровке. Данные от систем мониторинга параметров поезда «на ходу» анализируются в режиме реального времени и используются для предупреждения аварийных ситуаций в работе подвижного состава.

Остановимся на проблеме мониторинга состояния объектов железнодорожной автоматики [5]. В хозяйстве автоматики и телемеханики системы мониторинга уже давно образовали отдельный класс устройств СЦБ [6; 7]. Существуют стандарты, регламентирующие применение данных средств автоматизации, типовые материалы по проектированию отдельных систем и прочее. Постоянно разрабатываются и совершенствуются подходы к получению, обработке и анализу диагностических данных [8–13].

Одной из сложностей, возникающих в процессе внедрения систем мониторинга устройств железнодорожной автоматики, является необходимость разработки сложного проекта с учётом прокладки кабелей для подключения диагностических приборов. Кроме того, для самих средств технического диагностирования и мониторинга требуется учёт потребляемой электроэнергии.

Целью настоящей статьи является описание подхода к построению системы мониторинга постовых устройств железнодорожной автоматики на основе датчиков промышленной автоматизации с автономным энергоснабжением и передачей данных с использованием собственного «Интернета вещей», при этом использованы *методы* теории технической диагностики и мониторинга.





Рис. 1. Устройство измерения напряжения и тока с беспроводной передачей данных.

Подобные датчики и технологии передачи информации уже давно хорошо зарекомендовали себя в большом числе приложений [14], а их внедрение в области железнодорожной автоматики сдерживается, разве что, консерватизмом отрасли, но никак не техническими возможностями современных систем автоматизации. Использование предлагаемого подхода к организации системы мониторинга позволяет снизить затраты на её проектирование, а также упростить процедуру её последующей эксплуатации.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА, СОСТАВ ДАТЧИКОВ И СХЕМЫ ИХ ПОДКЛЮЧЕНИЯ

Современные системы мониторинга устройств железнодорожной автоматики используют как широко применяемые датчики и приборы промышленной автоматизации, так и унифицированные измерительные контроллеры компаний-производителей, примеры которых есть и в [6; 7], и на сайтах разработчиков. Такие приборы внесены в реестр средств измерения, для них также требуется периодическая поверка. Данные от диагностических приборов, поступающие в программные средства хранения, обработки и анализа, считаются достоверными.

Недостатком же измерительных приборов собственной разработки является их высокая цена и отсутствие рекомендованных аналогов — типовые материалы по проектированию исключают использование иных средств, чем те, что обозначены в проекте.

В качестве альтернативы широко распространённым диагностическим прибо-

рам собственной разработки производителей могут быть рассмотрены устройства измерений напряжений и токов промышленных производителей с беспроводной передачей данных и автономным питанием [15]. Пример такого устройства изображён на рис. 1. Такие приборы предназначены для преобразования физических величин напряжения и тока в цифровой сигнал. При измерениях с частотой опроса датчика в 10 сек (этого вполне достаточно для решения задач мониторинга медленнотекущих процессов в устройствах железнодорожной автоматики) батареи служат более полутора лет. Можно отметить альтернативу применения источников батарейного питания и постоянного питания для таких датчиков. Сами технические описания устройств с их особенностями можно найти на сайтах производителей.

Преимуществами применения устройств с беспроводной передачей данных и автономным энергоснабжением являются возможность установки практически в любые точки для съёма данных, отсутствие необходимости применения кабельных обвязок и сложных проектных работ. Недостатки же связаны с необходимостью периодической замены источников питания (которые, к слову, производятся не столь часто, а сами работы не столь трудоёмки).

Использование беспроводных датчиков получения физических величин позволяет организовать систему мониторинга по архитектуре, приведённой на рис. 2. В ней датчики физических величин располагаются непосредственно в помещениях, где устанавливаются релейные стивы системы электрической централизации стрелок и сигналов, а также в зависимости от размеров помещений выбираются дополнительные средства связи (компоненты усиления и ретрансляции сигналов к концентратору). Данные от датчиков через беспроводную сеть поступают в концентратор информации, где накапливаются, обрабатываются и анализируются. В отличие от традиционных систем мониторинга, используемых в области железнодорожной автоматики, предлагаемая система не имеет кабельных трактов передачи данных. Это является несомненным достоинством системы и крайне востребовано может оказаться там, где размеры помещений

с расположенными средствами автоматизации ограничены (к примеру, в метрополитенах). Необходимо заметить, что использование беспроводной передачи данных новым в области сигнализации, централизации и блокировки не является. В [16] представлена система мониторинга передаточного механизма стрелочного электропривода, в которой датчики монтируются непосредственно в корпусе стрелочного электропривода, а передача данных также является беспроводной между приборами и сервером мониторинга. В [17] предложены способы контроля геометрических параметров стрелочного перевода (расположения и состояния острижков относительно рамных рельсов) с беспроводным интерфейсом. В [3] авторы предлагают использование для передачи информации с объектов переездной автоматизации в зонах железнодорожных линий, оборудованных полуавтоматической блокировкой, радиоканала и GSM-модулей. Приведённые примеры указывают на международный опыт в области применения беспроводных технологий передачи данных и их особенности в предлагаемых решениях.

Условная схема расположения датчиков физических величин в релейном помещении представлена на рис. 3. Данные от датчиков поступают в концентратор информации, располагаемый в этом же помещении, синхронизируются и записываются в базу данных. Далее, по мере накопления измеренных значений, осуществляется анализ диагностической информации,



Рис. 2. Организационная структура системы.

определяются тенденции изменения измеренных параметров, а также производятся процедуры по диагностированию и прогнозированию с учётом особенностей измеряемых величин, совокупности влияющих

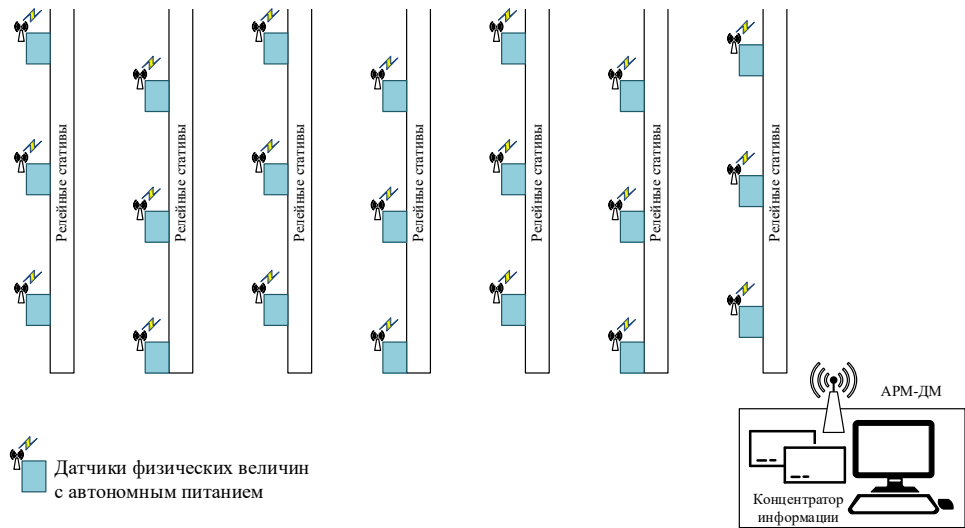


Рис. 3. Принципы размещения оборудования в релейных помещениях.

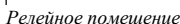


Рис. 4. Подключение датчиков напряжения к рельсовой цепи тональной частоты.

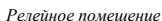


Рис. 5. Подключение датчиков тока и напряжения к схеме управления железнодорожной стрелкой.

друг на друга параметров. Данные дополняются информацией о климатических условиях в помещении и непосредственно в зоне расположения объекта диагностирования («в поле»).

На рис. 4–6 изображены ставшие уже типовыми схемы подключения измерительных датчиков в схемные узлы железнодорожной автоматики. Беспроводные датчики обозначены как Д-ТРЦ-Р (датчик

получения данных от рельсовых цепей тональной частоты с передачей по радиоканалу), Д-СТ-Р (датчик получения данных от стрелки с передачей по радиоканалу), Д-СН-Р (датчик получения данных от светофора с передачей по радиоканалу).

При подключении датчиков должны быть обеспечены условия безопасности и отсутствия влияния приборов на ответственные цепи управления [18].

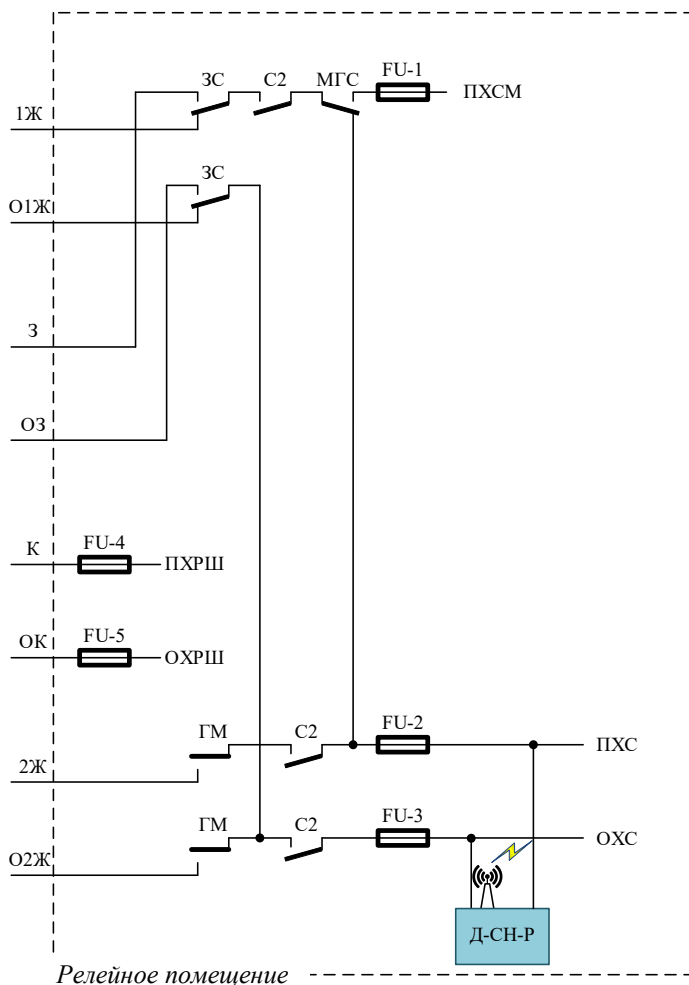


Рис. 6. Подключение датчиков напряжения к схеме управления огнями светофора.

Отдельный интерес представляет вопрос выбора периода опроса датчиков. Для некоторых объектов диагностирования необходимы измерения с малым периодом опроса (доли секунды), а для некоторых достаточно менее частых измерений. В этой связи, измерения в рабочих цепях управляемых объектов под нагрузкой рекомендуется выполнять не реже того, как это реализовано в существующих измерительных контроллерах. В этом случае существует несколько способов работы самих датчиков — с настраиваемым на срабатывание пусковых цепей порогом включения и непрерывным измерением, с измерением и накоплением данных с передачей в ближайший установленный период, с неавтономным питанием и т.д. Вопрос технической реализации и настройки режимов работы решается с учё-

том специфики конкретного объекта мониторинга. К примеру, особенности работы беспроводных диагностических приборов в области железнодорожного транспорта при высокой энергоэффективности рассмотрены в [19].

ПОЛНОТА И ГЛУБИНА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Отдельным вопросом является обеспечение полноты и глубины технического диагностирования. При использовании современных действующих систем мониторинга указанные параметры диагностирования, очевидно, неудовлетворительны. Причинами тому зачастую являются невозможность технической реализации самого измерения или экономически неэффективное решение [18]. Анализ показал, что для



повышения качества технологии мониторинга необходимо расширение диагностических параметров для устройств и систем железнодорожной автоматики.

Приведём здесь перечень основных диагностических параметров основных устройств железнодорожной автоматики (как уже измеряемых, так и необходимых для измерения):

1. Дискретные данные об объектах диагностики:

- состояния датчиков контроля свободности пути (рельсовых цепей, систем счёта осей и пр.);
- состояния ламп светофоров;
- крайние положения железнодорожных стрелок;
- состояния объектов переездной автоматизации;
- состояния объектов энергоснабжения и т.д.

2. Аналоговые данные об объектах диагностики:

2.1. Данные о рельсовых цепях 25, 50 и 75 Гц:

- напряжения на питающем конце;
- напряжения на релейных концах рельсовых цепей;
- сопротивление изоляции жил кабеля;
- временные параметры кодов автоматической локомотивной сигнализации;
- токи автоматической локомотивной сигнализации при вступлении поезда на участок пути по началу передачи кодов;
- состояние окружающей среды (влажности, температуры и т.д.);
- измерения сопротивления балласта.

2.2. Данные о рельсовых цепях тональной частоты:

- токи и напряжения на входах путевых приёмников;
- напряжение на выходах путевого приёмника;
- ток и напряжение на выходе путевого генератора;
- напряжение на выходе путевого фильтра;
- сопротивление изоляции жил кабеля;
- частота сигнала (несущая и манипулирующая);
- состояние окружающей среды (влажности, температуры и т.д.).

2.3. Данные о стрелочных электроприводах:

- ток перевода стрелки с двигателем постоянного тока;
- фазные токи перевода стрелки с двигателем переменного тока;
- напряжения между фазами;
- контроль исправности рабочей цепи стрелочного электропривода при выключенном двигателе;
- сопротивления изоляции жил кабеля;
- время перевода;
- механические параметры автопереключателя (ход ножей);
- вибрационные воздействия на стрелочный привод;
- состояние окружающей среды (влажности, температуры и т.д.).

2.4. Данные о средствах оптической сигнализации:

- напряжения питания огней светофоров;
- токи в цепях питания огней светофоров;
- состояния ламп в выключенном состоянии;
- времена горения нитей ламп светофоров;
- времена замедления выключения сигнальных показаний;
- сопротивления изоляции жил кабеля;
- контроль коррозии мачты (датчики вибродиагностики и инклинометрии);
- контроль габарита мачты (датчики вибродиагностики и инклинометрии);
- времена горения основных нитей светодиодных ламп;
- времена горения резервных нитей светодиодных ламп;
- напряжения питания светодиодных ламп;
- токи в цепях питания светодиодных ламп;
- напряжение питания светодиодных ламп маршрутных указателей;
- времена работы светодиодных светоптических систем (ССС) от основного источника питания (от резервного источника питания);
- времена переключения огней с разрешающих на запрещающее показание;
- состояние окружающей среды (влажности, температуры и т.д.).

2.5. Данные о дроссель-трансформаторах:

- фактическая температура и уровень масла;

- ток на вторичной обмотке дросселя;
- сопротивление изоляции жил кабеля;
- состояние окружающей среды (влажности, температуры и т.д.).

2.6. Устройства электропитания:

- параметры работы электропитающей установки, дизель-генераторного агрегата и устройств бесперебойного питания;
- качество электроэнергии;
- сопротивление изоляции жил кабеля;
- состояние окружающей среды (влажности, температуры и т.д.).

2.7. Устройства переездной автоматизации:

- токи и напряжения в цепях управления автошлагбаумами и устройствами заграждения пути;
- видеоконтроль состояния переезда в зоне непосредственного пересечения автомобильной и железной дорог;
- вибрационные воздействия на оборудование переездной автоматизации;
- состояние окружающей среды (влажности, температуры и т.д.).

Представленные выше параметры являются ключевыми и требуются для комплексного мониторинга состояния объектов железнодорожной автоматики. Так как на них оказывают влияние также и объекты железнодорожной инфраструктуры (путь и контактная сеть), а также сам подвижной состав, то данную информацию целесообразно дополнять и информацией от систем мониторинга обозначенных технических средств и сооружений. К сожалению, на данный момент развития железных дорог, как минимум в Российской Федерации, отмеченное расширение спектра диагностических параметров невозможно в силу специфики функционирования самого железнодорожного комплекса и особенностей эксплуатации самих объектов железнодорожной инфраструктуры. В перспективе такое расширение достигнуто, несомненно, будет [20; 21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологий в управлении и мониторинге технических средств автоматизации идёт по пути совершенствования методов и принципов управления, снижения влияния человека на сами процессы, протекающие в системах, повышения надёжности, безопасности и готовно-

сти устройств и т.д. Это в полной мере касается и технологий управления и мониторинга в сфере железнодорожной автоматики и телемеханики. Микропроцессорные системы управления на железнодорожном транспорте получили распространение по всему миру, а технологии обработки данных шагнули от анализа единичных параметров в сравнении с пороговыми значениями к сложным системам машинного обучения при решении данных задач. Наблюдается постепенная интеграция и технологий, основанных на применении промышленного «интернета вещей». Первыми системами железнодорожной автоматики, в которых это сегодня и возможно, и доступно, и необходимо являются системы мониторинга, к которым не предъявляются требования по обеспечению безопасности функционирования (за исключением опасного влияния на объекты диагностирования). Это позволяет устанавливать диагностические датчики непосредственно на распределённые и удалённые объекты диагностирования, а получаемую информацию передавать с использованием беспроводных каналов передачи данных.

Предложенный в статье подход к организации систем мониторинга объектов железнодорожной автоматики позволяет отказаться от традиционных структур систем мониторинга, упростить процесс их проектирования и эксплуатации, а также выработать технические решения, расширяющие множество диагностических признаков и повышающие тем самым полноту и глубину диагностирования и прогнозирования. Особый интерес к представленной технологии может возникнуть в случае ограниченных габаритов помещений, где устанавливаются объекты диагностирования, например, в метрополитенах.

Недостатки предложенного подхода очевидны: необходимо учитывать срок службы автономных источников питания при работе датчиков, организовывать защищённые от помех каналы связи, а также выполнять периодическую поверку и калибровку средств измерения. Несмотря на отмеченные недостатки, технологии мониторинга с использованием беспроводных каналов передачи данных развиваются и будут развиваться и внедряться на боль-



шом числе технически сложных и уникальных сооружений. Их использование в транспортной отрасли, в том числе в сфере железнодорожной автоматики — перспективы ближайшего десятилетия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лакин И. К., Павлов В. В., Мельников В. А. «Умный локомотив»: диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использованием методов машинного обучения // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — №1. — С. 53–56. [Электронный ресурс]: <http://rostransport.com/transportrf/download.php?src=/transportrf/pdf/74/1994-831X-2018-1-53-56.pdf>. Доступ 12.06.2020.
2. Ефанов Д. В., Барч Д. В., Осадчий Г. В. Системы стационарного мониторинга и цифровой железнодорожная контактная подвеска // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 4. — С. 41–44. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-statsionarnogo-monitoringa-i-tsifrovaya-zheleznodorozhnaya-kontaktnaya-podveska/pdf>. Доступ 12.06.2020.
3. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Передача данных с устройств оборудования переезда аппаратурой АПК-ДК при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства // Автоматика на транспорте. — 2016. — Том 2. — № 1. — С. 65–80. [Электронный ресурс]: http://atjournal.ru/ru/Home/Download?path=articles%2F2016_Vol.%202_No.%201_5_molodtsov.pdf. Доступ 12.06.2020.
4. Нестеров В. В. Развитие систем СТДМ, АСУ-Ш-2 и АОС-ШЧ // Автоматика, связь, информатика. — 2012. — № 12. — С. 45–46. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18259709>. Доступ 12.06.2020.
5. Theeg, G., Vlasenko, S. Railway Signalling & Interlocking: 3rd Edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020, 552 p. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42536131>. Доступ 12.06.2020.
6. Молодцов В. П., Иванов А. А. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. — СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. — 140 с.
7. Федорчук А. Е., Сепетый А. А., Иванченко В. Н. Автоматизация технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ (система АДК-СПБ). — М.: УМЦ ЖДТ, 2013. — 400 с. [Электронный ресурс]: <https://b-ok.global/dl/2900845/33264c>. Доступ 12.06.2020.
8. Domingues, J. L. M. Diagnostic Levels in Railway Applications. Signal+Draht, 2004, No. 1/2, pp. 31–34.
9. Asada, T. Novel Condition Monitoring Techniques Applied to Improve the Dependability of Railway Point Machines. University of Birmingham, UK, Ph.D. thesis, May 2013, 149 p. [Электронный ресурс]: <http://etheses.bham.ac.uk/4155/1/Asada13PhD.pdf>. Доступ 12.06.2020.
10. Jin, W., Shi Z., Siegel, D., Dersin, P., Douziech, C., Pugnali, M., La Cascia, P., Lee, J. Development and Evaluation of Health Monitoring Techniques for Railway Point Machines. 2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM), 22–25 June 2015, Austin, TX, USA, DOI: 10.1109/ICPHM.2015.7245016.
11. Böhm, T. Remaining Useful Life Prediction for Railway Switch Engines Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines. International Journal of Prognostics and Health Management 8 (Special Issue on Railways & Mass Transportation), December 2017, 15 p. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Boehm5/publication/322603073_Remaining_Useful_Life_Prediction_for_Railway_Switch_Engines_Using_Artificial_Neural_Networks_and_Support_Vector_Machines/links/5a62479a4585158bca4c39d4/Remaining-Useful-Life-Prediction-for-Railway-Switch-Engines-Using-Artificial-Neural-Networks-and-Support-Vector-Machines.pdf. Доступ 12.06.2020.
12. Heidmann, L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance. Signal+Draht, 2018 (110), Iss. 9, pp. 70–75. [Электронный ресурс]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=325895>. Доступ 12.06.2020.
13. Wernet, M., Brunowski, M., Witt, P., Meiwald, T. Digital Tools for Relay Interlocking Diagnostics and Condition Assessment. Signal+Draht, 2019 (111), Iss. 11, pp. 39–45. [Электронный ресурс]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=1136153&lng=en>. Доступ 12.06.2020.
14. Hahanov, V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. New York, Springer International Publishing AG, 2018, 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
15. Автономные беспроводные измерительные устройства. — Schneider Electric, МКР-BRC-ACCUTECH-13, 2013, 6. — 12 с. [Электронный ресурс]: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Brochure&p_File_Id=5916220128&p_File_Name=Accutech_brochure_2016.pdf&p_Reference=MKP-BRC-ACCUTECH-13. Доступ 12.06.2020.
16. Fritz, C. Intelligent Point Machines. Signal+Draht, 2018 (110), Iss. 12, pp. 12–16. [Электронный ресурс]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=469469&lng=en>. Доступ 12.06.2020.
17. Kassa, E., Skavhaug, A., Kaynia, A. M. Monitoring of Switches & Crossing (Tornouts) and Tracks. Decision Support Tool for Rail Infrastructure, EU Project No. 636285, 41 p. [Электронный ресурс]: <http://www.destinationrail.eu/ajax/DownloadHandler.php?file=2123>. Доступ 12.06.2020.
18. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. — СПб.: ПГУПС, 2016. — 171 с. [Электронный ресурс]: <https://www.studmed.ru/efanov-d-v-funkcionalnyy-kontrol-i-monitoring-ustroystv-zheleznodorozhnoy-avtomatiki-i-telemechaniki-615d76c768b.html>. Доступ 12.06.2020.
19. Efanov, D., Pristensky, D., Osadchy, G., Razvitnov, I., Sedykh, D., Skurlov, P. New Technology in Sphere of Diagnostic Information Transfer within Monitoring System of Transportation and Industry. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2017), Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 231–236. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110152.
20. Ефанов Д. В. Интеграция систем непрерывного мониторинга и управления движением на железнодорожном транспорте // Транспорт Российской Федерации. — 2017. — № 4. — С. 62–65. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-sistem-nepreryvnogo-monitoringa-i-upravleniya-dvizheniem-na-zheleznodorozhnom-transporte/pdf>. Доступ 12.06.2020.
21. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В. Концепция систем управления на основе информационных технологий // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 5. — С. 20–23. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34917661>. Доступ 12.06.2020.



Monitoring System for Railway Automation Devices Based on the Industrial Internet of Things



Efanov, Dmitry V., VEGA-group LLC, St. Petersburg, Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

Dmitry V. EFANOV

ABSTRACT

The features of monitoring systems for railway infrastructure and rolling stock are considered. The main approaches to organisation of monitoring of railway infrastructure and rolling stock objects are described, their advantages and disadvantages are noted. The main objective of this work is to present to the reader a conceptual vision of a system for monitoring devices and systems for ensuring train traffic safety, using technologies for transmitting diagnostic information over a radio channel. The methods of the theory of technical diagnostics and monitoring were used. Attention is focused on the use of wireless data transmission technologies and the use of autonomous industrial automation sensors for monitoring systems for railway automation devices.

The architecture of the monitoring system is presented. The description of the system itself and the monitoring technology is given, the main advantages of the presented approach

are noted, which, first, are linked to reduction of the volume of design work and of energy consumption of the system as a whole. The disadvantages are associated with the need to replace autonomous power supply sources, ensure security of the data transmission network, to proceed with periodic verification and calibration of measuring instruments. The basic diagrams of connecting sensors for measuring physical quantities to the circuit units of railway automation are presented. A list of parameters necessary for high-quality and effective monitoring of railway automation devices is given. The need is noted for both the control of mechanical and geometric parameters of devices and the accounting of data from interconnected objects of railway infrastructure and rolling stock. The proposed approach can find its application in the field of railway automation and, first of all, at those facilities that are located in premises with limited area (e.g. at subway facilities).

Keywords: railway, system of monitoring of railway automation devices, industrial automation sensors, wireless data transmission, diagnostic parameter of the railway automation device, effectiveness of the monitoring technology.

*Information about the author:

Efanov, Dmitry V. – D.Sc. (Eng), Associate Professor, First Deputy General Director – Chief Engineer of VEGA-group LLC, St. Petersburg, Professor at the Department of Railway Automation, Telemechanic and Communication of Russian University of Transport, Moscow, Russia, TrES-4b@yandex.ru.

Article received 27.02.2020, accepted 12.10.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 118.

Background.

Monitoring technologies are widely used in all areas of industry and transport. Monitoring sensors are used to equip unique engineering structures and buildings, technical automation equipment, machines, and mechanisms. At the same time, the spectrum of measured parameters and their values are remarkably diverse, and devices and sensors themselves are capable of both measuring analogue values and converting them into digital form, and only giving out signals about reaching a pre-set threshold value. The objectives of monitoring are also different: in some applications, accounting for the work performed, the energy spent on it (for example, fuel metering or accounting of the operator's work) is required, in some applications, an indication of achievement of a dangerous (subcritical) value of the measured parameter (monitoring in the construction industry) is needed, in some cases there is the need for automation of measurement (to automate maintenance work and determine pre-failure conditions), and some cases require the use of this information in feedback circuits to adjust the control mode (for example, in operation of an aircraft control system).

Monitoring technologies are also used in the field of railway traffic control systems. The main technical means of train traffic control (objects of railway automation), as well as on-board automation equipment are equipped with tools of automated technical diagnostics and monitoring [1; 2]. Data from on-board monitoring devices are transmitted directly to on-board automation devices as well as to locomotive maintenance personnel. Data from systems monitoring railway automation objects via a cable network (less often – via wireless channels [3]) are transmitted to station data concentration points and then to the upper levels of the control hierarchy – to the equipment of signalling, centralization and blocking (SCB) sections and monitoring centres [4].

It should be added that, besides the indicated technical means for measuring the parameters of automation devices, measures are taken to periodically monitor the state of the upper structure of the track using flaw detectors and specialized rolling stock, to measure the parameters of the railway overhead catenary using laboratory cars, and also to measure the

parameters of rolling stock units «on the move» by stationary complexes for monitoring the technical condition of cars and locomotives. The data received from the means of measuring the state of the track and the contact network are accumulated and transmitted to specialists for their decoding. Data from systems for monitoring train parameters «on the move» are analysed in real time and used to prevent emergencies in operation of rolling stock.

Let us dwell on the problem of monitoring the state of objects of railway automation [5]. In the sectors of automation and telemechanics, monitoring systems have long formed a separate class of signalling devices [6; 7]. There are standards that govern the use of these automation tools, standard materials for the design of individual systems, and so on. The approaches to obtaining, processing and analysing diagnostic data are constantly being developed and improved [8–13].

One of the difficulties arising in the process of introducing monitoring systems for railway automation devices is the need to develop a complex project, taking into account laying of cables for connecting diagnostic devices. In addition, for the tools of technical diagnostics and monitoring, metering of consumed electricity is required. The *objective* of this article is to describe an approach to development of a monitoring system for railway automation checkpoints based on industrial automation sensors with autonomous power supply and data transmission using its own Internet of Things, while applying the methods of the theory of technical diagnostics and monitoring. Such sensors and information transmission technologies have long proven themselves in many applications [14], and their implementation in the field of railway automation is constrained, perhaps, by the industry's conservatism, but not by the technical features of modern automation systems. The use of the proposed approach to organisation of the monitoring system allows to reduce the cost of its design, as well as to simplify the procedure for its subsequent operation.

Monitoring system architecture, composition of sensors and their connection diagrams

Modern monitoring systems for railway automation devices use both widely used sensors and industrial automation devices and

unified measuring controllers of manufacturing companies, examples of which are also in [6; 7], and on the developers' websites. Such devices are included in the register of measuring instruments. And also, their periodic verification is required. Data from diagnostic devices entering storage, processing and analysis software are considered reliable.

The disadvantage of measuring instruments of own design is their high price and the absence of recommended analogues: model design materials exclude the use of other means than those indicated in the project.

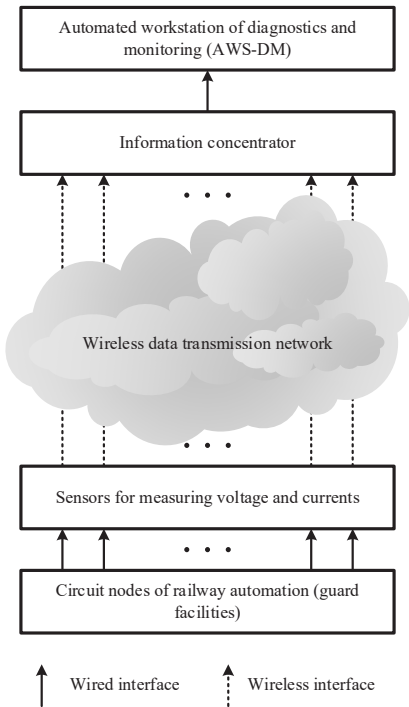
As an alternative to widely used diagnostic devices of own manufacturers' design, devices for measuring voltages and currents of industrial manufacturers with wireless data transmission and autonomous power supply can be considered [15]. An example of such a device is shown in Pic. 1. Such devices are designed to convert physical values of voltage and current into a digital signal. When measuring with a sensor polling rate of 10 seconds (which is quite enough for solving problems of monitoring slow-flowing processes in railway automation devices), the batteries serve for more than a year and a half. An alternative of the use of battery power either of constant power supply for such sensors can be noted. The technical descriptions of the devices themselves with their features can be found on the manufacturers' websites.

The advantage of using devices with wireless data transmission and autonomous power supply is the ability to install them at almost any point for data collection, no need for cables and complex design work. The disadvantages are associated with the need to periodically replace power sources (replacement, by the way, is not done so often, and the work itself is not so time-consuming).

The use of wireless sensors for obtaining physical values allows organising a monitoring system according to the architecture shown in Pic. 2. With it, sensors of physical quantities are located directly in the premises, where the relay cabinets of the system of electrical interlocking of switches and signals are installed, and also, depending on the size of the premises, additional communication means are selected (components for amplifying and relaying signals to the concentrator). Data from sensors through a wireless network enter the information concentrator, where they are stored, processed and analysed. Unlike



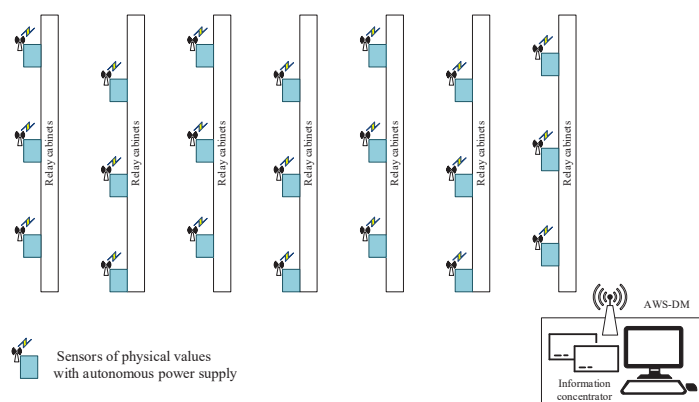
Pic. 1. Voltage and current measuring device with wireless data transmission.



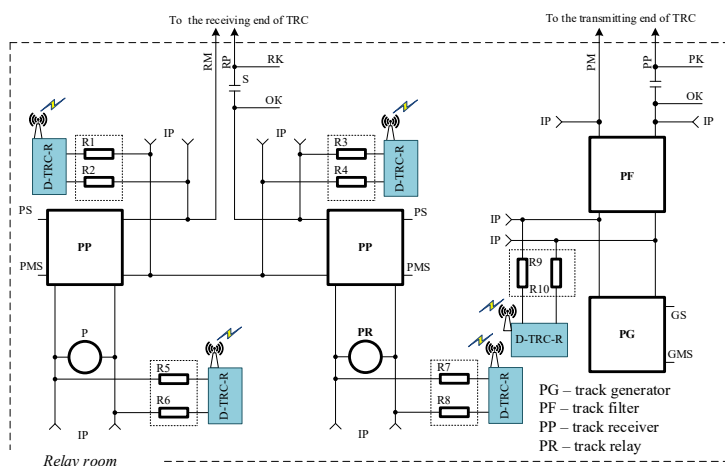
Pic. 2. Organizational structure of the system.

traditional monitoring systems used in the field of railway automation, the proposed system does not have cable data transmission paths. This is an undoubted advantage of the system and it might be in great demand for facilities where premises with automation devices have limited area (e.g., at subway). It should be noted that the use of wireless data transmission is not new in the field of signalling, centralization, and blocking. In [16], a monitoring system for the gear mechanism of a switch electric drive is presented, in which sensors are mounted directly in the housing of the switch electric drive, and the data transmission is also wireless between the devices and the monitoring server. In [17], methods of monitoring the geometric parameters of the turnout switch (the location





Pic. 3. Principles of equipment placement in relay rooms.



Pic. 4. Connecting voltage sensors to the tone frequency rail circuit.

and state of the points relative to frame rails) with a wireless interface are proposed. In [3], the authors propose the use of a radio channel and GSM-modules for transmitting information from objects of level crossing automation in the zones of railway lines equipped with semi-automatic blocking. The given examples point to international experience in the field of application of wireless data transmission technologies and their features regarding proposed solutions.

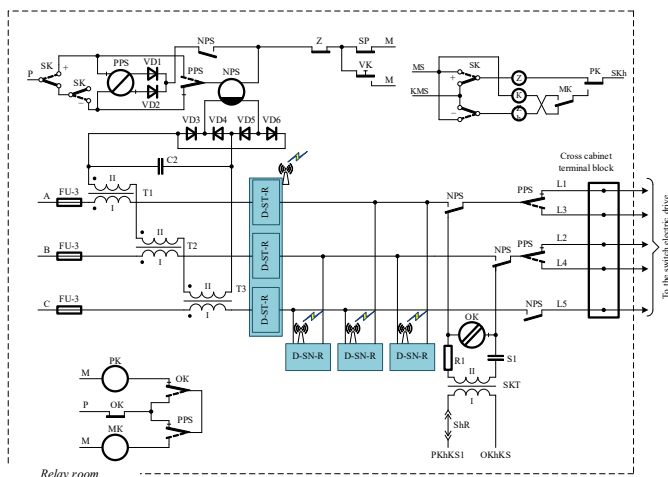
A schematic diagram of location of sensors of physical values in the relay room is shown in Pic. 3. Data from the sensors enter the information concentrator located in the same room, are synchronised, and recorded into the database. Further, as the measured values accumulate, the diagnostic information is analysed, trends in the measured parameters are determined, and procedures for diagnosing and forecasting are performed, considering the characteristics of the

measured values and a set of parameters affecting each other. The data are supplemented by information on the climatic conditions in the room and on the conditions directly in the area of location of the analysed object («in the field»).

Pics. 4–6 show the typical schemes for connecting measuring sensors to the circuit units of railway automation. Wireless sensors are designated as D-TRC-R (sensor for receiving data from track circuits of speech frequency with transmission over a radio channel), D-ST-R (sensor for receiving data from a switch with transmission over a radio channel), D-SN-R (sensor for receiving data from a traffic light with radio transmission).

When connecting sensors, safety conditions must be ensured and it should be provided that there is no influence of devices on critical control circuits [18].

Of particular interest is the issue of choosing the period for polling sensors. For some objects,



Pic. 5. Connecting current and voltage sensors to railway switch control circuit.

measurements with a short sampling period (fractions of a second) are required, and for some less frequent measurements are sufficient. In this regard, measurements in the working circuits of controlled objects under load are recommended to be performed at least as often as it is implemented with existing measuring controllers. In this case, there are several ways of operating the sensors themselves: with a switching threshold adjustable for triggering circuits and continuous measurement, with measurement and accumulation of data with transmission in the next set period, with non-autonomous power supply, etc. The issue of technical implementation and adjustment of operating modes is decided considering the features of a particular monitored object. For example, the features of operation of wireless diagnostic devices in the field of railway transport with high energy efficiency are considered in [19].

Completeness and depth of technical diagnostics

A separate issue is to ensure completeness and depth of technical diagnostics. When using modern existing monitoring systems, the indicated diagnostic parameters are obviously unsatisfactory. The reason for this is often impossibility of technical implementation of the measurement itself or an economically ineffective option [18]. The analysis showed that to improve quality of the monitoring technology, it is necessary to expand the diagnostic parameters for devices and systems of railway automation.

Here is a list of the main diagnostic parameters of the main railway automation

devices (both already measured and intended for measurement):

1. Discrete data about the objects of diagnostics:

- state of the sensors for monitoring if the track is clear (track circuits, axle counting systems, etc.);
- state of traffic light lamps;
- extreme positions of railway switches;
- state of objects of level crossing automation;
- state of power supply facilities, etc.

2. Analog data about the monitored objects:

2.1. Data about rail circuits of 25, 50 and 75 Hz:

- voltage at the supply end;
- voltage at the relay ends of rail circuits;
- insulation resistance of cable conductors;
- time parameters of codes of automatic locomotive signalling;
- currents of automatic locomotive signalling when the train enters the track section at the beginning of transmission of codes;

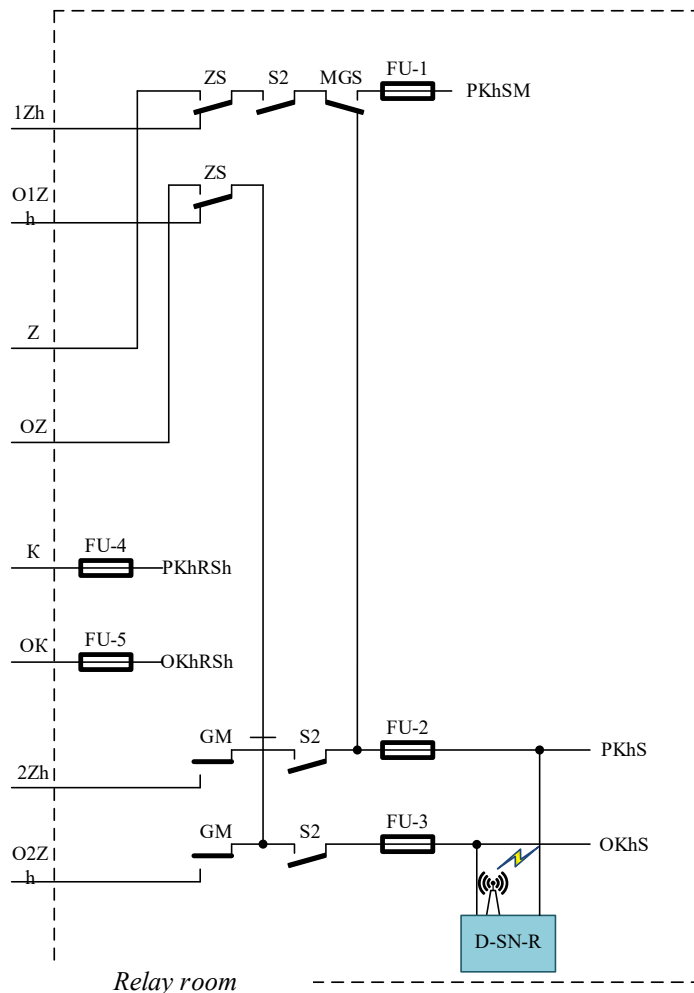
- state of the environment (humidity, temperature etc.);

- measurement of ballast resistance.

2.2. Speech frequency rail circuit data:

- currents and voltages at the inputs of track receivers;
- voltage at the outputs of the track receiver;
- current and voltage at the output of the track generator;
- voltage at the output of the track filter;
- insulation resistance of cable conductors;
- signal frequency (carrier and manipulating one);





Pic. 6. Connection of voltage sensors to the traffic light control circuit.

- state of the environment (humidity, temperature, etc.).

2.3. Data about switch electric drives:

- current of operation of a switch with a DC motor;
- phase currents of operation of a switch with an AC motor;
- voltage between phases;
- control of serviceability of the working circuit of the switch electric drive with the drive off;
- resistance of cable conductor insulation;
- time of operation;
- mechanical parameters of the automatic switch (point blade movement);
- vibration effects on the switch drive;
- the state of the environment (humidity, temperature, etc.).

2.4. Data on optical signalling means:

- supply voltage of traffic lights lamps;
- currents in power supply circuits of traffic lights lamps;
- state of lamps in the off state;
- burning times of filament of traffic lights lamps;
- times of deceleration of switching off of signal indications;
- resistance of cable conductor insulation;
- monitoring of mast corrosion (vibration diagnostics and tilt sensors);
- control of mast dimensions (vibration diagnostics and tilt sensors);
- burning times of main filaments of LED lamps;
- burning times of backup filaments of LED lamps;
- supply voltage of LED lamps;

- currents in power supply circuits of LED lamps;
- supply voltage of LED lamps of route indicators;
- operating times of LED light-optical systems from the main power source (from the backup power source);
- times of switching lights from permissive to restrictive indication;
- the state of the environment (humidity, temperature, etc.).

2.5. Impedance bond data:

- actual temperature and oil level;
- current on the secondary winding of the impedance bond;
- insulation resistance of cable conductors;
- the state of the environment (humidity, temperature, etc.).

2.6. Power supply devices:

- operating parameters of the power supply unit, diesel generator set and uninterruptible power supplies;
- electric power quality;
- insulation resistance of cable conductors;
- the state of the environment (humidity, temperature, etc.).

2.7. Level crossing automation devices:

- currents and voltages in the control circuits of level crossing gate and road blocking devices;
- video monitoring of the state of the crossing in the area of direct intersection of the road and the railway;
- vibration effects on the equipment of level crossing automation;
- the state of the environment (humidity, temperature, etc.).

The above parameters are key and are required for comprehensive monitoring of the state of railway automation facilities. Since they are also influenced by the objects of the railway infrastructure (track and contact network), as well as by the rolling stock itself, it is advisable to supplement this dataset with information from the systems monitoring the indicated technical means and structures. Unfortunately, at the moment of development of railways, at least in the Russian Federation, the noted expansion of the range of diagnostic parameters is impossible due to the specifics of functioning of the railway complex itself and the peculiarities of operation of the railway infrastructure facilities themselves. In the future, such an expansion will undoubtedly be achieved [20; 21].

Conclusion.

The development of technologies in management and monitoring of technical means of automation goes along the path of improving the methods and principles of management, reducing the human influence on the processes occurring in systems, increasing reliability, safety and availability of devices, etc. This fully applies to control and monitoring technologies in the field of railway automation and telemechanics. Microprocessor control systems in railway transport have spread all over the world, and data processing technologies have stepped from the analysis of unit parameters in comparison with threshold values to complex machine learning systems for solving these problems. There is also a gradual integration of technologies based on the use of the industrial Internet of things. The first railway automation systems, in which it is both possible, available, and necessary today, are monitoring systems, which today are not limited by requirements regarding safety of operation (except for a dangerous effect on the objects being diagnosed). This makes it possible to install diagnostic sensors directly on distributed and remote-controlled objects and transmit the received information using wireless data transmission channels.

The approach proposed in the article to organisation of systems monitoring railway automation facilities and devices makes it possible to abandon traditional structures of monitoring systems, to simplify the process of their design and operation, as well as to develop technical solutions that expand the set of diagnosed features and thereby increase completeness and depth of diagnosis and prediction. Interest in the presented technology may arise in case of limited dimensions of the premises where the monitored devices are installed, for example, at subway facilities.

The disadvantages of the proposed approach are obvious: it is necessary to consider the service life of autonomous power supplies during operation of sensors, organise communication channels protected from interference, and also carry out periodic verification and calibration of measuring instruments. Despite the noted shortcomings, monitoring technologies using wireless data transmission channels are developing and will be developed and implemented at many technically complex and unique structures. Their use in the transport industry, including in the field of railway automation, is promising for the next decade.



REFERENCES

1. Lakin, I. K., Pavlov, V. V., Melnikov, V. A. «Smart locomotives»: diagnostics of traction electric motors of diesel locomotives using machine learning methods [*«Umnyi lokomotiv»: diagnostirovanie tyagovykh elektrodvigateli teplovozov s ispolzovaniem metodov mashinnogo obucheniya*]. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2018, Iss. 1, pp. 53–56. [Electronic resource]: <http://rostransport.com/transportrf/download.php?src=/transportrf/pdf/74/1994-831X-2018-1-53-56.pdf>. Last accessed 12.06.2020.
2. Efanov, D. V., Barch, D. V., Osadchiy, G. V. Stationary monitoring systems and digital railway contact suspension [*Sistemy statsionernogo monitoringa i tsifrovaya zheleznodorozhnaya kontaktная podveska*]. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2019, Iss. 4, pp. 41–44. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-statsionarnogo-monitoringa-i-tsifrovaya-zheleznodorozhnaya-kontaktная-podveska/pdf>. Last accessed 12.06.2020.
3. Ivanov, A. A., Legonkov, A. K., Molodtsov, V. P. Data transmission from moving equipment devices by APK-DK equipment in the absence of a physical line and round-the-clock duty [*Peredacha dannykh s ustroystv oborudovaniya perezeda apparaturoi APK-DK pri otsutstvii fizicheskoi linii i kruglosutochnogo dezhurstva*]. *Avtomatika na transporte*, 2016, Vol. 2, Iss. 1, pp. 65–80. [Electronic resource]: http://atjournal.ru/ru/Home/Download?path=articles%2F2016_Vol.%202_No.%201_5_molodtsov.pdf. Last accessed 12.06.2020.
4. Nesterov, V. V. Development of STDМ, ASU-Sh-2 and AOS-ShCh systems [*Razvitiye sistem STDМ, ASU-Sh-2 i AOS-ShCh*]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2012, Iss. 12, pp. 45–46. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18259709>. Last accessed 12.06.2020.
5. Theeg, G., Vlasenko, S. Railway Signalling & Interlocking: 3rd ed. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020, 552 p. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42536131>. Last accessed 12.06.2020.
6. Molodtsov, V. P., Ivanov, A. A. Systems of dispatch control and monitoring of devices of railway automation and telemechanics [*Sistemy dispetcherskogo kontrolya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki*]. St. Petersburg, PSTU publ., 2010, 140 p.
7. Fedorchuk, A. E., Sepetyy, A. A., Ivanchenko, V. N. Automation of technical diagnostics and monitoring of ZhAT devices (ADK-STSB system) [*Avtomatizatsiya tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv ZhAT (Sistema ADK-SCB)*]. Moscow, TMC RT publ., 2013, 400 p. [Electronic resource]: <https://b-ok-global/dl/2900845/33264c>. Last accessed 12.06.2020.
8. Domingues, J. L. M. Diagnostic Levels in Railway Applications. *Signal+Draht*, 2004, Iss. 1/2, pp. 31–34.
9. Asada, T. Novel Condition Monitoring Techniques Applied to Improve the Dependability of Railway Point Machines. University of Birmingham, UK, Ph.D. thesis, May 2013, 149 p. [Electronic resource]: <http://etheses.bham.ac.uk/4155/1/Asada13PhD.pdf>. Last accessed 12.06.2020.
10. Jin, W., Shi Z., Siegel, D., Dersin, P., Douziech, C., Pugnaroni, M., La Cascia, P., Lee, J. Development and Evaluation of Health Monitoring Techniques for Railway Point Machines. 2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM), 22–25 June 2015, Austin, TX, USA, DOI: 10.1109/ICPHM.2015.7245016.
11. Böhm, T. Remaining Useful Life Prediction for Railway Switch Engines Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines. *International Journal of Prognostics and Health Management* 8 (Special Issue on Railways & Mass Transportation), December 2017, 15 p. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Boehm5/publication/322603073-Remaining_Useful_Life_Prediction_for_Railway_Switch_Engines_Using_Artificial_Neural_Networks_and_Support_Vector_Machines/links/5a62479a4585158bca4c39d4/Remaining-Useful-Life-Prediction-for-Railway-Switch-Engines-Using-Artificial-Neural-Networks-and-Support-Vector-Machines.pdf. Last accessed 12.06.2020.
12. Heidmann, L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance. *Signal+Draht*, 2018 (110), Iss. 9, pp. 70–75. [Electronic resource]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=325895>. Last accessed 12.06.2020.
13. Wernet, M., Brunokowski, M., Witt, P., Meiwald, T. Digital Tools for Relay Interlocking Diagnostics and Condition Assessment. *Signal+Draht*, 2019 (111), Iss. 11, pp. 39–45. [Electronic resource]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=1136153&lng=en>. Last accessed 12.06.2020.
14. Hahanov, V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. New York, Springer International Publishing AG, 2018, 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
15. Autonomous wireless measuring devices [*Autonomnie besprovodnie izmeritelnye ustroystva*]. *Schneider Electric, MKP-BRC-ACCUTECH-13*, 2013, Iss. 6, 12 p. [Electronic resource]: https://download.schneider-electric.com/files?p_endDocType=Brochure&p_File_Id=5916220128&p_File_Name=Accutech-brochure_2016.pdf&p_Reference=MKP-BRC-ACCUTECH-13. Last accessed 12.06.2020.
16. Fritz, C. Intelligent Point Machines. *Signal+Draht*, 2018 (110), Iss. 12, pp. 12–16. [Electronic resource]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=469469&lng=en>. Last accessed 12.06.2020.
17. Kassa, E., Skavhaug, A., Kaynia, A. M. Monitoring of Switches & Crossing (Tornouts) and Tracks. Decision Support Tool for Rail Infrastructure, EU Project No. 636285, 41 p. [Electronic resource]: <http://www.destinationrail.eu/ajax/DownloadHandler.php?file=2123>. Last accessed 12.06.2020.
18. Efanov, D. V. Functional control and monitoring of devices of railway automation and telemechanics [*Funktsionalnyy kontrol i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki*]. St. Petersburg, PSTU publ., 2016, 171 p. [Electronic resource]: https://www.studmed.ru/efanov-d-v-funktsionalnyy-kontrol-i-monitoring-ustroystv-zheleznodorozhnoy-avtomatiki-i-telemekhaniki_615d76c768b.html. Last accessed 12.06.2020.
19. Efanov, D., Pristensky, D., Osadchy, G., Razvitnov, I., Sedykh, D., Skurlov, P. New Technology in Sphere of Diagnostic Information Transfer within Monitoring System of Transportation and Industry. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 231–236. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110152.
20. Efanov, D. V. Integration of continuous monitoring and traffic control systems on railway transport [*Integratsiya sistem nepreryvnogo monitoringa i upravleniya dvizheniem na zheleznodorozhnom transporte*]. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2017, Iss. 4, pp. 62–65. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-sistem-nepreryvnogo-monitoringa-i-upravleniya-dvizheniem-na-zheleznodorozhnom-transporte/pdf>. Last accessed 12.06.2020.
21. Efanov, D. V., Osadchiy, G. V. The concept of control systems based on information technologies [*Kontseptsiya sistem upravleniya na osnove informatsionnykh tekhnologii*]. *Avtomatika, svyaz, informatika*, 2018, Iss. 5, pp. 20–23. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34917661>. Last accessed 12.06.2020. ●



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА 136

Техническая диагностика:
экономический аспект.

АВТОХОЗЯЙСТВО 158

Влияние расстояния
на эксплуатационные
расходы. Дальше, не всегда
значит дороже.



АВТОПРОИЗВОДИТЕЛИ НА РЫНКЕ 170

Куда и как им расти?
Как влияют на спрос новые
тренды и мобильность
как услуга,

АУДИТ 184

Международный опыт
применительно
к региональным
транспортным системам.

ЭКОНОМИКА • ECONOMICS



EFFICIENCY OF THE ROLLING STOCK OPERATION 147

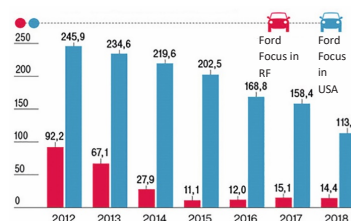
Technical diagnostics:
economic aspect.

ROAD TRANSPORT 164

Impact of the distance run on
the operational costs. Longer
route is not always more
expensive.

CAR MANUFACTURERS IN THE MARKET 177

How and where can they grow?
To what extent is the demand
influenced by new trends and
MaaS?



AUDIT 196

International experience
regarding regional transport
systems.



Обоснование необходимости систем диагностирования локомотивов



Александр СЕМЕНОВ



Игорь ЛАКИН

*Семенов Александр Павлович — Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»), Омск, Россия.
Лакин Игорь Капитонович — Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

В мировой и отечественной практике технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов с целью снижения затрат их жизненного цикла прослеживается тенденция расширенного применения систем технического диагностирования, перехода на предиктивный ремонт. Современные аппаратно-программные средства позволяют создавать автоматизированные системы технического диагностирования (СТД) для всех видов оборудования локомотивов, но оснащение ими сервисных ремонтных локомотивных депо требует существенных капитальных затрат с недопустимо большим сроком окупаемости. Целью данной работы является разработка метода и соответствующей программы имитационного моделирования для определения технико-экономической целесообразности применения тех или иных средств технического диагностирования.

Системы диагностирования сокращают время ожидания ремонта, объем и себестоимость планового и непланового ТОиР, что позволяет сократить эксплуатируемый парк локомотивов.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, локомотивы, техническое обслуживание и ремонт, техническая диагностика, экономическая целесообразность, имитационное моделирование.

В современных экономических расчетах для оценки успешности инвестиционного проекта используется показатель «чистая приведенная к текущему дню стоимость проекта NPV (Net Present Value)». По этому принципу применительно к СТД разработан метод определения целесообразности внедрения различных типов СТД и соответствующие методика и программное обеспечение на алгоритмическом языке VBA (Visual BASIC for Applications) в среде MS Excel.

В работе выполнено имитационное моделирование окупаемости основных видов систем диагностирования для российских условий: бортовых на базе микропроцессорных систем управления, станций реостатных испытаний тепловозов, диагностирования тяговых электродвигателей и др. Доказана экономическая целесообразность внедрения этих систем. Также выявлены экономически нецелесообразные системы диагностирования, например, автоматического измерения профиля бандажа колесных пар.

*Информация об авторах:

Семенов Александр Павлович – кандидат технических наук, генеральный директор Открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»), докторант Российского университета транспорта, Омск, Россия, semalex_ar@mail.ru.

Лакин Игорь Капитонович – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, Lakini@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 01.12.2020, актуализирована 21.12.2020, принята к публикации 15.01.2021.

For the English text of the article please see p. 147.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АНАЛИЗА

Надёжная работа тягового подвижного состава — основная задача его системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [1; 2], при организации которой во всём мире есть тренд увеличения роли систем технического диагностирования (СТД)^{1, 2} [3–10]. Современные СТД строятся как автоматизированные (АСТД) на базе аппаратно-программных средств с использованием персональных компьютеров или микропроцессорных блоков управления [3–5; 16–17]. Однако стоимость АСТД достаточно высокая.

Выполненные в НИИТКД³ применительно к России исследования в части условий одного из ста сервисных локомотивных депо (СЛД) «Тында-Северная» [11; 12] Северного широтного хода Восточного полигона (БАМ) показали, что комплексное оснащение АСТД одного депо потребует не менее $Q_{\text{КСЛД}} > 450$ млн руб.: капитальные затраты на все СЛД превысят $Q_{\text{к}} = 100 \cdot 450 > 450$ млрд руб. При этом экспертная оценка позволяет оценить возможную экономию на уровне максимум 20 млрд руб., а фактически — не более 10 млрд руб.: срок окупаемости комплексной системы технического диагностирования составит недопустимые $450/20 > 20$ лет даже без учёта дисконтирования. Таким образом, целесообразность применения АСТД требует экономического обоснования для каждого вида оборудования с индивидуальной оценкой экономической целесообразности её внедрения.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОД И МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТД

Основным источником информации о техническом состоянии локомотива в настоящее время является бортовой рукописный журнал формы ТУ-152 [1; 3], в котором машинист фиксирует субъективные заме-

чания по работе локомотива. Например, «броски тока в тяге», «нет мощности на 15-й позиции», «нет входа в рекуперацию» и др. Второй не менее важный источник информации — это результаты визуальной приёмки локомотива на ТОиР, при которой фиксируются как комплектность локомотива и наличие проявлений вандализма, так и внешние признаки отказов: течь масла, наличие трещин и другое [6]. Наличие бортовых АСТД позволит определять предотказные состояния (работоспособные, но неисправные) до захода локомотива в депо. В результате возможно сокращение как числа опасных отказов, так и времени простоя локомотива в депо на плановых ремонтах и в ожидании поставки запасных частей.

Сокращение времени ТОиР высвобождает парк локомотивов: по мере сокращения времени простоя T на ремонте x накапливается резерв времени ΔT_x , который стремится стать равным времени эксплуатации одного локомотива $T_{\text{л}}$:

$$T_{\text{л}} = \sum_{x=1}^X (\Delta T_x), \quad (1)$$

где X — число ремонтов с экономией времени.

Экономия времени простоя на ремонте позволит сократить число закупаемых локомотивов в объёме $N_{\text{л}}$:

$$N_{\text{л}} = \sum_{y=1}^Y (\Delta T_y) / T_{\text{л}}, \quad (2)$$

где Y — общее число ремонтов с экономией времени благодаря СТД.

Первый вид экономии от внедрения СТД составит R_1 :

$$R_1 = C_{\text{л}} \cdot T_{\text{л}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{л}}$ — стоимость одного локомотива.

Второй эффект R_2 будет от сокращения стоимости ремонта ввиду использования элементов ремонта по фактическому техническому состоянию [4–6]. Часто используется термин «предиктивный» или «предсказательный» ТОиР (Predictive maintenance). На рис. 16 показана динамика получения эффекта R_2 . На каждом ремонте i за счёт невыполнения части планово-предупредительных работ будет достигаться эффект ΔR_{2i} . При этом следует учесть, что на ремонте X может понадобиться усиленный ремонт, который приведёт к удорожанию ТОиР на сумму ΔR_{2X} . Эффект от предиктивного ремонта:

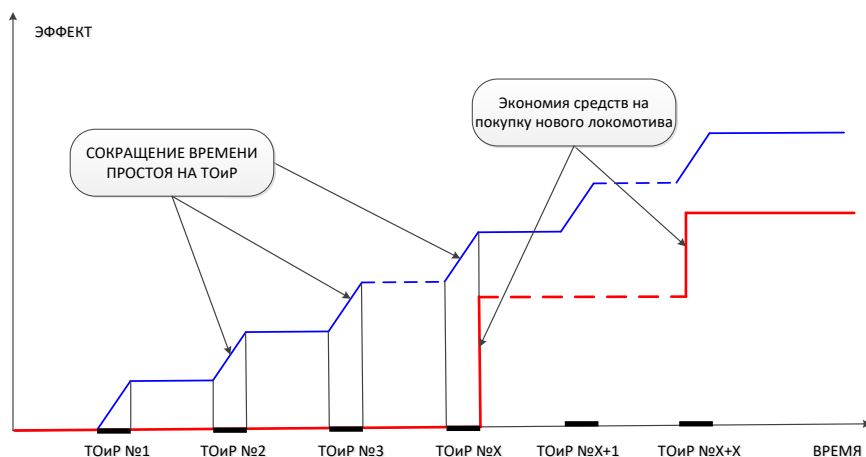
$$R_2 = \sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) - \Delta R_{2X}. \quad (4)$$

¹ ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200009481>. Доступ 21.12.2020.

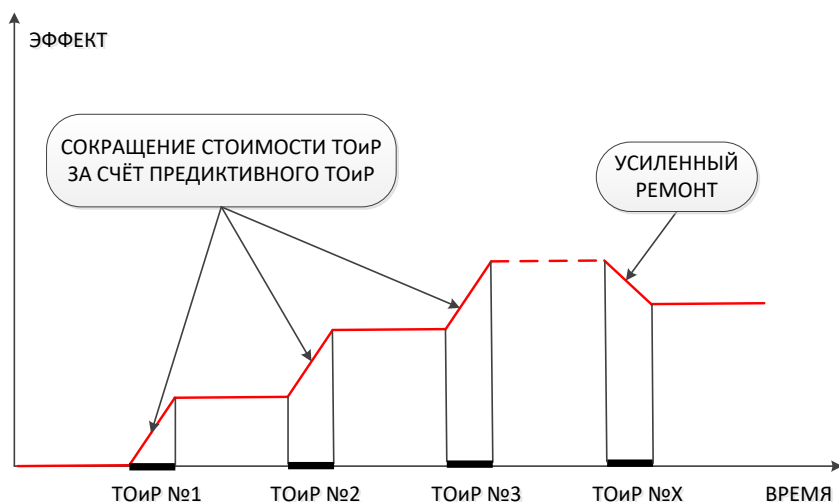
² ГОСТ 27.002–2015. Надёжность в технике (ССНТ). Термины и определения. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200136419>. Доступ 21.12.2020.

³ Официальный сайт НИИТКД. [Электронный ресурс]: <http://niitkd.com>. Доступ 21.12.2020.

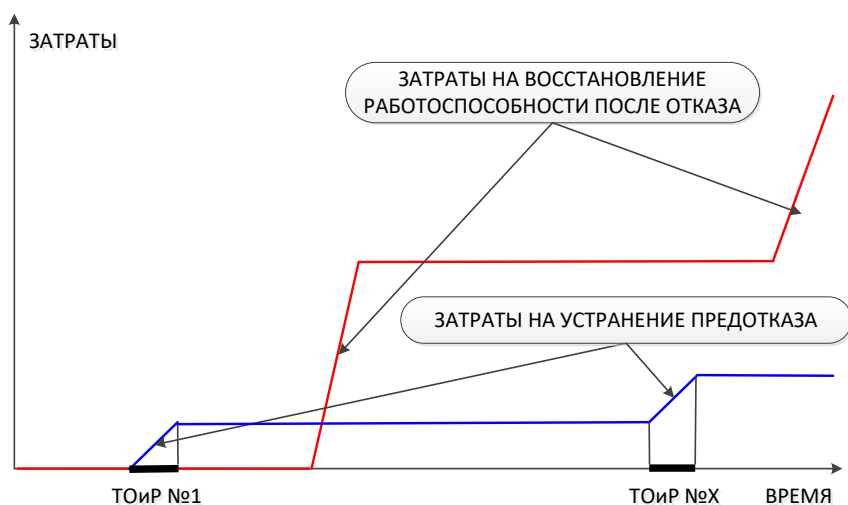




а – R_1 от сокращения парка локомотивов.



б – R_2 от предиктивного обслуживания.



в – R_3 от снижения последствий отказов.

Рис. 1. Эффект R от применения СТД (составлено авторами).

Таблица 1

Межремонтные пробеги локомотивов для расчёта NPV [1]

Серия	НР	ТО-1	ТО-2	ТО-3	ТО-4	ТР-1	ТР-2	ТР-3	СР	КР
ЭС5К	200	0,400	2,4	-	300	30	300	600	1200	2400
ЭС4К	180	0,200	1,67	-	300	30	300	600	1200	2400
ТЭ10МК	120	0,175	3,5	7,2	300	29	115	210	720	1420
2ТЭ25КМ	150	0,175	3,5	15	300	75	300	600	1200	2400

Эффект достигается при условии, что:

$$\sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) < \Delta R_{2X}. \quad (5)$$

Третий вид эффекта R_3 от СТД — это предотвращение дорожных отказов за счёт устранения предотказа. Например, восстановление предотказного состояния крышки цилиндра дизеля может предотвратить появление трещин с дальнейшей отбраковкой крышки. При этом число устранений предотказов может быть больше числа отказов, но общая стоимость unplanned ремонтов сократится:

$$R_3 = R_{\text{отк}} - \sum_{n=1}^N (R_{\text{пред } n}), \quad (6)$$

где n — очередное устранение предотказного состояния;

N — общее число устранения предотказных состояний;

$R_{\text{пред } n}$ — стоимость устранения n -го предотказа;

$R_{\text{отк}}$ — стоимость устранения отказа и восстановления работоспособности.

Затраты СТД складываются из капитальных затрат на приобретение, установку и запуск СТД в эксплуатацию Q_k и текущих затрат на эксплуатацию СТД Q_y , состоящих из фонда заработной платы диагностов, стоимости энергоресурсов, метрологического и других видов обслуживания.

В программе моделирования эффективности СТД взят показатель «Чистая приведённая к текущему дню, стоимость проекта NPV» (Net Present Value) [13], согласно которому инвестиционный проект целесообразен при положительном значении $NPV > 0$ за время t меньше заданного. Программа реализована авторами на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel [14].

При расчёте NPV обычно время t берётся как целое число по годам. В разработанной программе предлагается процесс дисконтирования представить как непрерывный процесс интегрирования:

$$NPV = -Q_k + \int CF(t)(1+R)^{-t} dt, \quad (7)$$

где Q_k — капитальные затраты на приобретение и внедрение СТД.

$CF(t)$ — денежный поток в момент времени t ;

R — аннуитетный коэффициент дисконтирования.

В программе формула 7 реализована как двойное суммирование:

$$NPV = -Q_k + \sum \sum (ZE_{ym} - ZT_{ym}) \cdot I, I^{-(y+m/12)}, \quad (8)$$

где y — цикл по годам с нулевого года по десятый: $y \in [0, 10]$;

m — цикл по 12 месяцам каждого года: $m \in [1, 12]$;

ZE_{ym} и ZT_{ym} — полученный эффект и затраты в y -м году и m -м месяце.

Эффекты и затраты связаны с проводимыми плановыми и unplanned ТОиР, время наступления которых зависит от пробега локомотива, который в программе определяется по заданному среднесуточному пробегу с учётом времени простоя на ремонте.

Эксплуатационные затраты Q_y на обслуживание локомотива задаются как: зарплата диагностов, аренда помещений и другие постоянные расходы, удельные затраты на диагностирование (расход электроэнергии, материалов, топлива, масла и другие статьи расходов).

При моделировании задаются нормативные межремонтные пробеги (табл. 1), так как они строго регламентированы: перепробег локомотивов недопустим по условиям безопасности движения поездов, а недопробег приводит к дополнительным затратам на ТОиР. Периодичность ТО-1 и ТО-2 в км пересчитана из часов по среднесуточному пробегу локомотива (табл. 1).

Время на ТОиР локомотивов всех видов нормировано, но фактический простой гораздо больше. Например, 2ТЭ10МК на ТР-1 при норме 36 ч. стоит в среднем 150 ч., на ТР-2 при норме четверо суток стоит 13. Поэтому при моделировании взяты реальные простои по сериям локомотивов, вычисленные авторами путём обработки



Расчётное время простоя на ТОиР по сериям, минуты (составлено авторами)

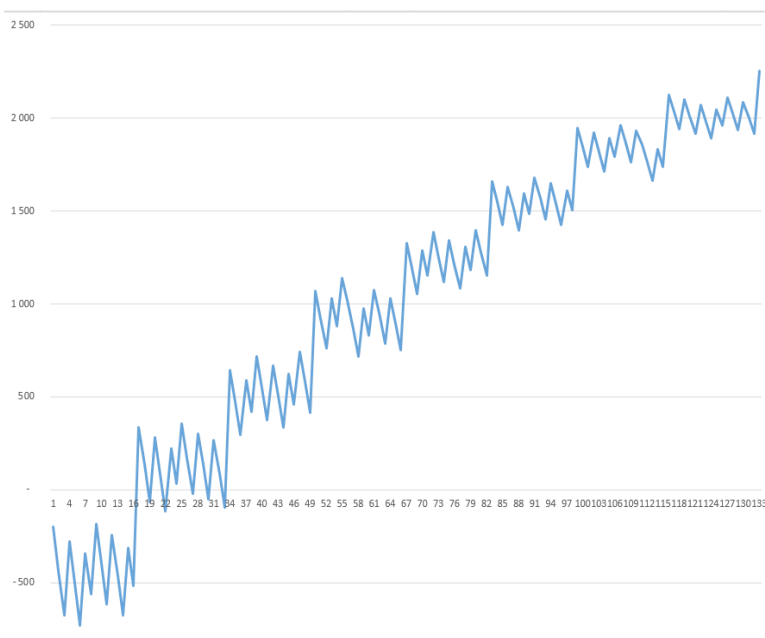
	НР	ТО-2	ТР-1	ТР-1+ТО-4	ТР-2	ТР-3	КР	ТО-4	ТО-3
ВЛ80Р	741	85	2106	2552	5590	14542	12247	1026	
СКО	2757	24	1620	1708	1458	4971	6817	1068	
Квар	3,72	0,28	0,77	0,67	0,26	0,34	0,56	1,04	
N	560	4695	23	168	13	6	8	22	
ВЛ80С	740	78	2183	2239	4907	11592	42181	864	
СКО	2765	24	2142	1581	1827	4384	11854	928	
Квар	3,74	0,31	0,98	0,71	0,37	0,38	0,28	1,07	
N	583	4382	57	182	11	7	6	58	
2ЭС5К	964	100	1500	3390	4139	7130	0	962	
СКО	3093	28	1056	2530	2232	4441		979	
Квар	3,21	0,28	0,70	0,75	0,54	0,62		1,02	
N	304	3710	89	38	9	11	0	46	
3ЭС5К	945	90	1850	2217	4564	10877	0	1713	
СКО	3053	24	933	2189	3197	3360		3744	
Квар	3,23	0,27	0,50	0,99	0,70	0,31		2,19	
N	263	3718	110	70	18	10	0	46	
2ЭС4К	1567	93	5880	14282	14826	18776	0	6227	
СКО	16523	31	6654	2127	5581	9196		4916	
Квар	10,54	0,34	1,13	0,15	0,38	0,49		0,79	
N	404	3323	59	2	5	9	0	10	
3ЭС4К	789	109	4856	0	7124	25939	0	6395	
СКО	3681	58	9260		2825	10821		9387	
Квар	4,66	0,54	1,91		0,40	0,42		1,47	
N	675	1704	134	0	16	9	0	36	
2ТЭ10МК	2146	81	8971	10526	19230	29295	31435	2730	3064
СКО	17617	55	5290	10178	11795	15717		6356	3961
Квар	8,21	0,68	0,59	0,97	0,61	0,54		2,33	1,29
N	608	4068	46	13	11	7	1	45	88
3ТЭ10МК	1278	93	8526	7466	24317	13796	13386	3568	6033
СКО	5212	23	6303	5186	7030	4549	13479	3871	7303
Квар	4,08	0,25	0,74	0,69	0,29	0,33	1,01	1,08	1,21
N	1100	4648	61	15	13	4	5	21	78
2ТЭ116У	1172	73	4581	3329	12452	15284	0	997	2615
СКО	4027	19	8871	2267	4964	2638		1227	3344
Квар	3,44	0,27	1,94	0,68	0,40	0,17		1,23	1,28
N	459	2664	36	13	10	9	0	35	161
2ТЭ25КМ	2295	77	2890	2871	11274	106	0	2416	1813
СКО	15550	18	2673	957	2571			3135	2051
Квар	6,78	0,23	0,93	0,33	0,23			1,30	1,13
N	437	3126	60	7	12	1	0	48	244

данных информационной системы ОАО «РЖД» АСОУП (автоматизированная система оперативного управления поездами). В табл. 2 приведены результаты расчёта: для каждой серии локомотивов, по каждому виду ремонта по данным АСОУП рассчитаны математическое ожидание простоя M , среднеквадратичное отклонение σ и коэффициент вариации $Kвар = \sigma / M$ [15].

Наиболее предсказуемым (унимодальным) оказалось время простоя на ТО-2 ($M = 86$ минут, $\sigma = 11$, $Kвар = 0,13$), что во многом объясняется принятым в ОАО «РЖД» порядком смены состояния ТО-2 на неплановый ремонт (НР) при превышении времени простоя. Большой разброс имеет место по неплановым ремонтам ($M = 1199$ минут, $\sigma = 572$, $Kвар = 0,48$) и обточке

	B	C	D	E	F	G	H
1	МПСУ						2 254
2	1	2	3	4	5	6	7
3	Год	Месяц	R	Пробег, тыс.км	Затраты, тыс.руб.	Эффекты, тыс.руб.	NPV
4	0	0	1,000	-	- 200,000	-	- 200
5	0	1	0,992	12,167	- 290,000	53,104	- 435
6	0	2	0,984	23,967	- 285,500	44,253	- 672
7	0	3	0,976	35,798	- 294,500	697,609	- 279
8	0	4	0,969	45,968	- 273,500	44,253	- 501
9	0	5	0,961	57,826	- 290,000	53,104	- 729
10	0	6	0,953	69,626	- 294,500	697,609	- 344
11	0	7	0,946	79,796	- 272,000	44,253	- 560
12	0	8	0,938	91,657	- 296,000	697,609	- 183
13	0	9	0,931	101,823	- 273,500	44,253	- 396
14	0	10	0,924	113,681	- 288,500	53,104	- 614
15	0	11	0,916	125,484	- 294,500	697,609	- 244
16	0	12	0,909	135,654	- 283,500	44,253	- 462
17	1	1	0,902	147,512	- 288,500	53,104	- 674
18	1	2	0,895	159,316	- 294,500	697,609	- 313
19	1	3	0,888	169,486	- 273,500	44,253	- 517
20	1	4	0,881	181,343	- 303,500	1 272,371	336
21	1	5	0,874	191,078	- 270,500	44,253	139
22	1	6	0,867	202,943	- 288,500	53,104	- 65
23	1	7	0,860	214,746	- 294,500	697,609	281
24	1	8	0,853	224,916	- 273,500	44,253	86
25	1	9	0,846	236,774	- 288,500	53,104	- 113
26	1	10	0,840	248,577	- 294,500	697,609	225

Рис. 2. Результат моделирования NPV одной СТД (составлено авторами).



колёсных пар ($M = 2475$ минут, $\sigma = 2024$, $\text{Квар} = 0,82$). Таким образом, время простоя на всех видах ТОиР (кроме ТО-2 на пунктах технического обслуживания локомотивов — ПТОЛ) имеет большой разброс, что требует индивидуального подхода при введении исходных данных при моделировании.

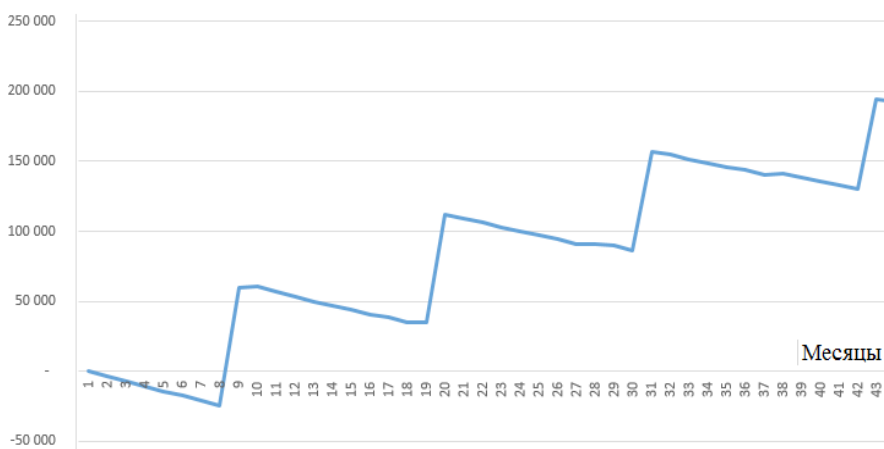
Результаты моделирования представляются в виде таблицы и графика изменения NPV по месяцам (рис. 2).

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТД

Бортовое диагностирование производится на базе штатных микропроцессорных систем управления (МСУ), поэтому диагностическая функциональность является «бесплатной». Капитальные затраты Q_k включают в себя создание автоматизированного рабочего места (АРМ) диагноста, его приобретение и обслуживание. Текущие затраты связаны в основном с заработной платой диагностов.

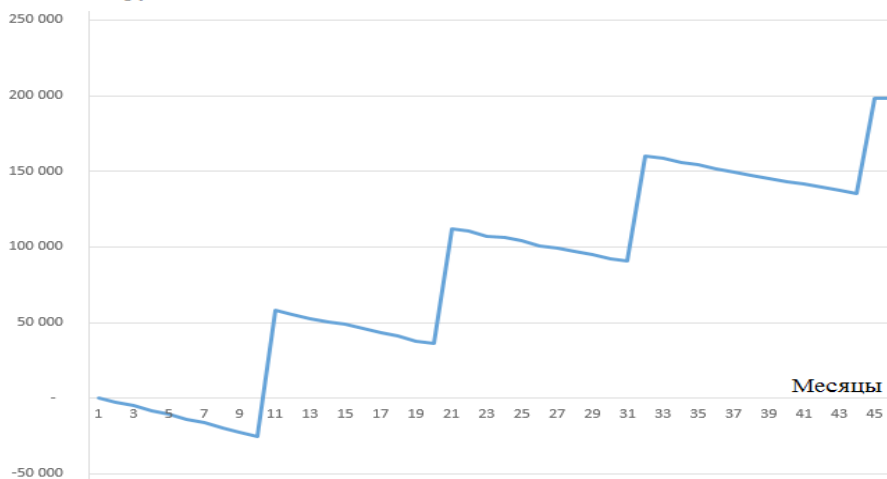


NPV, тыс.руб.



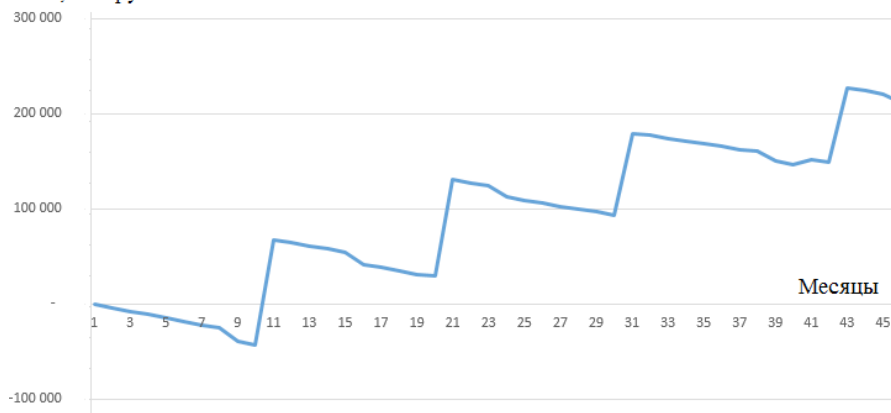
а – МСУД электровозов переменного тока серий ЭС5К с ВИП.

NPV, тыс.руб.



б – МПСУ электровозов постоянного тока серий ЭС4К.

NPV, тыс.руб.



в – МСУ-ТП тепловозов серии 2ТЭ25КМ.

Рис. 3. Результаты расчёта NPV для бортовой диагностики на базе МСУ (составлено авторами).

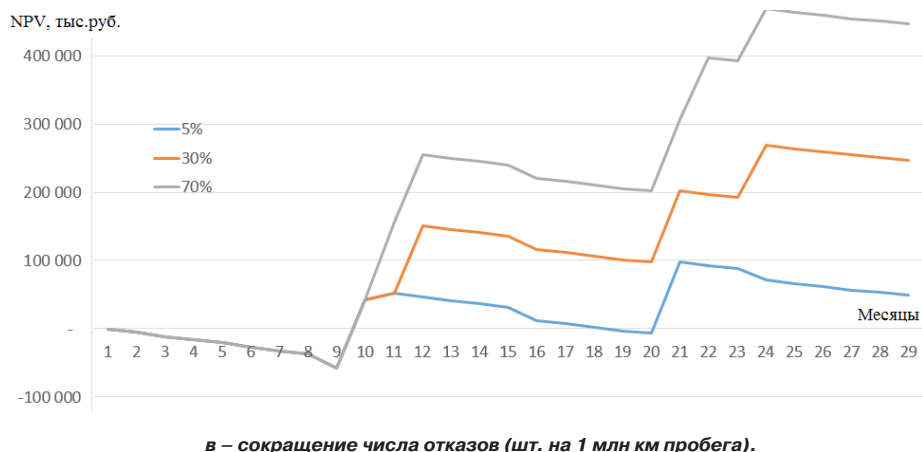
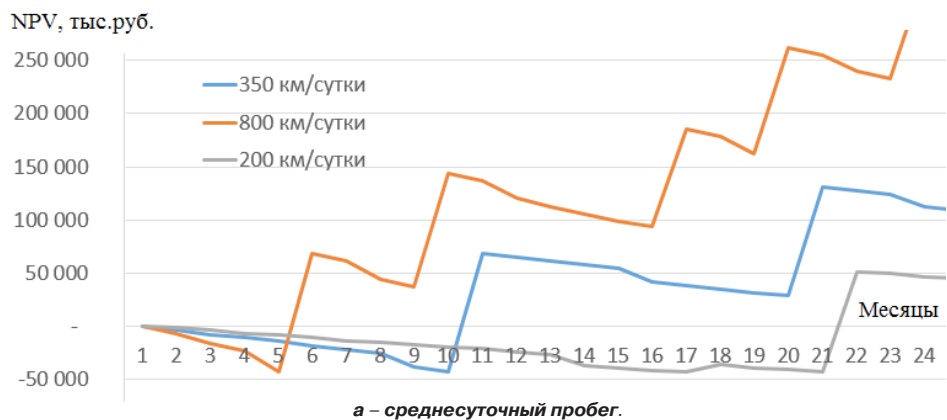


Рис. 4. Влияние исходных данных на результат NPV на примере МСУ-ТП (составлено авторами).

Эффект от бортовой диагностики есть при приёмке локомотива (ТО-1), на ПТОЛ (ТО-2). При выполнении ТО-3 и ТР-1 проводится глубокая диагностика. Для этого данные МСУ о работе локомотива вводятся в стационарный компьютер (по радио-

каналу, с Flash-накопителя, по Wi-Fi и др.) для диагностирования с помощью специализированного программного обеспечения (АРМ МСУ): выявляются скрытые дефекты и предотказы. На «тяжёлых» видах ТОиР диагностирование МСУ не требуется.



NPV, тыс.руб.

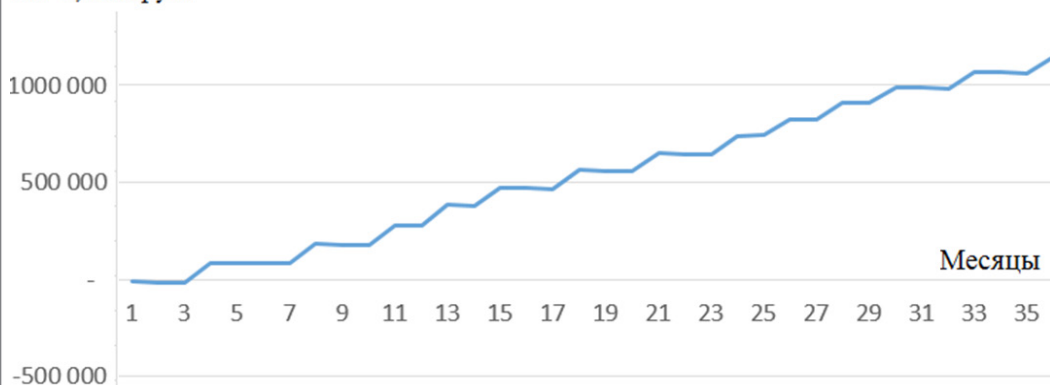


Рис. 5. Результаты расчёта NPV для станции реостатных испытаний (составлено авторами).

Таблица 3

Процент сокращения парка локомотивов при применении АСТД (составлено авторами)

АСТД	Серия локомотива	Сокращение парка, %
Бортовая АСТД на базе МСУД (МСУД)	ЭС5К	2,8 %
Бортовая АСТД на базе МПСУ (МПСУ)	ЭС5К	2,8 %
Бортовая АСТД на базе МСУ-ТП (МСУ-ТП)	2ТЭ25КМ	3,3 %
Бортовая АСТД на базе АПК БОРТ	2ТЭ25КМ,	1,0 %
Станция реостатных испытаний (Реостат)	2ТЭ116У, ТЭ10МК	12,5 %
Вибродиагностирование КМБ (Вибро)	ЭС5К	3,0 %
Стенд испытаний ТЭД (ТЭД)	ЭС5К	0,5 %
Система замера профиля бандажа колёсных пар (КП)	ЭС5К	0,0 %
АСТД «Доктор»	ЭС5К	0,7 %

Эффект от МСУ достигается за счёт сокращения времени ТОиР, а главное — за счёт предотвращения неплановых ремонтов за счёт устранения их на стадии предотказа. Основной денежный поток составляет экономия потребного для осуществления перевозок локомотивного парка. Основная эксплуатационная статья расходов — заработная плата диагностов.

На рис. 3 приведён результат моделирования для трёх массовых типов МСУ: МСУД электровазозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К, ЭП1, ЭП1М, ЭП1П, МПСУ электровазозов постоянного тока (2ЭС4К, 3ЭС4К) и МСУ-ТП тепловозов 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25КМ. Дисконтированный срок окупаемости системы диагностирования на базе МСУ — менее года. Резкие скачки вверх на рис. 3 и далее соответствуют сокращению парка локомотивов на одну единицу.

Моделирование показало высокую чувствительность модели к одним исходным

параметрам и низкую — к другим (рис. 4). Большое влияние оказывает среднесуточный пробег (рис. 4а), уменьшение которого может сделать АСТД нерентабельной из-за редкого проведения ТОиР при сохранении текущих затрат. Аналогично влияет число обслуживаемых локомотивов (рис. 4б). Главный эффект достигается за счёт сокращения числа неплановых ремонтов (рис. 4в). В меньшей степени влияют стоимость восстановления исправности локомотива и заработная плата диагностов.

Главным эффектом практически от всех СТД стало сокращение парка локомотивов. И, наоборот, не дающие этого эффекта СТД оказались нерентабельными.

На рис. 5 приведены результаты моделирования NPV станций реостатных испытаний дизель-генераторной установки тепловозов. Экономический эффект определяется как потери, которые понесёт локомотивное хозяйство в случае отсутствия реостатных испытаний: существенно возрастёт число неплановых ремонтов, увели-

Таблица 4

Процент от общего эффекта от сокращения времени простоя на ТООИР при применении АСТД (составлено авторами)

АСТД	ТО-1	ТО-2	ТО-3	ТО-4	ТР-1	ТР-2	ТР-3	СР	КР	НР
МСУД	16,6 %	23,1 %			44,8 %					15,5 %
МПСУ	20,3 %	16,9 %			49,4 %					13,4 %
МСУ-ТП	19,6 %	5,7 %	34,4 %		1,3 %					39,0 %
АПК Борт			67,9 %		2,5 %					29,6 %
Реостат			48,4 %		21,6 %	11,6 %	7,8 %	2,1 %		8,6 %
Вибро					65,9 %					34,1 %
ТЭД							26,3 %	22,5 %	11,3 %	39,9 %
КП				3,6 %	96,4 %					

Таблица 5

NPV АСТД на одно депо с парком 200–300 локомотивов (составлено авторами)

АСТД	Срок окупаемости, мес.	Срок окупаемости, лет	NPV за 3 года, млн руб.	NPV за 6 лет, млн руб.
МСУД	8	0,67	141	251
МПСУ	10	0,83	150	266
МСУ-ТП	10	0,83	162	357
Реостат	3	0,25	1 144	2020
Вибро	11	0,91	251	385
ТЭД	14	1,17	6	75
КП	–	–	-10	-13
Доктор	32	2,67	43	80

чится число возвратов локомотива в депо приёмщиком ОАО «РЖД». Несмотря на высокую стоимость станции, её окупаемость происходит за несколько месяцев, так как отсутствие реостатных испытаний приведёт к существенному росту дорогих отказов дизель-генераторной установки.

Эффект от вибродиагностирования заключается в исключении неплановых ремонтов по отказам колёсно-моторных блоков (КМБ), сокращении объёма текущих ремонтов при отсутствии замечаний по техническому состоянию КМБ. Станции испытания тяговых электродвигателей (ТЭД) методом взаимной нагрузки используются после «тяжёлых» видов ремонта: ТР-3, СР и КР. Испытание двигателей позволяет проверить их исправность и исключить соответствующие отказы во время эксплуатации. Кроме того, снятие характеристик ТЭД позволяет произвести их подбор и исключить дополнительные отказы по причине разброса характеристик

ТЭД. Отрицательный NPV получен для системы автоматического замера профиля колёсных пар. Результаты выполненных расчётов NPV приведены в табл. 3–5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Практическое применение АСТД требует технико-экономического обоснования (ТЭО), так как в целом их окупаемость составляет десятки лет.

2. При выборе типа АСТД предпочтение следует отдавать бортовым и встроенным АСТД. В случае их нецелесообразности – переносным и стационарным.

3. Разработаны метод оценки технико-экономической целесообразности внедрения различных видов АСТД и соответствующее программное обеспечение на алгоритмическом языке VBA в среде MS Excel. За основу взят метод расчёта показателя «Чистая приведённая к текущему дню стоимость проекта NPV (Net Present Value)».





4. Произведено моделирование окупаемости основных видов АСТД с факторным анализом влияния различных параметров (размер парка, среднесуточный пробег, интенсивность отказов, сокращение числа отказов).

5. Моделирование показало экономическую целесообразность следующих АСТД: бортовая на базе штатных микропроцессорных систем управления, специализированные бортовые АСТД диагностирования дизель-генераторных установок для тепловозов без МСУ, станции реостатных испытаний дизель-генераторных установок тепловозов, вибродиагностирование колёсно-моторных блоков (КМБ), диагностирование и испытание тиристоров ВИП, переносные системы диагностирования электрического оборудования.

6. Моделирование показало отсутствие экономического эффекта от внедрения ряда АСТД, в т.ч. автоматической проверки профиля бандажа.

7. Главным эффектом от внедрения АСТД является сокращение эксплуатируемого парка локомотивов.

8. Существенное влияние на эффективность АСТД оказывает сокращение времени ремонта. Относительно низкое влияние оказывает стоимость восстановления работоспособности и начальная стоимость АСТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв В. И., Гапанович В. А., Лакин И. К. и др. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава: Учеб. Пособие. — М.: ИРИС Групп, 2012. — 576 с.

2. Wyman, O. Train Maintenance. The RailWay Technical Website. [Электронный ресурс]: <http://www.railway-technical.com/trains/train-maintenance/>. Доступ 21.12.2020.

3. Лакин И. К. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / Под общ. ред. И. К. Лакина. — М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. — 212 с.

4. Аболмасов А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания / Дис... канд. техн. наук. — М.: МИИТ, 2017. — 180 с. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/49152812-Abolmasov-aleksey-aleksandrovich-upravlenie-tehnicheskim-sostoyaniem-tyagovogo-podvizhnogo-sostava-v-usloviyah-servisnogo-obsluzhivaniya.html>. Доступ 21.12.2020.

5. Лакин И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов / Дис... канд. техн. наук. — М.: МИИТ, 2016. — 211 с. [Электронный ресурс]: [https://docplayer.ru/46381822-Lakin-igor-igorevich-monitoring-tehnicheskogo-sostoyaniya-lokomotivov-po-](https://docplayer.ru/46381822-Lakin-igor-igorevich-monitoring-tehnicheskogo-sostoyaniya-lokomotivov-po-dannym-bortovyh-apparatno-programmnyh-kompleksov.html)

dannym-bortovyh-apparatno-programmnyh-kompleksov.html. Доступ 21.12.2020.

6. Пустовой И. В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием / Дис... канд. техн. наук. — Омск: ОмГУПС, 2019. — 181 с. [Электронный ресурс]: <http://www.dslib.net/organizacia-proizvodstva/razrabotka-informacionno-dinamicheskoy-modeli-upravleniya-servisnym-tehnicheskim.html>. Доступ 21.12.2020.

7. Головин В. И., Наговицын В. С. АСУ с функцией безопасности для электровоза 2ЭС6. — 2018. — № 4. [Электронный ресурс]: <http://scbist.com/>. Доступ 21.12.2020.

8. Семченко В. В., Лакин И. К., Чмилёв И. Е. Эксплуатация и техническое обслуживание электронных систем управления электровозов переменного тока. — Красноярск: Издательство дорожного центра внедрения Красноярской железной дороги, 2010. — 72 с.

9. Патент на изобретение от 24.10.2013 г. № 2569216. Способ управления обслуживанием и ремонтом железнодорожного транспорта и система для его осуществления. К. В. Липа, В. И. Гриненко, С. Л. Лянгасов, И. К. Лакин, А. А. Аболмасов и др. [Электронный ресурс]: <https://patentinform.ru/inventions/reg-2569216.html>. Доступ 21.12.2020.

10. Патент на изобретение от 21.07.2017 г. № 2626168. Способ технического диагностирования оборудования локомотива и устройство для его осуществления. К. В. Липа, В. И. Гриненко, С. Л. Лянгасов, И. К. Лакин, А. А. Аболмасов и др. [Электронный ресурс]: <https://patentinform.ru/inventions/reg-2626168.html>. Доступ 21.12.2020.

11. Комплексная система обеспечения эксплуатационной надёжности технических средств на основе диагностических методов мониторинга технического состояния и планирования технического обслуживания и ремонта подвижного состава. Отчёт о выполнении научно-исследовательской работы по теме: «Разработка требований к системе обеспечения эксплуатационной надёжности подвижного состава и методических основ для определения его технического состояния». — Омск: НИИТКД, 2011—765 с. [Электронный ресурс]: <https://refdb.ru/look/2818339-p2.html>. Доступ 21.12.2020.

12. Пилотный проект технического обслуживания и ремонта тепловозов типа ТЭ10 в депо Тынды Дальневосточной железной дороги. Отчёт НИР. — Омск: НИИТКД, 2012. — 146 с.

13. Формула расчёта NPV инвестиционного проекта. Сайт МСФО. [Электронный ресурс]: <http://msfodipfr.ru/formula-rascheta-npv-investitsionnogo-proekta-eto-prosto/>. Доступ 21.12.2020.

14. Осетрова И. С., Осипов Н. А. Microsoft Visual Basic for Application. — СПб: НИУ ИТМО, 2013. — 120 с.

15. Вентцель Е. С. Теория вероятности: Учебник. — 12-е изд., стер. — М.: Юстиция, 2018. — 658 с.

16. Hedlund, E. H., Roddy, N. E., Gibson, D. R., Bliley, R. G., Pander, J. E., Puri, A., O'Camb, T. E., Lovelace, J. H., Loncher, S., Pierro, M. J. Apparatus and Method for Performance and Fault Analysis. Патент США WO 01/3145. — General Electric Company, 2001. — 58 p. [Электронный ресурс]: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2001031450>. Доступ 21.12.2020.

17. Steuger, M. Velaro — customer oriented further development of a high-speed train. [Электронный ресурс]: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uid:76bd8e38-7ea4-43ad-b7d4-4d7ca9be50a9/fachartikel_zev-ail_siemens_velaro_en.pdf. Доступ 21.12.2020.



Justification of the Need for Locomotive Diagnostic Systems



Alexander P. SEMENOV



Igor K. LAKIN

*Semenov, Alexander P., JSC Scientific Research Institute of Technology, Control and Diagnostics of Railway Transport (JSC NIITKD), Omsk, Russia.
Lakin, Igor K., Russian University of Transport, Moscow, Russia*.*

ABSTRACT

In the world and domestic practices of technical maintenance and repair (TMR) of locomotives there exists a tendency for the expanded use of technical diagnostics systems, the transition to predictive repair to reduce the costs of their life cycle. Modern hardware and software tools make it possible to create automated technical diagnostics systems (ATDS) for all types of locomotive equipment but equipping service repair locomotive depots with them requires significant capital costs with an unacceptably long payback period. The objective of the work is to develop a method and a corresponding simulation modelling software program to determine technical and economic feasibility of using certain means of technical diagnostics.

Diagnostic systems reduce waiting time for repairs, the volume and cost of scheduled and unscheduled TMR, which makes it possible to reduce the operating fleet of locomotives.

Keywords: *transport, railway, locomotives, technical maintenance and repair, technical diagnostics, economic feasibility, simulation modelling.*

In modern economic calculations, to assess the success of an investment project, the indicator «Net present value (NPV)» of the project is used. Based on this principle, in relation to ATDS, a method for determining feasibility of introducing various types of ATDS and the corresponding methodology and software made with the algorithmic language VBA (Visual BASIC for Applications) in the MS Excel environment has been developed.

The work carried out simulation modelling for Russian conditions of the payback of main types of diagnostic systems comprising on-board based microprocessor control systems, rheostat testing stations for diesel locomotives, diagnostics of traction motors, etc. The economic feasibility of introducing these systems has been proved. Also, economically inexpedient diagnostic systems have been identified, for example, automatic measurement of the profile of a wheel set tire.

*Information about the authors:

Semenov, Alexander P. – Ph.D. (Eng), General Director of JSC Scientific Research Institute of Technology, Control and Diagnostics of Railway Transport (JSC NIITKD), doctoral student of Russian University of Transport, Omsk, Russia, semalex_ap@mail.ru.

Lakin, Igor K. – D.Sc. (Eng), Professor of Russian University of Transport, Moscow, Russia, Lakini@yandex.ru.

Article received 01.12.2020, revised 21.12.2020, accepted 15.01.2021.

For the original Russian text of the article please see p. 136.

1. Statement of the analysed problem

Reliable operation of traction rolling stock is the main task of its technical maintenance and repair system (TMR) [1; 2]. The organisation of TMR all over the world demonstrates a trend towards increased role of technical diagnostics systems (TDS^{1,2}) [3–10]. Modern TDSs are built as automated TDS (ATDS) on the basis of hardware and software using personal computers or microprocessor control units [3–5; 16; 17]. However, the cost of ATDS is quite high.

Research carried out at NIITKD³ regarding Russia and in relation to the conditions of one of a hundred service locomotive depots (SLD) which is «Tynda-Severnaya» [11; 12] of the Northern Latitudinal Railway of the Eastern Range (BAM) showed that the complex equipping with ATDS of a single depot will require at least $Q_{KSLD} > 450$ million roubles: capital costs for all SLD will exceed $Q_K = 100 \cdot 450 > 450$ billion roubles. At the same time, an expert assessment makes it possible to estimate possible savings at the level of a maximum of 20 billion roubles, and in fact, no more than 10 billion roubles: the payback period of the complex technical diagnostic system will be unacceptable ($450/20 > 20$ years) even without discounting. Thus, feasibility of using ATDS requires an economic justification for each type of equipment with an individual assessment of economic feasibility of its implementation.

2. The proposed method and methodology for calculating the efficiency of ATDS

The main source of information about the technical condition of the locomotive is currently the on-board handwritten journal of the form TU-152 [1; 3], in which the driver records subjective comments on locomotive operation. For example, «current surges in traction», «no power at the 15th position», «no entry to recuperation mode», etc. The second equally important source of information is

associated with the results of visual acceptance of the locomotive for TMR, during which the records are made on completeness of the locomotive and the presence of manifestations of vandalism, as well as on external signs of failures: oil leaks, cracks, etc. [6]. The presence of on-board ATDS will make it possible to determine pre-failure conditions (operable, but faulty) before the locomotive enters the depot. As a result, both a reduction in dangerous failures and a reduction in downtime of a locomotive in the depot for unscheduled repairs and waiting for delivery of spare parts are possible.

Reducing TMR time disengages part of the locomotive fleet: as the downtime T on repairs x decreases, the time reserve ΔT_x accumulates, which tends to become equal to operating time of a locomotive T_L :

$$T_L = \sum_{x=1}^X (\Delta T_x), \quad (1)$$

where X is number of repairs with time saving.

Saving downtime for repairs will reduce the number of purchased locomotives in the volume N_L :

$$N_L = \sum_{y=1}^Y (\Delta T_y) / T_L, \quad (2)$$

where Y is total number of time-saving repairs due to ATDS.

The first type of savings from introduction of ATDS will be R_1 :

$$R_1 = C_L \cdot T_L, \quad (3)$$

where C_L is cost of a locomotive.

The second effect R_2 will be achieved from a reduction in the cost of repairs based on the more exact choice of elements to be repaired according to the actual technical condition [4–6]. The term «predictive» maintenance is often used. Pic. 1b shows the dynamics of obtaining the effect R_2 . At each repair i , due to the absence of necessity to perform part of the scheduled preventive work, the effect ΔR_{2i} will be achieved. It should be borne in mind that repair X may require enhanced repair, which will lead to an increase in the cost of TMR by the amount of ΔR_{2X} . Effect of predictive repair:

$$R_2 = \sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) - \Delta R_{2X}. \quad (4)$$

The effect is achieved under the condition that:

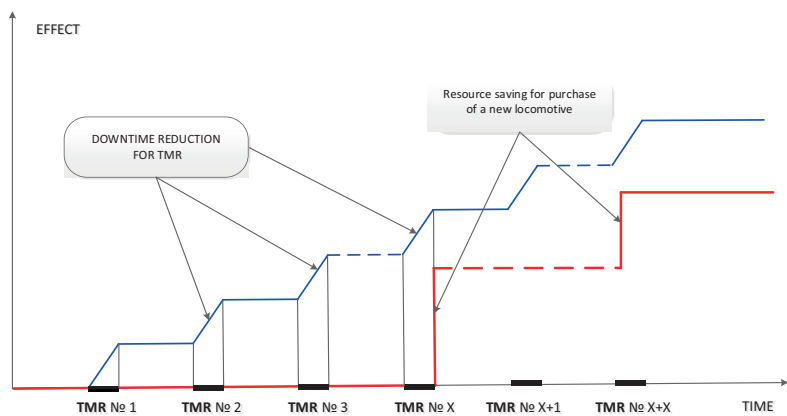
$$\sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) < \Delta R_{2X}. \quad (5)$$

The third type of R_3 effect from TDS is prevention of expensive failures by eliminating pre-failure. For example, restoring the pre-

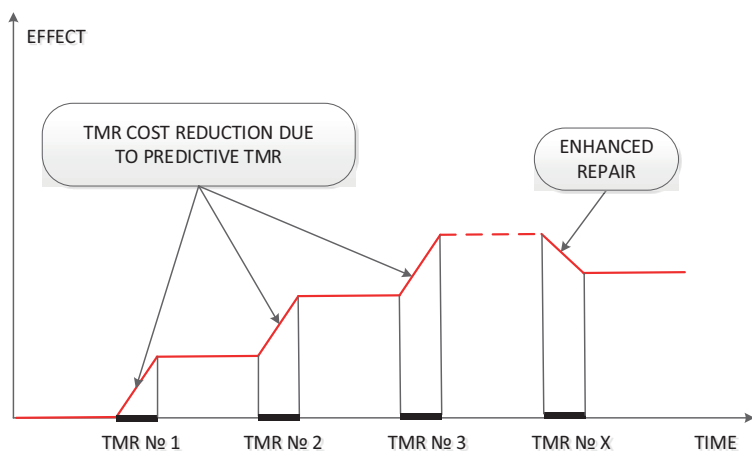
¹ GOST [state standard] 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200009481>. Last accessed 21.12.2020.

² GOST [state standard] 27.002-2015. Reliability in equipment (SSNT). Terms and definitions. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/1200136419>. Last accessed 21.12.2020.

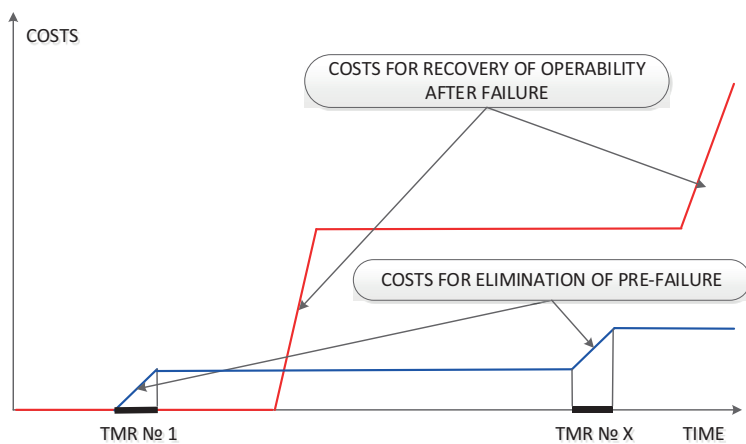
³ Official website of NIITKD. [Electronic resource]: <http://niitkd.com>. Last accessed 21.12.2020.



a – R_1 from reduction of the locomotive fleet.



b – R_2 from predictive maintenance.



c – R_3 from decrease of consequences of failures.

Pic. 1. Effect R from application of TDS (compiled by the authors).





Table 1

Overhaul mileage of locomotives for calculating NPV [1]

Series	IR	TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	CR-1	CR-2	CR-3	LO	HR ¹
ES5K	200	0,400	2,4	—	300	30	300	600	1200	2400
ES4K	180	0,200	1,67	—	300	30	300	600	1200	2400
TE10MK	120	0,175	3,5	7,2	300	29	115	210	720	1420
2TE25KM	150	0,175	3,5	15	300	75	300	600	1200	2400

Table 2

Estimated downtime for TMR by series, minutes (compiled by the authors)

	IR	TM-2	CR-1	CR-1+TM-4	CR-2	CR-3	HR	TM-4	TM-3
VL80R	741	85	2106	2552	5590	14542	12247	1026	
SKO	2757	24	1620	1708	1458	4971	6817	1068	
Kvar	3,72	0,28	0,77	0,67	0,26	0,34	0,56	1,04	
N	560	4695	23	168	13	6	8	22	
VL80S	740	78	2183	2239	4907	11592	42181	864	
SKO	2765	24	2142	1581	1827	4384	11854	928	
Kvar	3,74	0,31	0,98	0,71	0,37	0,38	0,28	1,07	
N	583	4382	57	182	11	7	6	58	
2ЭС5К	964	100	1500	3390	4139	7130	0	962	
SKO	3093	28	1056	2530	2232	4441		979	
Kvar	3,21	0,28	0,70	0,75	0,54	0,62		1,02	
N	304	3710	89	38	9	11	0	46	
3ES5K	945	90	1850	2217	4564	10877	0	1713	
SKO	3053	24	933	2189	3197	3360		3744	
Kvar	3,23	0,27	0,50	0,99	0,70	0,31		2,19	
N	263	3718	110	70	18	10	0	46	
2ES4K	1567	93	5880	14282	14826	18776	0	6227	
SKO	16523	31	6654	2127	5581	9196		4916	
Kvar	10,54	0,34	1,13	0,15	0,38	0,49		0,79	
N	404	3323	59	2	5	9	0	10	
3ES4K	789	109	4856	0	7124	25939	0	6395	
SKO	3681	58	9260		2825	10821		9387	
Kvar	4,66	0,54	1,91		0,40	0,42		1,47	
N	675	1704	134	0	16	9	0	36	
2TE10MK	2146	81	8971	10526	19230	29295	31435	2730	3064
SKO	17617	55	5290	10178	11795	15717		6356	3961
Kvar	8,21	0,68	0,59	0,97	0,61	0,54		2,33	1,29
N	608	4068	46	13	11	7	1	45	88
3TE10MK	1278	93	8526	7466	24317	13796	13386	3568	6033
SKO	5212	23	6303	5186	7030	4549	13479	3871	7303
Kvar	4,08	0,25	0,74	0,69	0,29	0,33	1,01	1,08	1,21
N	1100	4648	61	15	13	4	5	21	78
2TE116U	1172	73	4581	3329	12452	15284	0	997	2615
SKO	4027	19	8871	2267	4964	2638		1227	3344
Kvar	3,44	0,27	1,94	0,68	0,40	0,17		1,23	1,28
N	459	2664	36	13	10	9	0	35	161
2TE25KM	2295	77	2890	2871	11274	106	0	2416	1813
SKO	15550	18	2673	957	2571			3135	2051
Kvar	6,78	0,23	0,93	0,33	0,23			1,30	1,13
N	437	3126	60	7	12	1	0	48	244

¹ IR is for initial repair, TM — for technical maintenance, TR is for current repair, LO is for light overhaul, and HR is for heavy repair (overhaul). — Ed. note.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	MPSU							2 254
2	1	2	3	4	5	6	7	
3	Year	Month	R	Mileage, thous. km	Costs, thous. rub.	Effects, thous. rub.	NPV	
4	0	0	1,000	-	- 200,000	-	- 200	
5	0	1	0,992	12,167	- 290,000	53,104	- 435	
6	0	2	0,984	23,967	- 285,500	44,253	- 672	
7	0	3	0,976	35,798	- 294,500	697,609	- 279	
8	0	4	0,969	45,968	- 273,500	44,253	- 501	
9	0	5	0,961	57,826	- 290,000	53,104	- 729	
10	0	6	0,953	69,626	- 294,500	697,609	- 344	
11	0	7	0,946	79,796	- 272,000	44,253	- 560	
12	0	8	0,938	91,657	- 296,000	697,609	- 183	
13	0	9	0,931	101,823	- 273,500	44,253	- 396	
14	0	10	0,924	113,681	- 288,500	53,104	- 614	
15	0	11	0,916	125,484	- 294,500	697,609	- 244	
16	0	12	0,909	135,654	- 283,500	44,253	- 462	
17	1	1	0,902	147,512	- 288,500	53,104	- 674	
18	1	2	0,895	159,316	- 294,500	697,609	- 313	
19	1	3	0,888	169,486	- 273,500	44,253	- 517	
20	1	4	0,881	181,343	- 303,500	1 272,371	336	
21	1	5	0,874	191,078	- 270,500	44,253	139	
22	1	6	0,867	202,943	- 288,500	53,104	- 65	
23	1	7	0,860	214,746	- 294,500	697,609	281	
24	1	8	0,853	224,916	- 273,500	44,253	86	
25	1	9	0,846	236,774	- 288,500	53,104	- 113	
26	1	10	0,840	248,577	- 294,500	697,609	225	
27	1	11	0,833	258,747	- 273,500	44,253	34	
28	1	12	0,826	270,605	- 306,000	697,609	358	
29	2	1	0,820	280,771	- 272,000	44,253	171	
30	2	2	0,813	292,633	- 290,000	53,104	- 22	
31	2	3	0,807	304,813	- 267,500	607,609	304	

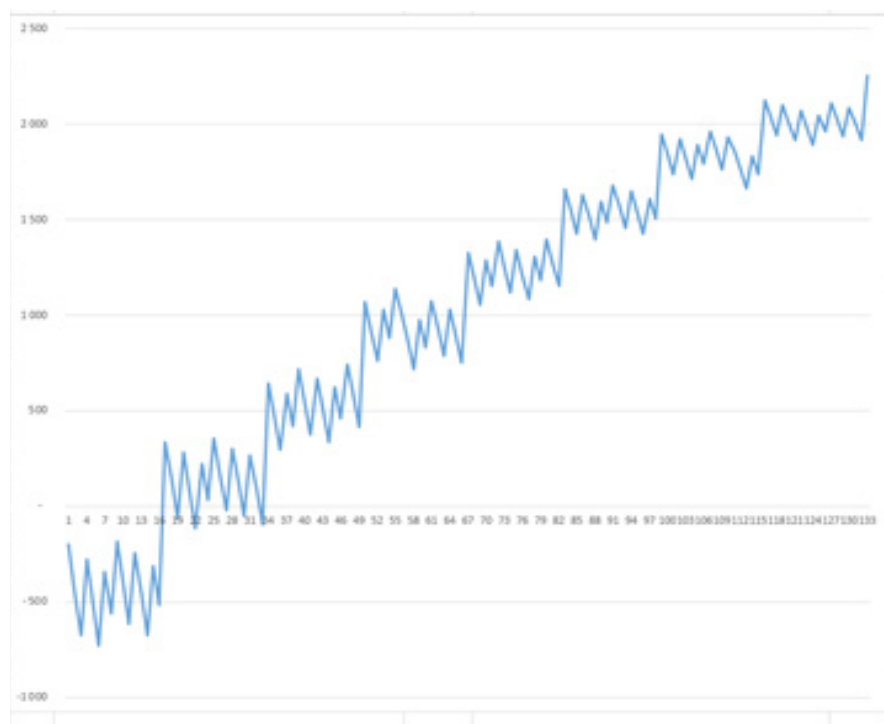


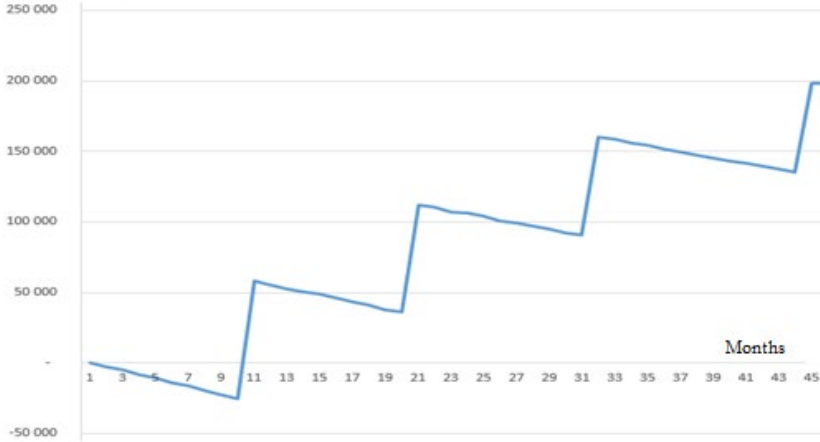
Fig. 2. Results of simulation of NPV of a TDS (compiled by the authors).

NPV, thous.rub.



a – MCDS of AC locomotives of series ES5K with reversible converter.

NPV, thous.rub.



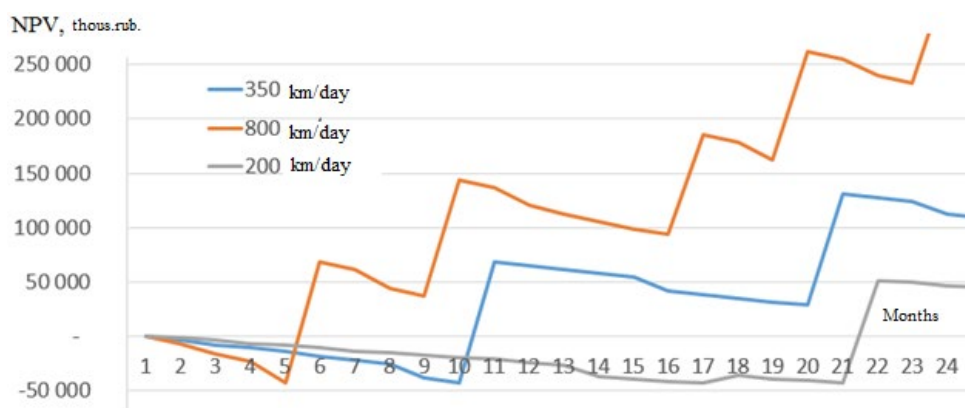
b – MCDS of DC locomotives of series ES4K.

NPV, thous. rub.

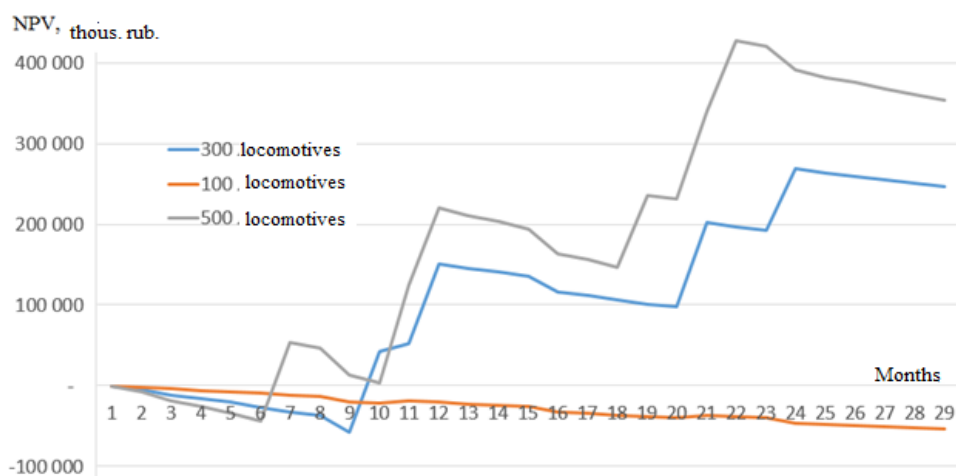


c – MCDS of diesel locomotives of series 2TE25KM.

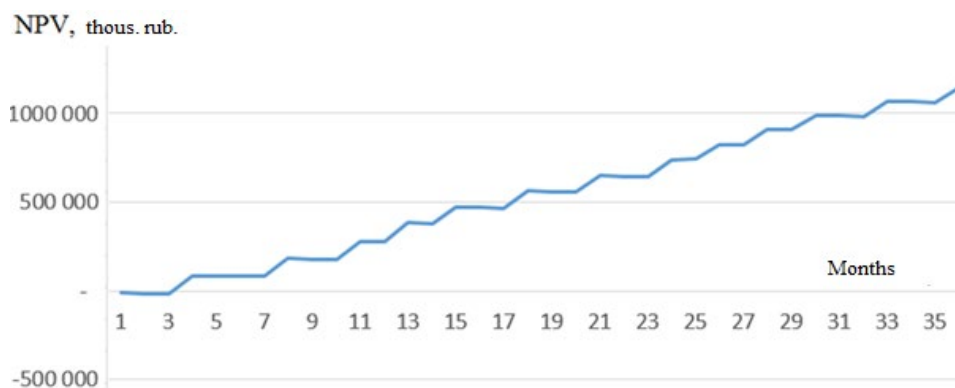
Pic. 3. Results of calculation of NPV for on-board diagnostics based on MCS (compiled by the authors).



a – average daily mileage.

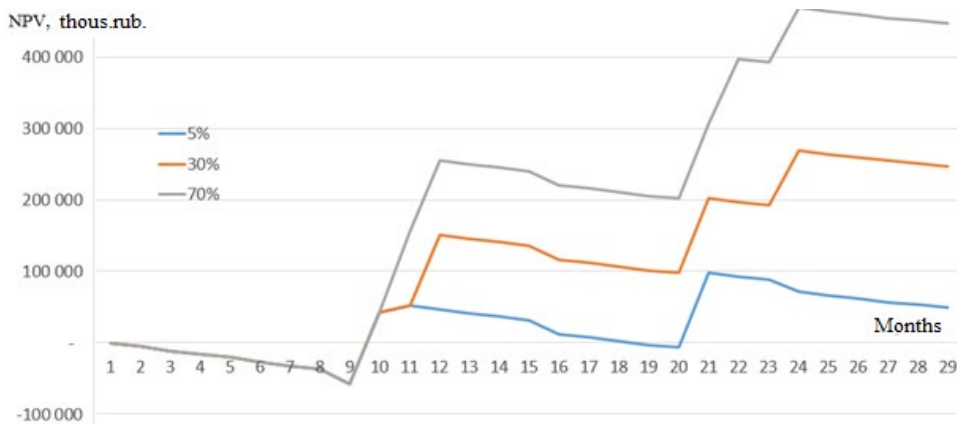


b – serviced locomotive fleet.



c – reduction of number of failures (units per 1 mln km mileage).

Pic. 4. Influence of initial data on NPV result at the example of a MCDS of diesel locomotives (compiled by the authors).



Pic. 5. Results of calculation of NPV for a rheostat test station (compiled by the authors).

failure state of a diesel cylinder cover can prevent cracks with further rejection of the cover. At the same time, the number of elimination of pre-failures may exceed the number of failures, but the total cost of unscheduled repairs will decrease:

$$R_3 = R_{FAIL} - \sum_{n=1}^N (R_{PRE-FAIL n}), \quad (6)$$

where n is next elimination of the pre-failure state;

N is total number of eliminations of pre-failure states;

$R_{PRE-FAIL n}$ is cost of elimination of the n -th pre-failure;

R_{FAIL} is cost of elimination of failure and recovery of operability.

The costs of TDS are made up of capital costs for purchase, installation and launch of TDS in operation (Q_k), and the current costs of operating TDS (Q_e), consisting of the salary fund of diagnosticians, the cost of energy resources, metrological and other types of services.

In the program for modelling the efficiency of TDS, the indicator «Net present value of the project NPV» [13] is used, according to which the investment project is expedient if the positive value of $NPV > 0$ for the time t which is less than the specified one. The program is implemented by the authors in the algorithmic language Visual Basic for Applications (VBA) in MS Excel [14].

When calculating NPV , time t is usually taken as an integer over the years. The developed program proposes to represent the discounting process as a continuous process of integration:

$$NPV = -Q_k + \int CF(t)(1+R)^{-t} dt, \quad (7)$$

where Q_k are capital costs for acquisition and implementation of TDS.

$CF(t)$ is cash flow at time t ;

R is annuity discount factor.

In the program, formula 7 is implemented as double summation:

$$NPV = -Q_k + \sum \sum (ZE_{ym} - ZC_{ym}) \cdot I \cdot I^{-(y+m/12)}, \quad (8)$$

where y is year cycle from year zero to tenth: $y \in [0, 10]$;

m – cycle for 12 months of each year: $m \in [1, 12]$;

ZE_{ym} and ZC_{ym} – effect and costs obtained in the y -th year and m -th month.

The effects and costs are associated with planned and unscheduled TMR, the time of which depends on the locomotive mileage, which is determined in the program by a given average daily mileage, considering downtime for repairs.

Q_e operating costs for locomotive maintenance are set as: salary of diagnosticians, rent of premises and other fixed costs, unit costs of diagnostics (consumption of electricity, materials, fuel, oil, and other items of expenditure).

When simulating, standard overhaul runs are set (Table 1), since they are strictly regulated: overruns of locomotives are unacceptable for safety of train traffic, and underrun leads to additional costs for TMR. The frequency of TM-1 and TM-2 in km was recalculated based on hours according to the average daily mileage of the locomotive (Table 1).

Time for TMR of all types of locomotives is normalized, but the actual downtime is much longer. For example, 2TE10MK during CR-1

Table 3

Locomotive fleet reduction percentage when using ATDS (compiled by the authors)

ATDS	Locomotive series	Fleet reduction, %
On-board ATDS based MCDS (MSUD type)	ES5K	2,8 %
On-board ATDS based on MCDS (MPSU type)	ES5K	2,8 %
On-board ATDS based on MCDS (MSU-TP type)	2TE25KM	3,3 %
On-board ATDS based on APC BORT (hardware-software complex BORT)	2TE25KM, 2TE116U, TE10MK	1,0 %
Rheostat test station (Rheostat)		12,5 %
Vibration diagnostics WMU (Vibro)	ES5K	3,0 %
TEM test stand (TEM)	ES5K	0,5 %
System for measuring the profile of wheel set tires (WS)	ES5K	0,0 %
ATDS «Doctor»	ES5K	0,7 %

Table 4

Percentage of the total effect of reduced downtime for TMR when using ATDS (compiled by the authors)

ATDS	TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	CR-1	CR-2	CR-3	LO	HR	IR
MCDS (MSUD type)	16,6 %	23,1 %			44,8 %					15,5 %
MCDS (MPSU type)	20,3 %	16,9 %			49,4 %					13,4 %
MCDS (MSU-TP type)	19,6 %	5,7 %	34,4 %		1,3 %					39,0 %
APC Bort			67,9 %		2,5 %					29,6 %
Rheostat			48,4 %		21,6 %	11,6 %	7,8 %	2,1 %		8,6 %
Vibro					65,9 %					34,1 %
TEM							26,3 %	22,5 %	11,3 %	39,9 %
WS				3,6 %	96,4 %					

Table 5

NPV of ATDS for one depot with the fleet of 200–300 locomotives (compiled by the authors)

ATDS	Payback period, months	Payback period, years	NPV for 3 years, mln rub.	NPV for 6 years, mln rub.
MCDS (MSUD type)	8	0,67	141	251
MCDS (MPSU type)	10	0,83	150	266
VCDS (MSU-TP type)	10	0,83	162	357
Rheostat	3	0,25	1 144	2 020
Vibro	11	0,91	251	385
TEM	14	1,17	6	75
WS	-	-	-10	-13
Doctor	32	2,67	43	80

at a rate of 36 hours spends an average of 150 hours, and during CR-2 at a rate of four days it spends 13 days. Therefore, in the simulation, real downtime was taken for series of locomotives, calculated by the authors by processing data from the information system of JSC Russian Railways ASOCT (automated system for operational control of trains). Table 2 shows the results of the calculation. For each series of locomotives, for each type of repair and maintenance works according to ASOCT data, the mathematical expectation of downtime M , the standard deviation σ and the coefficient of variation $Kvar = \sigma/M$ were calculated [15].

The downtime at TM-2 was most predictable (unimodal): $M = 86$ minutes, $\sigma = 11$, $Kvar = 0,13$, which is largely explained by the procedure adopted at JSC Russian Railways for changing the state of TM-2 to unscheduled repairs (UR) when the idle time is exceeded. A large scatter occurs for unscheduled repairs ($M = 1199$ minutes, $\sigma = 572$, $Kvar = 0,48$) and wheel set turning ($M = 2475$ minutes, $\sigma = 2024$, $Kvar = 0,82$). Thus, the downtime for all types of TMR (except for TM-2 at locomotive maintenance points – LMP) has a wide spread, which requires an individual approach when entering the initial data in the simulation.



The simulation results are presented in the form of a table and a graph of NPV changes by months (Pic. 2).

3. Modelling the effectiveness of TDS application

On-board diagnostics is performed based on standard microprocessor control systems (MCS), so the diagnostic functionality is «free». Capital costs Q_k include creation of an automated workplace (AWP) for the diagnostician, AWP purchase and maintenance. Operating costs are mainly related to the salaries of diagnosticians.

The effect of on-board diagnostics is when accepting a locomotive (TM-1), at a LMP (TM-2). When performing TM-3 and CR-1, deep diagnostics are carried out. To do this, MCS data on operation of the locomotive are entered into a stationary computer (via a radio channel, from a flash drive, via Wi-Fi, etc.) for diagnostics using specialized software (AWP MCS): hidden defects and pre-failures are revealed. During «heavy» types of TMR, the diagnosis of MCS is not required. The effect of MCS is achieved by reducing TMR time, and most importantly, by preventing unscheduled repairs by eliminating them at the pre-failure stage. The main cash flow is due to reduction in locomotive fleet required for transportation. The main operational cost item is the salary of diagnosticians.

Pic. 3 shows the result of modelling for three mass types of MCS: MCDS (microprocessor control and diagnostic system) of AC electric locomotives with reversible converters (locomotives of ES5K, 2ES5K, 3ES5K, 4ES5K, EP1, EP1M, EP1P series), MCDS of DC electric locomotives of 2ES4K, 3ES4K series, and MCDS of diesel locomotives of 2TE116U, 2TE25KM, 3TE25KM series. The discounted payback period of the diagnostic system based on MCS is less than a year. Sharp upward jumps in Pic. 3 and further correspond to reduction of the locomotive fleet by one unit.

Modelling showed high sensitivity of the model to some initial parameters and low sensitivity to others (Pic. 4). The average daily mileage has a great influence (Pic. 4a), a decrease in which can make ACDS unprofitable due to the rare TMRs while maintaining current costs. The number of serviced locomotives has a similar effect (Pic. 4b). The main effect is achieved by reducing the number of unplanned repairs (Pic. 4c). To a lesser extent, the cost of

restoring serviceability of the locomotive and the salary of diagnosticians affect the model.

The main effect of almost all CDSs was reduction of the locomotive fleet. And, conversely, CDSs that do not give this effect turned out to be unprofitable.

Pic. 5 shows the results of modelling NPV of rheostat test stations of a diesel generator unit of diesel locomotives. The economic effect is defined as the losses incurred by the locomotive department in the absence of rheostat tests: the number of unscheduled repairs will increase significantly, the number of locomotive returns to the depot by the representative of Russian Railways will increase. Despite the high cost of the station, its recoupment occurs within a few months, since the absence of rheostat tests will lead to a significant increase in expensive diesel generator unit failures.

The effect of vibration diagnostics is to eliminate unscheduled repairs due to failures of wheel-motor units (WMU), reduce the volume of current repairs in the absence of comments on the technical condition of WMU. Traction electric motors (TEM) testing stations by the mutual load method are used after «heavy» types of repairs: CR-3, LO and HR. Testing engines allows checking their serviceability and permits to exclude corresponding failures during operation. In addition, reading of the characteristics of the traction electric motor makes it possible to select them and exclude additional failures due to spread of the characteristics of the traction electric motor. Negative NPV was obtained for the automatic wheel set profile measurement system. The results of the performed NPV calculations are shown in tables 3–5.

Conclusions.

1. The practical application of ATDS requires a feasibility study (FS), since, in general, their payback is equal to tens of years.

2. When choosing the type of ATDS, preference should be given to on-board and built-in ATDS. In case of their inexpediency preference should be given to portable and stationary ones.

3. A method for assessing the technical and economic feasibility of introducing various types of ATDS and the corresponding software in the algorithmic language VBA in the MS Excel environment has been developed. The method of calculating the indicator «Net present value of the project» is taken as a basis.

4. The modelling of the payback of main types of ATDS was carried out with a factor analysis of influence of various parameters (fleet size, average daily mileage, failure rate, reduction in the number of failures).

5. Modelling has shown the economic feasibility of the following ATDS: onboard ATDS based on standard microprocessor control systems, specialized onboard ATDS for diagnosing diesel generator units for diesel locomotives without MCS, rheostat testing stations for diesel generator units of diesel locomotives, vibration diagnostics of wheel-motor units (WMU), diagnostics and testing of VIP thyristors, portable systems for diagnosing electrical equipment.

6. Modelling has showed the lack of economic effect from introduction of several ATDSs, including automatic check of the profile of the tyre.

7. The main type of effect from introduction of ATDS is reduction in the operated fleet of locomotives.

8. Reduced repair time has a significant impact on the efficiency of ATDS. The cost of restoration of operability and the initial cost of ATDS have a relatively low impact.

REFERENCES

1. Kiselev, V. I., Gapanovich, V. A., Lakin, I. K. [et al]. Operation and maintenance of rolling stock: Study guide [*Ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava: Ucheb. posobie*]. Moscow, IRIS Group publ., 2012, 576 p.
2. Wyman, O. Train Maintenance. The Railway Technical Website. [Electronic resource]: <http://www.railway-technical.com/trains/train-maintenance/>. Last accessed 21.12.2020.
3. Lakin, I. K. Monitoring of technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practices [*Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika*]. Ed. by I. K. Lakin. Moscow, LLC «Locomotive Technologies», 2015, 212 p.
4. Abolmasov, A. A. Management of the technical state of traction rolling stock during maintenance. Ph.D. (Eng) thesis [*Upravlenie tekhnicheskimi sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyakh servisnogo obsluzhivaniya. Dis... kand. tekhn. nauk*]. Moscow, MIIT publ., 2017, 180 p. [Electronic resource]: <https://docplayer.ru/49152812-Abolmasov-aleksey-aleksandrovich-upravlenie-tehnicheskimi-sostoyaniem-tyagovogo-podvizhnogo-sostava-v-usloviyah-servisnogo-obsluzhivaniya.html>. Last accessed 21.12.2020.
5. Lakin, I. I. Monitoring of the technical condition of locomotives according to the data of onboard hardware and software complexes. Ph.D. (Eng) thesis [*Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmykh kompleksov. Dis... kand. tekhn. nauk*]. Moscow, MIIT publ., 2016, 211 p. [Electronic resource]: <https://docplayer.ru/46381822-Lakin-igor-igorevich-monitoring-tehnicheskogo-sostoyaniya-lokomotivov-po-dannym-bortovyh-apparatno-programmykh-kompleksov.html>. Last accessed 21.12.2020.
6. Pustovoy, I. V. Development of an information-dynamic model of service maintenance management. Ph.D. (Eng) thesis [*Razrabotka informatsionno-dinamicheskoi modeli upravleniya servisnym tekhnicheskim obsluzhivaniem. Dis... kand. tekhn. nauk*]. Omsk, OmGUPS publ., 2019, 181 p. [Electronic resource]: <http://www.dslib.net/organizaciya-proizvodstva/razrabotka-informacionno-dinamicheskoi-modeli-upravleniya-servisnym-tehnicheskim.html>. Last accessed 21.12.2020.
7. Golovin, V. I., Nagovitsyn, V. S. ACS with safety function for electric locomotive 2ES6 [*ASU s funktsiei bezopasnosti dlya elektrovoza 2ES6*]. 2018, No. 4. [Electronic resource]: <http://scbist.com/>. Last accessed 21.12.2020.
8. Semchenko, V. V., Lakin, I. K., Chmylev, I. E. Operation and maintenance of electronic control systems for alternating current electric locomotives [*Ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie elektronnykh sistem upravleniya elektrovozov peremennogo toka*]. Krasnoyarsk, Publishing house of the road center for implementation of the Krasnoyarsk railway, 2010, 72 p.
9. Patent for invention dated 24.10.2013 No. 2569216. Method of management of maintenance and repair of railway transport and a system for its implementation. K. V. Lipa, V. I. Grinenko, S. L. Lyangasov, I. K. Lakin, A. A. Abolmasov and others. [Electronic resource]: <https://patentinform.ru/inventions/reg-2569216.html>. Last accessed 21.12.2020.
10. Patent for invention dated 21.07.2017 No. 2626168. Method for technical diagnostics of locomotive equipment and device for its implementation. K. V. Lipa, V. I. Grinenko, S. L. Lyangasov, I. K. Lakin, A. A. Abolmasov and others. [Electronic resource]: <https://patentinform.ru/inventions/reg-2626168.html>. Last accessed 21.12.2020.
11. An integrated system for ensuring operational reliability of technical means based on diagnostic methods for monitoring the technical condition and planning maintenance and repair of rolling stock. Report on implementation of research work on the topic: «Development of requirements for the system for ensuring operational reliability of rolling stock and methodological foundations for determining its technical condition». Omsk, NIITKD publ., 2011, 765 p. [Electronic resource]: <https://refdb.ru/look/2818339-p2.html>. Last accessed 21.12.2020.
12. A pilot project for maintenance and repair of diesel locomotives of TE10 type at Tynda depot of Far Eastern Railway. Research report. Omsk, NIITKD publ., 2012, 146 p.
13. The formula for calculating the NPV of an investment project. IFRS website. [Electronic resource]: <http://msfo-dipifr.ru/formula-rascheta-npv-investitsionnogo-proekta-eto-prosto/>. Last accessed 21.12.2020.
14. Osetrova, I. S., Osipov, N. A. Microsoft Visual Basic for Application. St. Petersburg, NRU ITMO publ., 2013, 120 p.
15. Venttsel, E. S. Probability theory: Textbook [*Teoriya veroyatnosti: Uchebnik*]. Moscow, Yustitsiya publ., 2018, 658 p.
16. Hedlund, E. H., Roddy, N. E., Gibson, D. R., Bliley, R. G., Pander, J. E., Puri, A., O'Camb, T. E., Lovelace, J. H., Loncher, S., Pierro, M. J. Apparatus and Method for Performance and Fault Analysis. US patent WO 01/3145. General Electric Company, 2001, 58 p. [Electronic resource]: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2001031450>. Last accessed 21.12.2020.
17. Steuger, M. Velaro – customer oriented further development of a high-speed train. [Electronic resource]: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:76bd8e38-7ea4-43ad-b7d4-4d7ca9be50a9/fachartikel_zev-ail_siemens_velaro_en.pdf. Last accessed 21.12.2020.





Влияние расстояния перевозок грузов на эксплуатационные расходы автотранспортного предприятия



Дмитрий ГУДКОВ



Валерий СТАРЫНИН

*Гудков Дмитрий Владиславович – Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия.
Старинин Валерий Владиславович – Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия*.*

Объект исследования – процесс перевозок. Предмет исследования – зависимости влияния расстояния перевозки грузов на себестоимость перевозки грузов. Так как в изученных литературных источниках не было найдено достоверно выявленных зависимостей влияния расстояния перевозки на себестоимость перевозки грузов в конкретных условиях для отдельного предприятия, то задача исследования, рассматриваемая в статье, является актуальной.

Целью данной статьи является исследование влияния расстояния перевозки строительных грузов автомобилями-самосвалами, стоящими на балансе автотранспортного предприятия города Волгограда, на эксплуатационные расходы. Решение задачи рассматривается на примере перевозки сыпучих грузов автомобилями-самосвалами марки MAN и Mercedes-Benz с равными по километражу расстояниями. Используемые методы эмпирического исследования: наблюдение (путём целенаправленного восприятия объекта, обусловленного задачей деятельности), сравнение (путём установления сходства и различия предметов и явлений действительности), измерение (путём действий, выполняемых при помощи средств измерений с целью нахождения числового значения

измеряемой величины в принятых единицах измерения). Для расчёта себестоимости перевозок применяется методика определения затрат на перевозку грузов автомобильным транспортом. С целью получения экспериментальных данных проводится анализ работы подвижного состава автотранспортного предприятия с использованием путевых листов с подтверждёнными в них фактическими данными. Процесс получения фактических данных проводится путём расчётов по заданным формулам. Инструментом проведения исследования является расчёт затрат на перевозку грузов по данным, полученным в результате деятельности предприятия.

Получены регрессионные зависимости влияния расстояния перевозки грузов на себестоимость использования автомобилей-самосвалов с разной грузоподъёмностью с целью определения вида уравнения регрессии, построения оценок неизвестных параметров, входящих в уравнение регрессии, и проверки статистических гипотез о регрессии. Проверка полученных моделей на адекватность выполнена путём проведения расчёта коэффициента корреляции с целью установления наличия связи между случайными величинами.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, эксплуатационные расходы, расстояние, грузоподъёмность, регрессия.

*Информация об авторах:

Гудков Дмитрий Владиславович – доцент кафедры автомобильных перевозок Волгоградского государственного технического университета (ВолГТУ), Волгоград, Россия, gudkov-d@mail.ru.
Старинин Валерий Владиславович – магистрант кафедры автомобильных перевозок Волгоградского государственного технического университета, (ВолГТУ), Волгоград, Россия, staar94@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 21.02.2020, актуализирована 16.10.2020, принята к публикации 18.12.2020.

For the English text of the article please see p. 164.

ВВЕДЕНИЕ

Транспорт обеспечивает связь между производством, хранением и потреблением. Это также добавляет стоимость товара. Наличие эффективных способов транспортировки является основой логистики XX века из-за растущей глобализации торговли и логистики. Это, вероятно, продолжится в течение следующих нескольких веков. Основными требованиями транспортной отрасли для поддержки глобальной логистики являются сокращение затрат и времени в пути, своевременная доставка, меньшая изменчивость времени в пути, доступность бесперебойных транспортных услуг благодаря сочетанию режимов, минимальные задержки, повреждения и потери, а также наличие других логистических вариантов, таких как хранение, вывоз и доставка и так далее [1]. На предприятиях транспорта и в транспортно-экспедиционных компаниях остро стоит вопрос о снижении себестоимости перевозки грузов. В настоящий момент систему действующих тарифов на перевозку грузов можно условно разделить на:

- а) тарифы, зависящие от времени использования транспортных средств;
- б) тарифы, зависящие от пробега транспортных средств;
- в) комбинированные тарифы.

В городских условиях эксплуатации на практике используется ценообразование, зависящее от времени использования грузовых автомобилей (повременный тариф), или устанавливается стоимость использования транспортных средств, выполняющих определённую транспортную работу (сдельный тариф). Оценка прибыльности установленных тарифов использования автотранспортных средств, установленных в условиях конкуренции, как правило,

проводится через расчёт себестоимости оказания услуги по перевозке грузов.

В наиболее простом дидактическом варианте влияние на себестоимость перевозки грузов оказывают в основном показатели использования транспортных средств, такие как:

- грузоподъёмность — q_n , т;
- расстояние перевозки — $L_{\text{пр}}$, км;
- время погрузочно-разгрузочных операций — $t_{\text{пр}}$, ч;
- техническая скорость — V_t , км/ч [2].

Выделим расстояние перевозки как постоянную величину при подаче заявки на выполнение услуги по перевозке грузов. Обзор теории грузовых автомобильных перевозок свидетельствует о влиянии расстояния перевозки грузов на себестоимость в виде непрерывных прямолинейных и гиперболических зависимостей [3].

Непосредственной целью данной статьи является исследование влияния расстояния перевозки строительных грузов автомобилями-самосвалами, стоящими на балансе автотранспортного предприятия города Волгограда (ЗАО «АТП»), на эксплуатационные расходы. Решение задачи рассматривается на примере перевозки сыпучих грузов автомобилями-самосвалами марки MAN и Mercedes-Benz с равными по километражу расстояниями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В условиях конкуренции на рынке автотранспортных средств на предприятиях используется подвижной состав, относящийся к различному типу, модели, используемому топливу и пр. На исследуемом предприятии в парке эксплуатируются автомобили MAN 41.414 (далее — MAN) (рис. 1) и Mercedes-Benz Actros 4141 K (далее — Mercedes-Benz) (рис. 2) для перевоз-



Рис. 1. Самосвал MAN 41.414.



Рис. 2. Mercedes-Benz Actros 4141 K.



Таблица 1
Исходные ТЭП для расчёта

Показатель	Единица измерения	Mercedes-Benz	MAN
q_n	т	28,6	25
V_T	км/ч	30	28
$B_{км}$	л/100 км	52	52,3
$t_{пр}$	ч		0,25
C_T	руб./ч		220
$L_{сг}$	км		8...40
Π_T	руб./л		45,99
D_p	сут.		256
T_n	ч		7
$n_{ш}$	ед.		12
$\Pi_{ш}$	руб.		5000
$B_{т*км}$	л/(т * км)		1,5
$H_{пр}$	руб./год		500
H_v	руб./1000 км		0,27
$C_{то}$	руб./100 км		374
$H_{ш}$	%/100 км		2
γ_c	—		0,9
β_c	—		0,5
α_n	—		0,8
b_T	—		1,04

ки сыпучих грузов в городских условиях эксплуатации.

Величины технико-эксплуатационных характеристик (далее – ТЭП), такие как:

- рабочие дни – D_p , сут;
- время в наряде – T_n , ч;
- расход топлива – $B_{км}$, л/100км;
- коэффициент использования грузоподъёмности – γ_c ;
- количество шин – $n_{ш}$, ед.;
- тариф на перевозку – C_T , руб./ч;
- цена одной шины – $\Pi_{ш}$, руб.;
- коэффициент использования пробега – β_c ;
- коэффициент использования парка – α_n ;
- коэффициент «подготовительно-заключительные операции» – 1,06;
- поправочный коэффициент к C_T $\alpha_{зп}$ – 1,3

получены по итогам практических исследований и взяты из справочной литературы [4].

Также использованы следующие исходные данные:

- норма отчислений на один автомобиль в год (среднестатистическая по исследуемому парку) – $H_{пр}$, руб./год;
- отчисления на полное восстановление – H_v , руб./1000 км;
- норма на восстановление шины – $H_{ш}$, %/100 км;
- затраты на ТО, ТР – $C_{то}$, руб./100 км;
- доп. норма расхода топлива – $B_{т*км}$, л/(т * км);
- коэффициент, учитывающий дополнительный расход топлива – β_c ;
- цена топлива – Π_T , руб./л, предоставленные ЗАО «АТП».

Условия эксплуатации – город, расчёт эксплуатационных расходов выполняется с использованием ниже указанных формул 2–13.

При выполнении исследования применялись данные, представленные в табл. 1. Для расчёта использовались технические характеристики транспортных средств, предоставленные ЗАО «АТП».

Кроме этого были проведены статистические исследования показателей γ_c , $t_{пр}$, V_T , α_n . Исследования проводились по данным путевых листов, предоставленных предприятием. Математическое ожидание указанных выше величин представлено в табл. 1.

Зависимость производительности автомобилей MAN и Mercedes-Benz от расстояния перевозки ($L_{сг}$) определим по формуле (1), полученные расчёты сведём в табл. 2 и рис. 3.

$$W_Q = \frac{q_n \cdot \gamma_c \cdot \beta_c \cdot V_T}{l_{сг} + \beta_c \cdot V_T \cdot t_{пр}}. \quad (1)$$

Для расчёта составляющих частей себестоимости перевезённого груза в большинстве случаев применяют методику определе-

Таблица 2
Зависимость составных частей производительности транспортных средств от величины значения $L_{сг}$, т/ч

Марка транспортного средства	$L_{сг}$, км									
	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42
MAN	33,16	23,33	18,00	14,65	12,35	10,68	9,40	8,40	7,59	6,92
Mercedes-Benz	39,60	28,08	21,75	17,75	14,99	12,99	11,44	10,23	9,25	8,44

Таблица 3

Статьи затрат для расчёта себестоимости транспортирования груза

Статья	Формула	№
Основная и дополнительная зарплата водителя с отчислениями, руб./т	$C_{\text{нк}}^{\text{зп}} = \frac{C_{\text{т}} \cdot t_{\text{пр}} \cdot \alpha_{\text{зп}}}{q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{с}}}$	(2)
Затраты на горючее, руб./т • км	$C_{\text{дв}}^{\text{т}} = \frac{B_{\text{т} \cdot \text{км}} \cdot b_{\text{т}} \cdot \Pi_{\text{т}}}{100} + \frac{b_{\text{т}} \cdot \Pi_{\text{т}} \cdot B_{\text{км}}}{q_{\text{н}} \cdot 100 \cdot \gamma_{\text{с}} \cdot \beta_{\text{е}}}$	(3)
Расходы на операции движения, руб./т • км	$C_{\text{дв}}^{\text{зп}} = \frac{1,06 \cdot \alpha_{\text{зп}} \cdot C_{\text{т}}}{\gamma_{\text{с}} \cdot V_{\text{т}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \beta_{\text{е}}}$	(4)
Затраты на эксплуатационные материалы 11 %	$C_{\text{дв}}^{\text{с}} = 0,11 \cdot C_{\text{дв}}^{\text{т}}$	(5)
Расходы на обеспечение ТО и ТР, руб./т • км	$C_{\text{дв}}^{\text{то}} = \frac{C_{\text{то}}}{\beta_{\text{е}} \cdot q_{\text{н}} \cdot 1000 \cdot \gamma_{\text{с}}}$	(6)
Затраты, связанные с возмещением износа и ремонта шин, руб./т • км	$C_{\text{дв}}^{\text{ш}} = \frac{\Pi_{\text{ш}} \cdot H_{\text{ш}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000 \cdot \beta_{\text{е}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{с}} \cdot 100}$	(7)
Амортизация транспортного средства, руб./т • км, где $K_{\text{д}}$ — установлен значением 1,07	$C_{\text{дв}}^{\text{в}} = \frac{K_{\text{д}} \cdot H_{\text{в}}}{10 \cdot \beta_{\text{е}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{с}}}$	(8)
Расходы между начально-конечными операциями, руб./т	$C_{\text{нк}}^{\text{нр}} = \frac{H_{\text{нр}} \cdot t_{\text{нр}}}{D_{\text{р}} \cdot \alpha_{\text{н}} \cdot T_{\text{н}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{с}}}$	(9)
Расходы между движенческими операциями, руб./т • км	$C_{\text{дв}}^{\text{нр}} = \frac{H_{\text{нр}}}{D_{\text{р}} \cdot \alpha_{\text{н}} \cdot T_{\text{н}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{с}} \cdot \beta_{\text{е}}}$	(10)
Расходы на перевозку тонны груза	$C_{\text{нк}} = C_{\text{нк}}^{\text{зп}} + C_{\text{нк}}^{\text{нр}}$	(11)
Переменные расходы	$C_{\text{дв}} = C_{\text{дв}}^{\text{зп}} + C_{\text{дв}}^{\text{т}} + C_{\text{дв}}^{\text{с}} + C_{\text{дв}}^{\text{то}} + C_{\text{дв}}^{\text{ш}} + C_{\text{дв}}^{\text{в}} + C_{\text{дв}}^{\text{нр}}$	(12)
Себестоимость перевозок	$C_{\text{э}} = C_{\text{нк}} + l_{\text{ег}} \cdot C_{\text{дв}}$	(13)

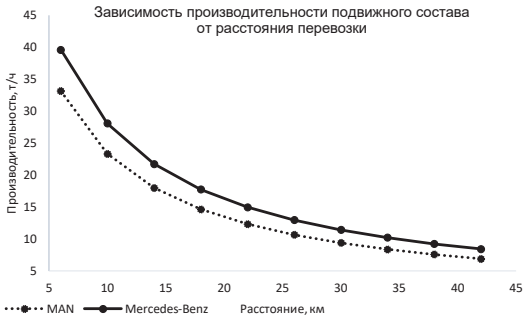


Рис. 3. Зависимость производительности подвижного состава от $L_{\text{ер}}$ двух транспортных средств.

ния логистических затрат на перевозку грузов автомобильным транспортом, основанную на методике определения эксплуатационных расходов [5; 8]. Формулы, применяемые в расчётах логистических затрат, указаны в табл. 3. Полученные значения приводятся к теоретическим и экспериментальным данным, далее проводится их анализ.

С целью получения экспериментальных данных проведён анализ работы подвиж-

ного состава автотранспортного предприятия с использованием путевых листов с подтверждёнными в них фактическими данными. Процесс получения фактических (экспериментальных) данных проводится путём расчётов по аналогичным формулам, с использованием данных о работе транспортных средств на маршрутах доставки грузов потребителям. Полученная по расчётам себестоимость перевозки грузов,



Таблица 4

Сводная таблица по эксплуатационным затратам

затраты показатели	MAN		Mercedes-Benz	
	Теоретические	Фактические	Теоретические	Фактические
Расходы между начально-конечными операциями				
$C_{нк}^{зп}$, руб./т	3,177	2,387	2,777	2,087
$C_{нк}^{нр}$, руб./т • км	0,004	0,004	0,003	0,003
$\Sigma C_{нк}$, руб./т	3,181	2,391	2,780	2,090
Расходы между движенческими операциями				
$C_{дв}^{зп}$, руб./т • км	0,962	0,548	0,785	0,446
$C_{дв}^{нр}$, руб./т • км	0,031	0,024	0,027	0,021
$C_{дв}^c$, руб./т • км	0,324	0,270	0,292	0,246
$C_{дв}^в$, руб./т • км	0,002	0,002	0,002	0,001
$C_{дв}^{то}$, руб./т • км	0,033	0,026	0,029	0,023
$C_{дв}^{ш}$, руб./т • км	0,106	0,083	0,093	0,073
$C_{дв}^т$, руб./т • км	2,941	2,458	2,650	2,239
$\Sigma C_{дв}$, руб./т • км	4,399	3,411	3,878	3,049

Таблица 5

Расчёт логистических затрат при доставке грузов для двух транспортных средств, руб./т

MAN	$L_{гр}$, км	Ze	$C_{э. теор.}$	$C_{э. факт.}$	Mercedes-Benz	$L_{гр}$, км	Ze	$C_{э. теор.}$	$C_{э. факт.}$
	8	1	38,4	29,7		8	1	33,8	26,5
	10		47,2	36,5		10		41,6	32,6
	16		73,6	56,9		16		64,8	50,9
	23		104,4	80,8		23		91,9	72,2
	28		126,4	97,9		28		111,4	87,5
	32		143,9	111,5		32		126,9	99,7
	40		179,1	138,8		40		157,9	124,1

Таблица 6

Зависимость эксплуатационных затрат от расстояния
грузоперевозок автомобилями-самосвалами

$L_{гр}$, км	8	10	16	23	28	32	40
$C_{э}$, руб./т	MAN						
	29,7	36,5	56,9	80,8	97,9	111,5	138,8
	Mercedes-Benz						
	26,5	32,6	50,9	72,2	87,5	99,7	124,1

с использованием экспериментальных данных, сводится в табл. 4 (сводная) и табл. 5 (расчётная).

Анализ изменения теоретических и экспериментальных данных после произведённых расчётов представлен на рис. 4 и 5.

Для анализа влияния $L_{гр}$ на себестоимость требуется провести регрессионный анализ. Используя табл. 5, составим связанную выборку из пар значений (табл. 6).

Коэффициент корреляции для обоих вариантов получился 0,958, что, согласно шкале Чеддока, говорит о весьма высокой зависимости.

Регрессионный анализ результатов расчёта проводился в электронных таблицах (MS EXCEL) с применением стандартных методик. Получена функциональная зависимость $C_{э}$, руб./т от $L_{гр}$, км на примере MAN и Mercedes-Benz (рис. 4). $L_{гр}$ = 8...40 км.

При исследовании зависимости переменной Y от переменной X в парной экспоненциальной регрессии были оценены её характеристики способом наименьших квадратов. С помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера исследована статистическая значимость уравнения. Установлено, что в исследуемом примере



Рис. 4. Изменение теоретических и фактических эксплуатационных расходов с увеличением пробега самосвала MAN.

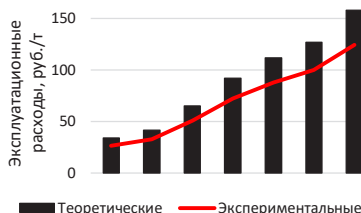


Рис. 5. Изменение теоретических и фактических эксплуатационных расходов с увеличением пробега самосвала Mercedes-Benz.

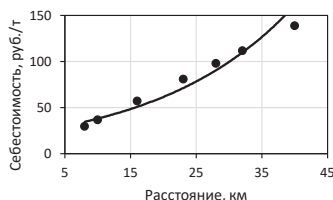


Рис. 6. Зависимость C_z , руб./т от $L_{эф}$, км на примере MAN.

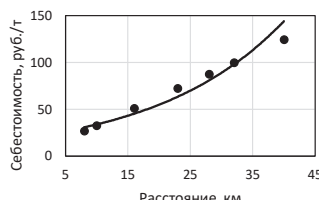


Рис. 7. Зависимость C_z , руб./т от $L_{эф}$, км на примере Mercedes-Benz.

91,78 % совместной вариабельности Y объясняется изменениями переменной X . Также установлено, что характеристики модели статистически не значимы.

Коэффициент детерминации показывает определённую долю дисперсии (разброса) зависимой переменной, объясняемую рассматриваемой моделью. Значение стандартного коэффициента меняется в границах от нулевой отметки до единицы. Чем ближе к единице, тем лучше регрессионная модель, то есть, построенная модель отлично аппроксимирует начальные данные [6]. Для статистической оценки точности уравнения связи применяется также средняя ошибка аппроксимации [7].

ВЫВОД

В этой работе была предложена новая модель, которая позволяет достичь минимальных логистических затрат по сравнению с существующими подходами, последовательно увеличивая расстояние в итерациях, чтобы получить окончательную стоимость. Для поддержки эффективности предложенного подхода он был обоснован с помощью анализа в MS Excel и сопоставлен с другими моделями с точки зрения общей стоимости [9].

Данная зависимость рекомендована коммерческой службе предприятия для использования на практике для оценки и прогнозирования себестоимости перевозок автотранспортных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kasilingam, R. G. Transportation planning. In: Logistics and Transportation. Springer, Boston, MA, 1998, pp. 157–213. DOI: 10.1007/978-1-4615-5277-2_8. Доступ 02.08.2020.
2. Афанасьев Л. Л., Островский Н. Б., Цукерберг С. М. Единая транспортная система и автомобильные перевозки: Учебник для студ. вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1984. — 333 с.
3. Воркут А. И. Грузовые автомобильные перевозки. — 2-е изд., перераб. и доп. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. — 447 с.
4. Юрьева Н. И., Витвицкий Е. Е. Электронная база данных «Справочные и нормативные материалы по автомобильному транспорту» // Хроники объединённого фонда электронных ресурсов «Наука и образование». — № 05 (72) май 2015. — С. 66.
5. История развития транспорта: Методические указания к практическим занятиям по дисциплине 190700.62 Технология транспортных процессов всех форм обучения / Сост. В. Н. Карнаухов и А. С. Колесников. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. — 21 с. [Электронный ресурс]: <https://vossta.ru/metodicheskie-ukazaniya-k-prakticheskim-zanyatiyam-po-discipli-v2.html>. Доступ 02.08.2020.
6. Савицкая Г. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия: Учебное пособие. — 7-е изд., испр. — Мн.: Новое знание, 2002. — 704 с.
7. Елисеева И. И., Курышева С. В., Костеева Т. В. и др. Эконометрика: Учебник / Под ред. И. И. Елисеевой. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
8. Матанцева О. Ю. Основы экономики автомобильного транспорта: Учебное пособие. — М.: Юстицинформ, 2020. — 256 с. [Электронный ресурс]: <https://avidreaders.ru/download/osnovy-ekonomiki-avtomobilnogo-transporta-uchebnoe-posobie.html?f=pdf>. Доступ 02.08.2020.
9. Hazarika, P., Kalita, C. S. Minimization of Transportation Cost of Paraffin Wax: A Proposed Approach Using C. Advances in Mechanical Engineering, Springer Science and Business Media LLC, Singapore, 17 January 2020, pp. 439–448. DOI: 10.1007/978-981-15-0124-1_39. Доступ 02.08.2020.





Influence of the Distance of Transportation of Goods on Operating Costs of a Motor Transport Enterprise



Dmitry V. GUDKOV



Valery V. STARYNIN

Gudkov, Dmitry V., Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.

Starynin, Valery V., Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.*

ABSTRACT

The object of research is the transportation process. The subject of research is dependence of influence of the distance of transportation of goods on the cost of transportation of goods. Since no studied literary sources have revealed reliable dependences of influence of the distance of transportation on the cost of transportation of goods in specific conditions for a single enterprise, the research task considered in the article seems to be relevant.

The objective of this article is so to study the impact of distance of transportation of construction goods by dump trucks of Volgograd motor transport enterprise on operating costs. The solution to the problem is considered at the example of transportation of bulk cargo by MAN and Mercedes-Benz dump trucks with equal mileage. Several empirical research methods were used: observation (by means of purposeful perception of an object determined by the task of activity), comparison (by establishing similarity and difference between objects and phenomena of reality), measurement (by means of actions performed using

measuring instruments to find the numerical value of the measured quantity in the adopted measurement units). To calculate the cost of transportation, the methodology for determining costs for transporting goods by road transport is used. To obtain experimental data, an analysis of the work of fleet of a motor transport enterprise is carried out using waybills with confirmed data. The process of obtaining actual data is carried out by means of calculations according to the given formulas. The research tool is calculation of the cost of transportation of goods according to the data obtained as a result of activities of the enterprise.

Regression dependences of influence of the distance of transportation of goods on the cost of operation of dump trucks with different carrying capacity were obtained to determine the type of the regression equation, construct estimates of unknown parameters included in the regression equation, and test statistical hypotheses about regression. The verification of the adequacy of obtained models was performed by calculating the correlation coefficient to establish the presence of a connection between random variables.

Keywords: road transport, operating costs, distance, carrying capacity, regression.

*Information about the authors:

Gudkov, Dmitry V. – Associate Professor at the Department of Road Transportation of Volgograd State Technical University (VolgSTU), Volgograd, Russia, gudkov-d@mail.ru.

Starynin, Valery V. – Master's student of the Department of Road Transportation of Volgograd State Technical University, (VolgSTU), Volgograd, Russia, staar94@yandex.ru.

Article received 21.02.2020, revised 16.10.2020, accepted 18.12.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 158.

Background

Transport provides a link between production, storage, and consumption. It also adds value to the goods. The availability of efficient transportation methods is the backbone of 20th century logistics due to the growing globalisation of trade and logistics. This is likely to continue over the next several centuries. The main requirements of the transport industry to support global logistics are reduced cost and travel time, on-time delivery, less variability in travel time, availability of seamless uninterrupted transport services through a combination of modes, minimal delays, damage and loss, and other logistics options such as storage, export, and delivery, etc. [1]. Transport enterprises and forwarding companies challenge an acute issue of reducing the cost of transportation of goods. Now, the system of existing tariffs for transportation of goods can be conditionally divided into:

- tariffs depending on time of use of vehicles;
- tariffs depending on vehicle mileage;
- combined tariffs.

Practices of urban operating conditions use pricing that depends on time of use of trucks (time rate), or the cost of using vehicles that perform a certain transport work (piece rate). Evaluation of profitability of tariffs established of the use of vehicles, set in a competitive environment, as a rule, is carried out through the calculation of cost of rendering services for transportation of goods.

In most simple didactic variant, the impact on cost of transportation of goods is mainly exerted by indicators of the use of vehicles, such as:

- carrying capacity – q_c , t;

- transportation distance – L_{tr} , km;
- time for loading-unloading operations – t_l , h;
- technical speed – V_t , km/h [2].

Let us select the distance of transportation as a constant value when applying for performance of a service for transportation of goods. A review of the theory of freight road transportation indicates the influence of distance of transportation of goods on the cost in the form of continuous rectilinear and hyperbolic dependencies [3].

The immediate *objective* of this article is to study the impact of distance of transportation of construction goods with dump trucks of Volgograd motor transport enterprise (CJSC ATP) on operating costs. The solution to the problem is considered studying the example of transportation of bulk cargo by MAN and Mercedes-Benz dump trucks with equal mileage.

Results

In conditions of competition in the motor vehicle market, enterprises use fleet belonging to various series, types, models, using different fuel, etc. The studied enterprise operates fleet consisting of MAN 41.414 (hereinafter – MAN) (Pic. 1) and Mercedes-Benz Actros 4141 K (hereinafter – Mercedes-Benz) (Pic. 2) trucks for transportation of bulk cargo in urban operating conditions.

Values of technical and operational features (hereinafter – TOF), such as:

- working days – D_w , days;
- time of duty – T_d , h;
- fuel consumption – F_{km} , l/100km;
- load capacity utilization factor – γ_c ;
- number of tires – $n_{ti, units}$;
- transportation tariff – $T_{t, roub/h}$;



Pic. 1. Dump truck MAN 41.414.



Pic. 2. Mercedes-Benz Actros 4141 K.



Table 1

Initial TOF for calculation

Indicator	Measurement unit	Mercedes-Benz	MAN
q_c	t	28,6	25
V_t	km/h	30	28
F_{km}	l/100 km	52	52,3
t_l	h	0,25	
T_t	roub./h	220	
L_{tr}	km	8... 40	
P_f	roub./l	45,99	
D_w	days	256	
T_d	h	7	
n_{ti}	units	12	
P_{ti}	roub.	5000	
F_{t*km}	l/(t • km)	1,5	
N_{nr}	roub./year	500	
N_n	roub./1000 km	0,27	
C_{mr}	roub./100 km	374	
N_t	%/100 km	2	
γ_c	—	0,9	
β_{mil}	—	0,5	
α_u	—	0,8	
b_f	—	1,04	

- price of one tire — $P_{ti, \text{roub.}}$;
- mileage utilization factor — β_{mil} ;
- fleet utilization factor — α_u ;
- coefficient of preparatory and final operations — 1,06;
- correction factor to T_t $\alpha_{wages} = 1,3$

were obtained based on the results of practical research and taken from the reference literature [4].

Also, the following input data were used:

- normal rate of depreciated deductions for one car per year (average for the surveyed fleet) — N_{nr} , roub./year;
- depreciated deductions for renewal — N_n , roub./1000 km;
- normal rate for tire restoration — N_t , %/100 km;
- costs for maintenance, repair — C_{mr} , roub./100 km;

- additional fuel consumption rate — $F_{t \cdot km}$, l/(t • km);
- coefficient considering additional fuel consumption — b_f ;
- fuel price — P_f , roub./l, data provided by CJSC ATP.

Operations are assumed to be conducted in urban conditions, calculation of operating costs is performed using formulas 2–13 below.

When carrying out research, data presented in Table 1 were used. For calculation, technical characteristics of vehicles provided by CJSC ATP were used.

In addition, statistical studies of indicators γ_c , t_l , V_t , α_u were carried out. The research was carried out according to the waybills provided by the enterprise. The mathematical expectation of the above values is presented in Table 1.

The dependence of performance of MAN and Mercedes-Benz cars on distance of transportation (L_{tr}) is determined by the formula (1) the obtained calculations are summarized in Table 2 and Pic. 3.

$$W_o = \frac{q_c \cdot \gamma_{mil} \cdot \beta_{ti} \cdot V}{L_{tr} + \beta_{mil} \cdot V_t \cdot t_l} \quad (1)$$

To calculate the constituent parts of the cost of transported cargo, in most cases, the methodology for determining the logistics costs for transportation of goods by road transport based on the methodology for determining operating costs is used [5; 8]. The formulas used in calculating logistics costs are shown in Table 3. The obtained values are reduced to theoretical and experimental data and then analysed.

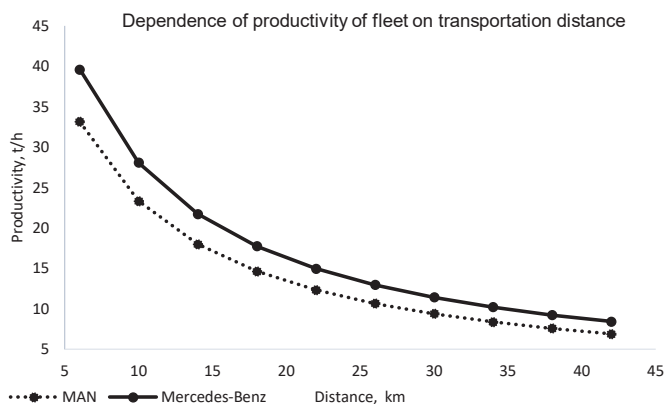
To obtain experimental data, an analysis of the work of the fleet of a motor transport enterprise was carried out using waybills with actual confirmed data. The process of obtaining actual (experimental) data is carried out by calculations using similar formulas, using data on operation of vehicles on routes of delivery of goods to consumers. The calculated prime cost of cargo transportation, using experimental data, is summarized in Table 4 (summary) and Table 5 (calculated).

The analysis of change in theoretical and actual data after the calculations made is shown in Pic. 4 and 5.

Table 2

Dependence of components of productivity of vehicles on the value of L_{tr} , t/h

Vehicle brand	Transportation distance, km									
	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42
MAN	33,16	23,33	18,00	14,65	12,35	10,68	9,40	8,40	7,59	6,92
Mercedes-Benz	39,60	28,08	21,75	17,75	14,99	12,99	11,44	10,23	9,25	8,44



Pic. 3. Dependence of productivity of the fleet on L_v for two vehicles.

Table 3

Costs items for calculation of the prime cost of cargo transportation

Item	Formula	№
Basic and additional drivers wages with deductions and contributions, roubles/t ¹	$C_{term}^{wages} = \frac{T_t \cdot t_l \cdot \alpha_{wages}}{q_c \cdot \gamma_c}$	(2)
Fuel costs, roubles/t • km	$C_{transportation}^{transp} = \frac{F_{t \cdot km} \cdot b_f \cdot P_f}{100} + \frac{b_f \cdot P_f \cdot F_{km}}{q_c \cdot 100 \cdot \gamma_c \cdot \beta_{mil}}$	(3)
Costs of transportation operations, roubles/t • km	$C_{transportation}^{wages} = \frac{1,06 \cdot \alpha_{wages} \cdot T_t}{\gamma_c \cdot V_t \cdot q_c \cdot \beta_{mil}}$	(4)
Costs of consumable items 11 %	$C_{transportation}^c = 0,11 \cdot C_{transportation}^t$	(5)
Costs for maintenance and repair, roubles/t • km	$C_{transportation}^{mr} = \frac{C_{mr}}{\beta_{mil} \cdot q_c \cdot 1000 \cdot \gamma_c}$	(6)
Costs associated with reimbursement of wear and repair of tires, roubles/t • km	$C_{transportation}^{ti} = \frac{P_{ti} \cdot N_{ti} \cdot n_{ti}}{1000 \cdot \beta_{mil} \cdot q_c \cdot \gamma_c \cdot 100}$	(7)
Vehicle depreciation, roubles/t • km, where R_d – is set at 1,07	$C_{transportation}^v = \frac{R_d \cdot N_n}{10 \cdot \beta_{mil} \cdot q_c \cdot \gamma_c}$	(8)
Costs implied between terminal operations, roubles/t	$C_{term}^{nr} = \frac{N_{nr} \cdot t_l}{D_w \cdot \alpha_u \cdot T_d \cdot q_c \cdot \gamma_c}$	(9)
Costs implied between transportation operations, roubles/t • km	$C_{transportation}^{nr} = \frac{N_{nr}}{D_w \cdot \alpha_u \cdot T_d \cdot q_c \cdot \gamma_c \cdot \beta_{mil}}$	(10)
Cost of transportation of a ton of cargo	$C_{term} = C_{term}^{wages} + C_{term}^{nr}$	(11)
Variable costs	$C_{transportation} = C_{transportation}^{wages} + C_{transportation}^t + T_{transportation}^t + C_{transportation}^{mr} + C_{transportation}^{ti} + C_{transportation}^n + C_{transportation}^{nr}$	(12)
Prime cost of transportation	$C_e = C_{term} + L_{tr} \cdot C_{transportation}$	(13)

¹ Term is for terminal (initial and final) operations; *transportation* is for transportation operations.



Table 4

Summary table of operating costs

costs indicators	MAN		Mercedes-Benz	
	Theoretical	Actual	Theoretical	Actual
Costs implied between terminal operations				
C_{term}^{wages} , roubles/t	3,177	2,387	2,777	2,087
C_{term}^{nr} , roubles /t • km	0,004	0,004	0,003	0,003
ΣC_{term}^* , roubles /t	3,181	2,391	2,780	2,090
Costs implied between transportation operations				
C_{transp}^{wages} , roubles /t • km	0,962	0,548	0,785	0,446
C_{transp}^{nr} , roubles /t • km	0,031	0,024	0,027	0,021
C_{transp}^c , roubles /t • km	0,324	0,270	0,292	0,246
C_{transp}^v , roubles /t • km	0,002	0,002	0,002	0,001
C_{transp}^{mr} , roubles /t • km	0,033	0,026	0,029	0,023
C_{transp}^{ti} , roubles /t • km	0,106	0,083	0,093	0,073
ΣC_{transp}^* , roubles /t • km	2,941	2,458	2,650	2,239
ΣC_{transp}^* , roubles /t • km	4,399	3,411	3,878	3,049

Table 5

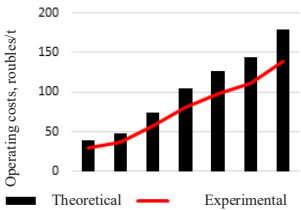
Calculation of logistics costs in case of cargo delivery for two vehicles, roubles/t

MAN	L_{tr} , km	Ze	$C_{e.theor.}$	$C_{e.act.}$	Mercedes-Benz	L_{tr} , km	Ze	$C_{e.theor.}$	$C_{e.act.}$
	8	1	38,4	29,7		8	1	33,8	26,5
	10		47,2	36,5		10		41,6	32,6
	16		73,6	56,9		16		64,8	50,9
	23		104,4	80,8		23		91,9	72,2
	28		126,4	97,9		28		111,4	87,5
	32		143,9	111,5		32		126,9	99,7
	40		179,1	138,8		40		157,9	124,1

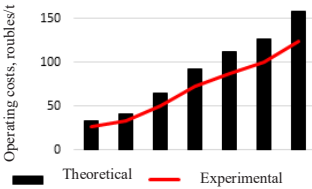
Table 6

Dependence of operating costs on distance of cargo transportation by dump trucks

L_{tr} , km	8	10	16	23	28	32	40
C_e , roubles/t	MAN						
	29,7	36,5	56,9	80,8	97,9	111,5	138,8
	Mercedes-Benz						
	26,5	32,6	50,9	72,2	87,5	99,7	124,1



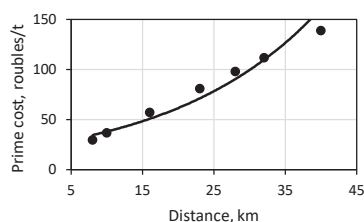
Pic. 4. Change in theoretical and actual operating costs with increase in mileage of a dump truck MAN.



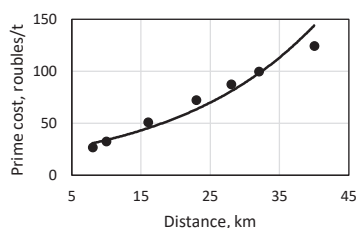
Pic. 5. Change in theoretical and actual operating costs with increase in mileage of a dump truck Mercedes-Benz.

To analyse the influence of L_{tr} on prime cost, a regression analysis is required. Using Table 5, we will compose a related sample of pairs of values (Table 6).

The correlation coefficient for both options was 0,958, which, according to the Chaddock scale, indicates an extremely high dependence.



Pic. 6. Dependence of C_p , roubles/t on L_{tr} , km using the example of MAN.



Pic. 7. Dependence of C_p , roubles/t on L_{tr} , km using the example of Mercedes-Benz.

Regression analysis of the calculation results was carried out in spreadsheets (MS EXCEL) using standard techniques. The functional dependence of C_p , rouble./t on L_{tr} , km was obtained using the example of MAN and Mercedes-Benz (Pic. 4). $L_{tr} = 8 \dots 40$ km.

When investigating the dependence of the variable Y on the variable X in paired exponential regression, its characteristics were estimated using the least squares method. Using the coefficient of determination and Fisher's criterion, the statistical significance of the equation is investigated. It was found, in fact, that in the studied example 91,78 % of the joint variability of Y is explained by the change in variable X . It was also established, in fact, that the characteristics of the model are statistically insignificant.

The coefficient of determination shows a certain proportion of variance (spread) of the dependent variable explained by the model under consideration. The value of the standard coefficient varies in the range from zero to one. The closer it is to one, the better is the regression model, that is, the constructed model perfectly approximates the initial data [6]. For statistical assessment of accuracy of the constraint equation, the average approximation error is also used [7].

Conclusion. In this work, a new model is proposed that has allowed to achieve a minimum overall logistics costs compared to existing approaches, while sequentially increasing the distance in iterations to obtain the final cost. To support the effectiveness of the proposed approach, it was substantiated using analysis in MS EXCEL and compared with other models in terms of total cost [9].

This dependence is recommended to the commercial units of business enterprises for

practical use in assessing and forecasting the cost of transportation provided by motor transport enterprises.

REFERENCES

1. Kasilingam, R. G. Transportation planning. In: Logistics and Transportation. Springer, Boston, MA, 1998, pp. 157–213. DOI: 10.1007/978-1-4615-5277-2_8. Last accessed 02.08.2020.
2. Afanasyev, L. L., Ostrovsky, N. B., Zuckerberg, S. M. Unified transport system and road transport: Textbook for students of universities [*Edinaya transportnaya sistema i avtomobilnie perevozki: Uchebnik dlya stud. vuzov*]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Transport publ., 1984, 333 p.
3. Vorkut, A. I. Cargo road transportation [*Gruzovye avtomobilnie perevozki*]. 2nd ed., rev. and enl. Kiev, Vissha shk. Head publishing house, 1986, 447 p.
4. Yurieva, N. I., Vitvitskiy, E. E. Electronic database «Reference and regulatory materials for road transport» [*Elektronnaya baza dannykh «Spravochnie i normativnie materialy po avtomobilnomu transportu»*]. Chronicles of the United Fund of electronic resources «Science and Education», Iss. 05 (72), May 2015, p. 66.
5. The history of development of transport: Methodological guidelines for practical training in the discipline 190700.62. Technology of transport processes of all forms of education [*Istoriya razvitiya transporta: Metodicheskie ukazaniya k prakticheskim zanyatiyam po distsipline 190700.62 Tekhnologiya transportnykh protsessov vseh form obucheniya*]. Comp. by V. N. Karnaukhov and A. S. Kolesnikov. Tyumen, TyumSNGU, 2012, 21 p. [Electronic resource]: <https://vossta.ru/metodicheskie-ukazaniya-k-prakticheskim-zanyatiyam-po-discipli-v2.html>. Last accessed 02.08.2020.
6. Savitskaya, G. V. Analysis of the economic activity of the enterprise: study guide [*Analiz khozyaistvennoi deyatelnosti predpriyatiya: ucheb. posobie*]. 7th ed., rev. Minsk, Novoe znanie publ., 2002, 704 p.
7. Eliseeva, I. I., Kuryshcheva, S. V., Kosteeva, T. V. [et al]. Econometrics: Textbook [*Ekonometrika: Uchebnik*]. Ed. by I. I. Eliseeva. Moscow, Finansy i statistika publ., 2002, 344 p.
8. Matantseva, O. Yu. Fundamentals of the economics of road transport: Study guide [*Osnovy ekonomiki avtomobilnogo transporta: Uchebnoe posobie*]. Moscow, Yustitsinform publ., 2020, 256 p. [Electronic resource]: <https://avidreaders.ru/download/osnovy-ekonomiki-avtomobilnogo-transporta-uchebnoe-posobie.html?f=pdf>. Last accessed 02.08.2020.
9. Hazarika, P., Kalita, C. S. Minimization of Transportation Cost of Paraffin Wax: A Proposed Approach Using C. Advances in Mechanical Engineering, Springer Science and Business Media LLC, Singapore, 17 January 2020, pp. 439–448. DOI: 10.1007/978-981-15-0124-1_39. Last accessed 02.08.2020.





Стратегия развития автомобилестроительной компании на российском авторынке на примере ПАО «Соллерс»



Бутов Александр Владимирович – РЭУ им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия.*

Александр БУТОВ

В представленной статье проведён анализ динамики развития российского рынка легковых и лёгких коммерческих автомобилей, исследованы стратегия и конкурентные преимущества группы компаний «Соллерс», которая успешно функционирует, несмотря на волатильность развития российского авторынka, необходимость кардинального обновления модельного ряда автомобилей компании, наличие избыточных производственных мощностей и уход из России трёх зарубежных партнёров ГК «Соллерс» по совместным предприятиям – компаний Fiat, SsangYong и Ford. Особое внимание в статье уделено партнёру по совместному предприятию с ПАО «Соллерс» компании Ford, которая покинула отечественный рынок в 2019 году. Это событие, негативно отразившееся на партнёрах и клиентах компании, было обусловлено целым рядом обстоятельств. Кроме того, в статье выявлены основные направления развития совместных предприятий Mazda Sollers и Ford Sollers (в части единственной оставшейся в российском производстве модели Ford – микроавтобуса Ford Transit) и возможности расширения их экспортного по-

тенциала, в том числе за счёт экспорта двигателей, запасных частей и комплектующих.

Пристальное внимание в статье уделено внедрению новых технологий в ПАО «Соллерс», развитию цифровизации в разработке и производстве новых моделей, созданию собственной телематической платформы, позволяющей подключить автомобиль к интернету и управлять им дистанционно, включая запуск двигателя.

Автором подробно рассмотрена новая модель потребления на авторынке, связанная с отказом покупателей от владения автомобилем и выбором новых услуг по подписке и обмену автомобилями, их развитием на зарубежном и отечественном рынках, а также проведён анализ успехов и неудач зарубежных автопроизводителей по предоставлению услуг по подписке.

Главной целью статьи является исследование стратегии ПАО «Соллерс» на отечественном и зарубежных рынках, вспомогательными целями – анализ отечественного рынка, изменения модели потребления и предоставления новых услуг, изучение причин ухода зарубежных партнёров компании.

Ключевые слова: автомобилестроение, транспорт, конкурентоспособность, ценовая политика, лидерство, локализация производства, господдержка, промышленная сборка, девальвация, контролирующий акционер, автокомпоненты, лизинг, цифровизация, интернет вещей, подписка на автомобили.

*Информация об авторе:

Бутов Александр Владимирович – кандидат экономических наук, доцент кафедры организационно-управленческих инноваций Российского экономического университета (РЭУ) им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия, a.v.butov@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 11.12.2019, актуализирована 17.03.2020, принята к публикации 16.10.2020.

For the English text of the article please see p. 177.

Целью представленной статьи является изучение стратегии ПАО «Соллерс», её обоснованности, эффективности, способности решать корпоративные проблемы компании, а также исследование динамики отечественного авторынка, проблем, препятствующих его развитию, изучение причин ухода с российского рынка партнёра «Соллерс» по совместному предприятию – компании Форд. Исследование охватывает период до 2019 года включительно в силу того, что на развитие событий 2020 года оказала очевидное воздействие эпидемиологическая обстановка. К *методам* исследования относятся методы наблюдения, анализа и синтеза, группировок, индукции и дедукции, аналогии и интерпретации.

Группа компаний «Соллерс», которая занимается производством и продажей автомобилей, двигателей, запасных частей и комплектующих, была основана в 2002 году и в настоящее время в её состав входят ООО «Ульяновский автомобильный завод», ОАО «Заволжский моторный завод», ООО «Соллерс-Дальний Восток», а также совместные предприятия – Ford Sollers и Mazda Sollers.

В 2019 году крупнейшие российские автопроизводители и ассоциация «Российские автомобильные дилеры» (РОАД) пересмотрели прогнозы продаж в сторону значительного их сокращения. Они просили у правительства возобновить программы поддержки спроса, а также внести в них коррективы, так как действующие программы были значительно уменьшены по объёмам выделенных средств и ограничены по стоимости машин 1 миллионом рублей, что стимулировало продажи в основном только автомобилей АвтоВАЗа, который и так является лидером продаж в России [1, с. 9].

У отечественного авторынка есть фундаментальная проблема, замедляющая темпы его роста – это уровень доходов населения. «Пока здесь что-то не произойдёт, рынок останется волатильным и роль регулятора будет очень большой. Очевидно, что вся индустрия будет обращаться за помощью в виде мер поддержки спроса к государству», – отмечал контролирующий акционер и председатель совета директоров ПАО «Соллерс» Вадим Швецов

[2, с. 10]. Волатильность российского авторынка характеризуется данными, приведёнными в табл. 1.

В 2019 году ситуация на авторынке ухудшилась: отмечалось падение продаж новых автомобилей в России. По данным рис. 1 за пять месяцев 2019 г. на отечественном рынке было реализовано 678 тысяч машин вместо 693 тысяч за тот же период 2018 года (спад на 2,2 %) [4].

Цены на автомобили в России в 2019 году выросли из-за повышения НДС и инфляции. Весь отечественный автопром сильно зависит от курсов валют, и ослабление рубля в августе 2016 года совпало с очередным увеличением цен в автосалонах. Локализация производства отечественных машин эту проблему в полном объёме не решает, так как очень много технологий, лицензий и автокомпонентов как отечественные, так и зарубежные автопроизводители вынуждены до сих пор импортировать. Рост цен в условиях сокращения реальных доходов населения неизбежно вызывал ещё большее падение спроса [5, с. 9].

Ещё одной проблемой в производстве и реализации автомобилей на отечественном рынке является высокая стоимость заёмных средств: минимальная ставка по лизингу или автокредиту составляет от 15 % [2, с. 10]. В России по сравнению с другими рынками наблюдаются низкие темпы обновления автопарка, нет стимулов, которые заставляли бы владельцев чаще менять автомобили. Даже с учётом трейд-ин стоимость нового автомобиля высока, и многие

Таблица 1
Динамика продаж новых автомобилей в РФ [3]

Годы	Объём продаж (тыс. шт.)
2007	2583
2008	2918
2009	1466
2010	1915
2011	2653
2012	2939
2013	2777
2014	2491
2015	1601
2016	1425
2017	1600
2018	1800



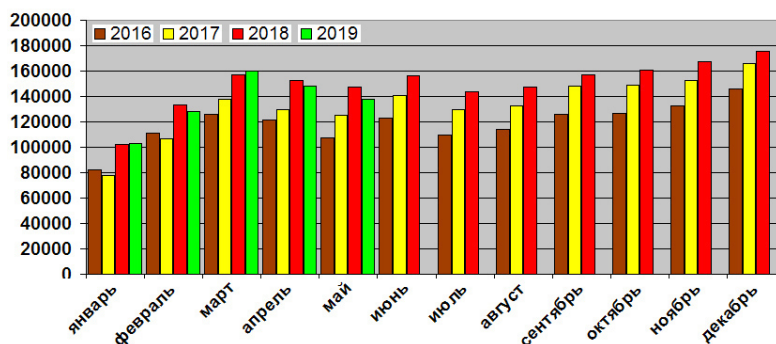


Рис. 1. Продажи новых автомобилей в России в 2016–2019 гг. [4].

ПРОДАЖИ ЛЕГКИХ КОММЕРЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ В РФ (ТЫС. ШТУК)

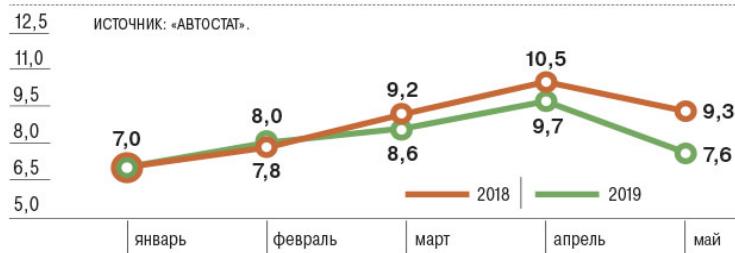


Рис. 2. Продажи LCV России в январе-мае 2017–2018 гг. [7].

отказываются от этой покупки. Поэтому для роста продаж необходимо возобновить в последующие годы государственные программы льготного автокредитования и льготного лизинга.

Из-за значительного сокращения господдержки и спроса со стороны предприятий малого и среднего бизнеса в январе-мае 2019 года произошло падение продаж и в сегменте лёгких коммерческих автомобилей на 8 % [см. рис. 2].

Ещё одна проблема большинства автопроизводителей в РФ заключается в *наличии избыточных производственных мощностей*, созданных в период роста рынка, что и определяет низкую рентабельность в отрасли.

Важным средством загрузки свободных производственных мощностей на стагнирующем рынке является *экспорт*, но его возможности для российского автопрома существенно ограничены. Хотя УАЗ активно развивает экспорт в дальнее зарубежье, и прежде всего в Южную Америку, но объёмы поставок на этот рынок достаточно скромные. «Нам остаются только открытые, с точки зрения тарифной защиты рынки, где в основном не очень большое потребление, — констатировал В. Швецов. — Нам

тяжело выйти на большие объёмы как нишесовому игроку. Здесь гораздо более интересный и перспективный путь развития — *экспорт компонентов*. По готовому продукту действует много заградительных мер, по компонентам их меньше или вообще нет. Поэтому проникновение в экспорт через компоненты или через машинокомплекты для сборки — более простой, на наш взгляд, подход. Мы начали очень серьёзный проект с Mazda: производим двигатели на Дальнем Востоке и встроились в глобальные цепочки поставки концерна» [2, с. 10].

Ещё одна проблема УАЗа сегодня заключается в том, что его продукция не отвечает современным требованиям рынка и нуждается в кардинальном обновлении модельного ряда. Для роста продаж как на отечественном, так и зарубежных рынках УАЗ планировал выпустить внедорожник на платформе класса Toyota Land Cruiser Prado стоимостью 1,5 млн руб. «Мы уверены, что многие потребители иностранных машин будут рассматривать российские автомобили, которые также отвечают текущему моменту по качеству, свойствам, цене», — прогнозирует В. Швецов [2, с. 10].

Ещё одним важным направлением современной стратегии ПАО «Соллерс»

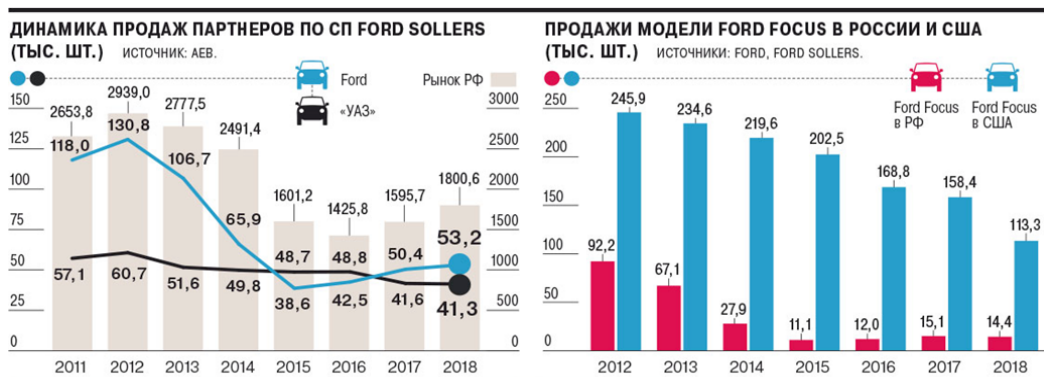


Рис. 3. Динамика продаж автомобилей компаний Ford и УАЗ в РФ [8, с. 10].

является создание совместных предприятий с зарубежными автопроизводителями, в которых компания продвигает наиболее востребованные на рынке модели (например, Ford Transit), использует общие комплектующие и платформы в производстве собственных автомобилей, а также увеличивает загрузку свободных производственных мощностей. В 2011 году ПАО «Соллерс» создало СП с компанией Ford, хотя по масштабам деятельности эти компании значительно отличались (рис. 3). На этот шаг компания Ford была вынуждена пойти из-за изменения государством условий предоставления льгот автопроизводителям, которые должны были подписать новые соглашения по промышленной сборке. Это соглашение предполагало создание производства на 350 тыс. машин в год и значительный рост локализации производства комплектующих. Компании Ford к моменту подписания соглашения по промсборке уже было некуда расширяться на её заводе во Всеволожске, а у ПАО «Соллерс» были две свободные производственные площадки — в Елабуге и Набережных Челнах, которые она и внесла в СП.

В планах, которые презентовали партнёры по СП при подписании с Министерством промышленности и торговли РФ соглашения по промсборке, был представлен оптимистический прогноз роста российского рынка легковых и лёгких коммерческих автомобилей к 2016 году в два раза — до 3,7 млн машин, а по продукции СП планировалось за этот период увеличить долю Ford в России до 9 % [1, с. 10]. Однако представленный прогноз оказался не-

реалистичным, так как рынок в эти годы показал прямо противоположную динамику, и уже в 2014 году СП Ford Sollers объявило о переводе предприятий на односменный режим работы, резко сократив персонал (рис. 3).

Участие в этом СП не принесло компании Ford ожидаемых результатов: в марте 2015 года она объявила о семи миллиардах убытков и обесценивании инвестиций в СП [8, с. 10]. К убыткам Ford привели не только ухудшение экономической ситуации и девальвация рубля в стране, но и просчёты в ценовой и маркетинговой политике (повышение цен и задержки с обновлением модельного ряда), а также ошибки в работе с дилерами, включая резкое сокращение монобрендовых салонов и значительное расширение дилерской сети при падении общего объёма продаж, а также сокращении доходов дилеров.

В 2016 году объём продаж СП Ford Sollers начал расти, но доля компании Ford на рынке так и не превысила 3 % вплоть до конца 2018 года: Ford не смог подняться с десятого места в рейтинге отечественных автопроизводителей [3, с. 15]. При этом компания несла убытки, так как её производственные мощности были явно избыточными: во Всеволожске выпускались Focus и Mondeo, в Елабуге — Explorer, Kuga и Ford Transit, в Набережных Челнах — Ecosport и Fiesta. Три отдельных завода производили по две модели в очень небольших объёмах. Поэтому принятое в 2019 году решение компании Ford прекратить производство и продажи легковых автомобилей в России стало вполне предсказуемым событием. Хотя компания Ford



в качестве неконтролирующего акционера всё же осталась на отечественном рынке в новом СП Ford Sollers Netherlands B. V., в котором будут выпускаться только лёгкие коммерческие автомобили Ford Transit, это уже никак не покроет понесённых компанией Ford убытков от ухода с российского рынка в размере 500 млн долл., в том числе 200 млн долл. прямых денежных потерь по выплатам рабочим и поставщикам [9, с. 7].

Следует отметить, что компания «Соллерс» в СП уделяла особое внимание продвижению одной лёгкой коммерческой модели Ford Transit, продажи которой росли на фоне падения объёмов реализации остальной линейки автомобилей СП Ford Sollers. С моделями УАЗа Ford Transit идеально сочетается в рамках локализации производства основных компонентов — моторов, трансмиссий и т.д. «С точки зрения свойств продукта, они были одинаковы, и решения, которые применялись на Ford Transit, очень нужны для нового УАЗа» — отмечал председатель совета директоров ПАО «Соллерс» Вадим Швецов [3, с. 10]. Поэтому ПАО «Соллерс» в настоящее время развивается вполне успешно, являясь контролирующим акционером в СП Ford Sollers Netherlands B. V., владеющим по данным американского сайта Carscoops 51 % акций компании [10].

В 2012 году было создано ещё одно СП Mazda Sollers, которое приступило к сборке автомобилей Mazda на дальневосточном автозаводе. В 2016 году СП Mazda Sollers подписало СПИК (соглашение по сборке), по которому был начат выпуск трёх моделей — Mazda 6, Mazda CX-5 и Mazda CX-9, а также запущено производство двигателей на экспорт мощностью 50 тыс. штук в год. За 2018 год продажи автомобилей Mazda в РФ выросли на 22 % до 31,7 тыс. шт., а за первый квартал 2019 года — на 10 % до 6,6 тыс. шт. [11, с. 7]. Динамика развития СП Mazda Sollers даже в условиях волатильности и спада на российском рынке вселяет надежду в успешность его дальнейшего развития в отличие от предыдущих совместных предприятий ПАО «Соллерс» с компаниями Fiat, SsangYong и Ford, ушедшими из России.

Ещё одной фундаментальной проблемой мирового и отечественного авторынка

является *трансформация модели потребления в новую пользовательскую модель*, в которой автомобиль превращается исключительно в средство передвижения, теряя значительную часть своих эмоциональных свойств, а решение о его выборе становится рациональным и прагматичным. Эту тенденцию отмечает также Светлана Максина, которая пишет, что «в будущем, когда автономные машины прибывают по требованию, чтобы отвезти вас туда, куда вам нужно ехать, кажется, нет смысла владеть ими. Средний автомобиль проводит около 90 % своей жизни на стоянке. Переход от частных транспортных средств к сервису, которым владеют и управляют государственные или частные предприятия, — это разумное и эффективное решение, которое революционизирует движение транспортных потоков через города» [12, с. 7].

Трансформация модели потребления означает, что нынешние клиенты готовы полностью отказаться от владения автомобилем: они будут совершать покупку автомобиля только в те редкие моменты, когда их чувства смогут подчинить разум, а в большинстве случаев покупатели начнут принимать рациональные решения, выбирая для конкретных поездок оптимальный вариант — такси, каршеринг или подписку на автомобиль. Поэтому автопроизводителям нужно менять бизнес-модель, и она должна строиться не на традиционных продажах автомобилей, а на продаже сервиса. Сегодня уже недостаточно предлагать покупателям сервис в виде стандартного контракта жизненного цикла, по которому автомобиль продаётся с запасными частями, ремонтом и возможностью сдать его в трейд-ин. Необходимо также сделать автомобиль элементом экосистемы — он должен научиться генерировать, принимать и передавать информацию. Для этого нужна телематическая платформа, которая позволит подключать автомобиль к Интернету и получать из сети все необходимые данные. Интернет вещей (IoT) должен изменить любого автопроизводителя больше, чем реинжиниринг бизнес-процессов, методика «шести сигм» или концепция бережливого производства [13, р. 257]. Это критически важное направление для управления автомобилем извне.

Результаты внедрения изменений на базе IoT только на одном заводе Harley-Davidson привели к:

- ускорению на 80 % процесса принятия решений;
- повышению доходности на 3–4 %;
- сокращению продолжительности сборки продукции в 10–25 раз [14, с. 21–22; 15, с. 175].

«Чуть меньше года назад мы начали создавать команду специалистов для *разработки собственной телематической платформы*, — говорил В. Швецов. — Она позволит осуществлять подключение автомобиля, а спектр передаваемых данных и сервисов на их основе будет варьироваться в зависимости от требований клиента. Скажем, для частной эксплуатации по модели каршеринга — это одни сервисы, а для бизнеса — другие. Мы прекрасно понимаем, что основная проблема на рынке коммерческих перевозок — это автономность каждого звена цепочки: есть водитель, есть груз, есть транспортное средство. Современные телематические продукты позволяют соединить все эти элементы в единый, полностью управляемый, процесс, который будет гарантировать эффективность перевозок. Для физических лиц будут предусмотрены другие интересные возможности, — например, дистанционный запуск двигателя или возможность обмена автомобилями» [2, с. 10].

Следует отметить, что ПАО «Соллерс», как и другие отечественные автопроизводители, значительно отстает с вводом новых сервисов, уже достаточно давно и широко распространённых среди зарубежных конкурентов. В мире услуги по подписке (сервис, сочетающий в себе черты каршеринга, аренды и лизинга) развиваются ускоренными темпами с 2016 года. В настоящее время численность подписчиков этой услуги составляет около 1 млн чел. Они предоставляются большинством автопроизводителей, в т.ч. компаниями Volvo, Mercedes-Benz, BMW, Jaguar Land Rover, Porsche, Ford, Nissan, Toyota. Эта услуга приобретает всё большую популярность, хотя полученные от её внедрения результаты варьируются от успешных до провальных, в зависимости от выбранной автопроизводителями стратегии (числа моделей

для обмена, лимита годового пробега, стоимости услуги и пр.).

Самый широкий выбор был предложен компанией General Motors, которая в 2017 году стала предоставлять по подписке автомобили Cadillac в США. За 1,8 тыс. долл. в месяц клиент мог выбирать и менять в течение года 18 моделей — от вместительного кроссовера Cadillac XT5 до спортивного седана CTS-V. Причём за машиной было необязательно ездить к дилеру, достаточно было ему позвонить — и курьер доставлял автомобиль прямо к дому. Лимит пробега составлял 38 тыс. км в год. Однако это услуга для компании General Motors оказалась нерентабельной, и в 2019 году компания перестала её предоставлять [16, с. 19].

Другие автопроизводители не отказались от этой услуги и до сих пор активно её развивают. Так, компания Volvo заявляет, что к 2025 году через этот сервис компания будет реализовывать 50 % своих автомобилей. Отмечу, что компания Volvo первой на российском авторынке предложила клиентам пользование автомобилем по подписке. Сервис под названием Volvo Car Drive предлагает новый кроссовер Volvo XC60 TS, которым можно пользоваться в течение года за 59,5 тыс. руб. в месяц. Весь срок пользования автомобилем будет числиться на балансе компании. В ежемесячную плату входит всё необходимое, кроме мойки и бензина, включая ОСАГО и КАСКО, техническое обслуживание и ремонт, сезонную замену колёс и их хранение, оформление всех документов и регистрацию машины. Из ограничений для пользователя отмечу, что компания запрещает использовать автомобиль в качестве такси, ограничивает его пробег 30 тыс. км в год и возможность его использования за пределами Центрального и Северо-Западного федеральных округов¹.

Компания Hyundai стала вторым автопроизводителем, который ввёл с 1 октября 2019 года подписку на отечественном рынке. Запустив на смартфоне приложение Hyundai Mobility, клиент может выбрать три

¹ Volvo Car Drive: первый в России сервис подписки на автомобиль от автопроизводителя. — June 3, 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.volvocars.com/ru/about/our-stories/news/volvo-car-drive-russias-first>. Доступ 11.12.2019.



тарифа подписки: во-первых, тариф City, по которому автомобиль можно взять на срок от 1 до 24 часов (за 650–800 руб./час в зависимости от выбранного кроссовера — Creta, Tucson или Santa Fe); во-вторых, тариф Country, предлагающий автомобиль на срок от 1 дня до месяца (от 3,0 до 6,8 тыс. руб./день в зависимости от срока и марки автомобиля) и, в-третьих, тариф Freedom, рассчитанный на срок от 1 месяца до года (от 29,9 до 88,0 тыс. руб. в мес.)².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПАО «Соллерс» активно развивает производство на совместных предприятиях, но отстаёт в развитии собственного производства автомобилей УАЗ, обновлении модельного ряда, внедрении информационных технологий и предоставлении услуг по подписке, которые уже активно предлагаются зарубежными конкурентами на отечественном рынке. Это отставание негативно отражается на объёмах продаж автомобилей УАЗ, которые сократились в 2018 году на 9 % по сравнению с 2016 годом³. Разработанная ПАО «Соллерс» стратегия развития призвана обеспечить рост продукции как собственного, так и зарубежного производства на совместных предприятиях, а также решение внутренних проблем компании. К основным направлениям этой стратегии относятся:

- рост объёмов производства и реализации автомобилей и автокомпонентов, в том числе за счёт развития экспорта;
- обновление модельного ряда;
- создание и успешное развитие совместных предприятий с зарубежными партнёрами — компаниями Mazda, Ford и др.;
- разработка собственной телематической платформы и внедрение изменений на основе IoT в производстве автомобилей компании;
- расширение предоставляемых клиентам новых услуг, включая услуги по подписке.

² Сервис онлайн-подписки Hyundai Mobility. [Электронный ресурс]: <https://mobility.hyundai.ru/#tariffs>. Доступ 11.12.2019.

³ Данные о продажах автомобилей УАЗ в России за 2016 год. [Электронный ресурс]: <https://auto.vercity.ru/statistics/sales/europe/2016/russia/uaz/>. Доступ 11.12.2019.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина О. Авторынок пошел под уклон // Коммерсант. — 2019. — № 108. — С. 9. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/4011539>. Доступ 11.12.2019.
2. Швецов В. Даже крупный бизнес сидит в окопе // Коммерсант. — 2019. — № 125. — С. 10. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/4033008>. Доступ 11.12.2019.
3. Грамматчиков А. Машины взяли на вырост // Коммерсант. — 2019. — № 47. — С. 15. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/3915398>. Доступ 11.12.2019.
4. Владимирский И. Авторынок России: падение усиливается // Авторевю. Новости. — 6 июня 2019 г. [Электронный ресурс]: <https://autoreview.ru/news/avtorynok-rossii-padenie-usilivaetsya>. Доступ 11.12.2019.
5. Никитина О., Павлова Н. На авторынок обрушился японский год // Коммерсант. — 2019. — № 80. — С. 9. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/3967588>. Доступ 11.12.2019.
6. Лизинг против кредита: рассчитываем реальные автомобили. [Электронный ресурс]: <https://dvizhok.ru/business/lizing-protiv-kredita-rasschityvaem-realnyie-avtomobili>. Доступ 11.12.2019.
7. Никитина О. «Газели» буксуют без господдержки // Коммерсант. — 2019. — № 100. — С. 9. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/3998495>. Доступ 11.12.2019.
8. Никитина О. Почему пал Ford Ross // Коммерсант. — 2019. — № 70. — С. 10. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/3947596>. Доступ 11.12.2019.
9. Никитина О. Ford доплатит «Соллерс» за участие // Коммерсант. — 2019. — № 111. — С. 7. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/4013478>. Доступ 11.12.2019.
10. Tudose, S. Ford Set to Exit Passenger Car Market in Russia. [Электронный ресурс]: <https://www.carscoops.com/2019/03/ford-set-to-exit-passenger-car-market-in-russia/>. Доступ 11.12.2019.
11. Никитина О. «Мазда Соллерс» поедет на свои // Коммерсант. — 2019. — № 75. — С. 7. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/3955396>. Доступ 11.12.2019.
12. Макина С. Владение автомобилем уйдёт в прошлое // Компьютерра. — 10 июня 2019 г. [Электронные ресурсы]: <https://www.computerra.ru/238438/vladenie-avtomobilem-ujdet-v-proshloe/>, <https://theconversation.com/car-ownership-is-likely-to-become-a-thing-of-the-past-and-so-could-public-transport-110550>. Доступ 11.12.2019.
13. van den Berg, G., Piterma, P. Key Management Models. 3rd ed., The 75+ Models Every Manager Needs to Know, Pearson, London, 2014, 344 p. [Электронный ресурс]: <https://b-ok.cc/dl/5442842/ddf12b>. Доступ 11.12.2019.
14. Krantz, M. Building the Internet of Things: Implement New Business Models, Disrupt Competitors, Transform Your Industry. John Wiley & Sons, 2017, 336 p. [Электронный ресурс]: <https://ua.b-ok.cc/dl/2830370/e57243/>. Доступ 11.12.2019.
15. Бутов А. В. Четвёртая промышленная революция и её влияние на развитие мировой экономики / Сб.: Проблемы и перспективы развития промышленности России. — М.: Русайнс, 2019. — С. 174–179. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39453169/>. Доступ 11.12.2019.
16. Грамматчиков А. Подписка о выезде // Авто. Коммерческий транспорт. — 2019. — № 158. — С. 3. [Электронный ресурс]: <https://www.kommersant.ru/doc/4079826>. Доступ 11.12.2019.



Development Strategy of a Car Manufacturing Company in the Russian Car Market at the example of Sollers PJSC



Butov, Alexander V., Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia.*

Alexander I. BUTOV

ABSTRACT

The article analyses the dynamics of development of the Russian market of passenger cars and light commercial vehicles, investigates the strategy and competitive advantages of Sollers group of companies, which is successfully operating despite volatility of development of the Russian car market, as well as the need for a radical renewal of the model range of the company's cars, the presence of excess production capacity and the departure from Russia of three foreign partners of Sollers group of companies in joint ventures: Fiat, SsangYong and Ford. Particular attention in the article is paid to Ford, a joint venture partner with Sollers PJSC, which left the Russian domestic market in 2019. This event, which had a negative impact on partners and clients of the company, was caused by several circumstances. Besides, the article identifies the main directions of development of joint ventures Mazda Sollers and Ford Sollers (in terms of Ford Transit minibus, the only locally manufactured Ford model) and the possibility of expanding their export

potential, including due to export of engines, spare parts and components.

The article pays close attention to introduction of new technologies in Sollers PJSC and other companies, development of digitalisation in development and production of new models, creation of its own telematics platform that allows to connect a car to the Internet and control it remotely, including starting the engine.

The author examines in detail a new consumption model in the car market associated with refusal of buyers to own a car and with emerging choice of new services regarding subscription and exchange of cars, their development in foreign and domestic markets, as well as offers the analysis of successes and failures of foreign automakers in providing subscription services.

The main purpose of the article is to study the strategy of Sollers PJSC in the domestic and foreign markets, auxiliary purposes refer to the analysis of the domestic market, change in the consumption model and provision of new services, study of reasons for departure of foreign partners of the company.

Keywords: car manufacturing, transport, competitiveness, pricing policy, leadership, localization of production, state support, industrial assembly, devaluation, controlling shareholder, auto components, leasing, digitalization, Internet of things, car subscription.

*Information about the author:

Butov, Alexander V. – Ph.D. (Economics), Associate Professor at the Department of Organisation and Administrative Innovations of Plekhanov Russian University of Economics (REU), Moscow, Russia, a.v.butov@yandex.ru.

Article received 11.12.2019, revised 17.03.2020, accepted 16.10.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 170.

The objective of the article is to study the strategy of Sollers PJSC, its validity, efficiency, ability to solve corporate problems of the company, as well as to study the dynamics of the domestic car market, problems hindering its development, to study the reasons for departure from the Russian market of Ford corporation, Sollers partner in a joint venture company. The research has covered the period until 2020 since further developments were highly influenced by pandemic situation. Research methods include methods of observation, analysis and synthesis, groupings, induction and deduction, analogy, and interpretation.

Sollers group of companies, which is engaged in production and sale of cars, engines, spare parts and components, was founded in 2002 and currently includes LLC Ulyanovsk Automobile Plant (UAZ), OJSC Zavolzhsy Motor Plant, LLC Sollers – Far East, as well as joint ventures: Ford Sollers and Mazda Sollers.

In 2019, the largest Russian car manufacturers and the Russian Automobile Dealers Association (ROAD) revised their sales forecasts towards a significant reduction. They asked the government to resume demand support programs, as well as to tune them, because the existing programs were significantly reduced in terms of the amount of allocated funds and the cost of cars (less than 1 million roubles), thus stimulating sales of mainly AvtoVAZ cars, which is already the leader in sales in Russia [1, p. 9].

The domestic car market has a fundamental problem that slows down its growth rates, and

that is the level of household income. «Until something happens here, the market will remain volatile, and the role of the regulator will be very important. It is obvious that the entire industry will seek help in the form of measures to support demand from the state», said Vadim Shvetsov, the controlling shareholder and chairman of the board of directors of Sollers PJSC [2, p. 10]. The volatility of the Russian car market is characterized by the data given in Table 1.

In 2019, the situation in the car market worsened: there was a drop in new car sales in Russia. According to Pic. 1 for five months of 2019, 678 thousand cars were sold on the domestic market instead of 693 thousand during the same period of 2018 (a decline by 2,2 %) [4].

Car prices in Russia rose in 2019 due to higher VAT and inflation. The entire domestic car manufacturing industry is highly dependent on exchange rates and weakening of rouble in August 2016 coincided with another increase in prices in car dealerships. Localisation of production of domestic cars does not fully solve this problem, since both domestic and foreign automakers are still forced to import a lot of technologies, licenses, and auto components. The rise in prices in the context of a decrease in real incomes of the population inevitably causes an even greater drop in demand [5, p. 9].

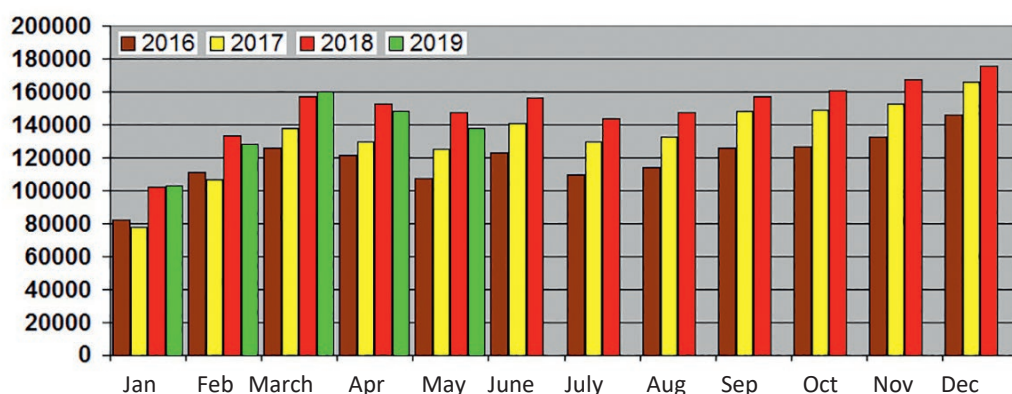
Another problem in production and sale of cars in the domestic market is the high cost of borrowed funds: the minimum rate for leasing or car loans is 15 % [2, p. 10]. In Russia, compared to other markets, there is a low rate of vehicle fleet renewal, there are no incentives that force owners to change cars more often. Even considering the trade-in, the cost of a new car is high, and many people refuse this purchase. Therefore, to increase sales, it is necessary to resume in the next years the state programs of concessional car loans and concessional leasing.

Due to a significant reduction in state support and demand from small and medium-sized businesses in January–May 2019, there was a drop in sales in the segment of light commercial vehicles by 8 % (Pic. 2).

Another problem of most car manufacturers in the Russian Federation is *presence of excess production capacity* created during the period of market growth, which determines low profitability in the industry.

Table 1
Dynamics of sales of new cars in the Russian Federation [3]

Years	Sales volume (thousand units)
2007	2583
2008	2918
2009	1466
2010	1915
2011	2653
2012	2939
2013	2777
2014	2491
2015	1601
2016	1425
2017	1600
2018	1800



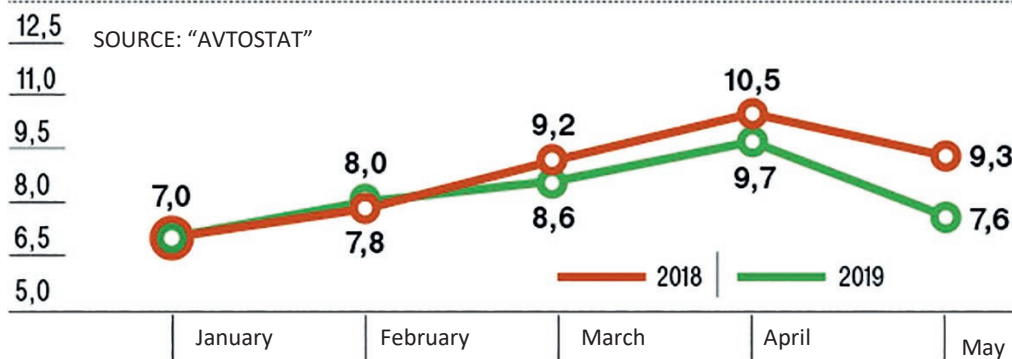
Pic. 1. Sales of new cars in Russia in 2016–2019 [4].

Export is an important means of loading free production capacities in a stagnating market, but its opportunities for the Russian car industry are significantly limited. Although UAZ is actively developing exports to non-CIS countries, and primarily to South America, the volume of supplies to this market is rather modest. «We are left with only open markets, from the point of view of tariff protection, where consumption is generally not extremely high», stated V. Shvetsov. — It is hard for us to reach large volumes as a niche player. Here, a much more interesting and promising development path is export of components. For the finished product, there are many protective measures, for components there are fewer or none. Therefore, entry into export operations with components or with car kits for assembly is a simpler, in our opinion, approach. We started a profoundly serious project with Mazda: we produce engines in the Far East and have integrated into the global supply chains of the group» [2, p. 10].

Another problem of UAZ today is that its products do not meet modern market requirements and require a radical update of the model range. To increase sales in both domestic and foreign markets, UAZ planned to produce an SUV on the Toyota Land Cruiser Prado class platform worth 1,5 million roubles. «We are confident that many consumers of foreign cars will consider Russian cars that also meet the current situation in terms of quality, properties, price», V. Shvetsov predicted [2, p. 10].

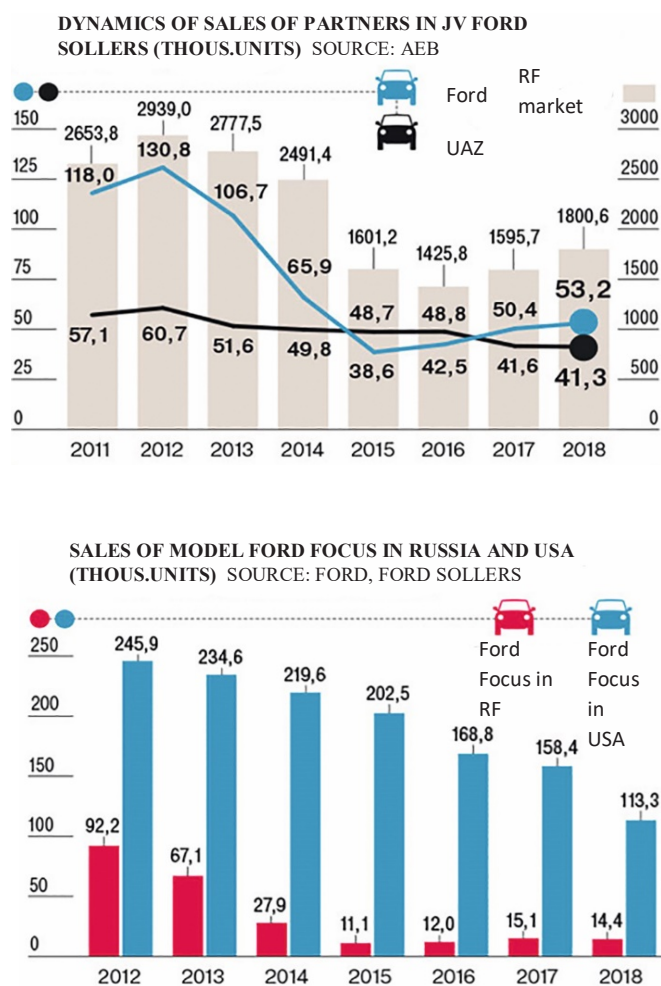
Another important area of the modern strategy of Sollers PJSC is creation of joint ventures with foreign car manufacturers, in which the company promotes the most popular models on the market (for example, Ford Transit), uses common components and platforms for production of its own cars, and increases the load of available production capacities. In 2011, Sollers PJSC set up a joint venture with Ford, although these companies

SALES OF LIGHT COMMERCIAL CARS IN THE RUSSIAN FEDERATION (THOUSAND UNITS)



Pic. 2. Sales of LCV in Russia in January-May 2017–2018 [7].





Pic. 3. Dynamics of sales of cars Ford and UAZ in the Russian Federation [8, p. 10].

differed significantly in terms of scale of their activities (Pic. 3). Ford was forced to take this step because the Russian government changed the conditions for granting benefits to automakers, which were to sign new agreements on industrial assembly. This agreement provided for creation of production capacity for 350 thousand cars per year and a significant increase in localisation of production of components. By time the industrial assembly agreement was signed, Ford had nowhere to expand at its plant in Vsevolzhsk, and Sollers PJSC had two vacant production sites in Yelabuga and Naberezhnye Chelny, which it contributed to the joint venture.

The plans presented by the partners in the joint venture during signing of the industrial assembly agreement with the Ministry of

Industry and Trade of the Russian Federation included an optimistic forecast for the growth of the Russian market of passenger cars and light commercial vehicles. It was expected to double by 2016 producing up to 3,7 million vehicles, and within the products of the joint venture it was planned for this period to increase the share of Ford in Russia to 9 % [1, p. 10]. However, the presented forecast turned out to be unrealistic, since the market in these years showed exactly the opposite dynamics, and already in 2014, JV Ford Sollers announced the transfer of enterprises to a single-shift mode of operation, sharply reducing staff (Pic. 3).

Participation in this joint venture did not bring the expected results to Ford: in March 2015, it announced 7 billion losses and

depreciation of investments in the joint venture [8, p. 10]. Ford's losses were caused not only by the worsening economic situation and devaluation of rouble in the country, but also by miscalculations in pricing and marketing policies (price increases and delays in updating the model range), as well as errors in working with dealers, including a sharp reduction in mono-brand showrooms and a significant expansion of dealer network with a drop in total sales, as well as a decrease in dealer income.

In 2016, the sales volume of JV Ford Sollers began to grow, but Ford's market share did not exceed 3 % until the end of 2018: Ford could not rise from the tenth place in the ranking of domestic car manufacturers [3, p. 15]. At the same time, the company incurred losses, since its production capacity was clearly redundant: Focus and Mondeo were produced in Vsevolozhsk; Explorer, Kuga and Ford Transit were produced in Yelabuga; Ecosport and Fiesta were produced in Naberezhnye Chelny. Three separate factories produced two models each in exceedingly small quantities. Therefore, Ford's decision in 2019 to discontinue production and sales of passenger cars in Russia was a completely predictable event. Although Ford, as a non-controlling shareholder, still remained on the domestic market in the form of new JV Ford Sollers Netherlands B. V., which will produce only Ford Transit light commercial vehicles, this will in no way cover the losses incurred by Ford from leaving the Russian market at the amount of 500 million dollars, including 200 million dollars of direct monetary losses in payments to workers and suppliers [9, p. 7].

It should be noted that Sollers company in the JV paid special attention to promotion of a light commercial model Ford Transit, sales of which were growing against the background of falling sales of the rest of the JV Ford Sollers vehicle line. Ford Transit is ideally combined with UAZ models within the framework of localisation of production of the main components: motors, transmissions, etc. «From the point of view of product properties, they were the same, and the solutions that were used at Ford Transit are very much needed for the new UAZ» – said Vadim Shvetsov, Chairman of the Board of Directors of Sollers PJSC [3, p. 10]. Therefore, Sollers PJSC is currently developing quite successfully, being the controlling shareholder in the JV Ford Sollers

Netherlands B. V., which, according to the American website Carscoops, owns 51 % of the company's shares [10].

In 2012, another joint venture Mazda Sollers was created, which started assembling Mazda cars at the Far East car plant. In 2016, JV Mazda Sollers signed SPIC [special investment contract] on industrial assembly, according to which production of three models (Mazda 6, Mazda CX-5 and Mazda CX-9) was launched, along with production of engines intended for export with a capacity of 50 thousand units per year. In 2018, sales of Mazda cars in the Russian Federation increased by 22 % to 31,7 thousand units, and in the first quarter of 2019 by 10 % to 6,6 thousand units [11, p. 7]. The dynamics of JV Mazda Sollers development, even in the conditions of volatility and recession in the Russian market, gives hope for success of its further development, in contrast to the previous joint ventures of Sollers PJSC with Fiat, SsangYong and Ford, which left Russia.

Another fundamental problem of the global and domestic car market is *the transformation of the consumption model into a new user model*, in which the car turns exclusively into a means of transportation, losing a significant part of its emotional properties, and the decision to choose it becomes rational and pragmatic. This trend is also noted by Svetlana Maksina, who writes that «*in the future, when autonomous cars arrive on demand to take you where you need to go, there seems to be no point in owning them. The average car spends about 90 % of its life in the parking lot. The transition from private vehicles to a service that is owned and operated by public or private enterprises is a smart and effective solution that will revolutionise traffic flows in cities*» [12, p. 7].

The transformation of the consumption model means that current customers are ready to completely abandon car ownership: they will buy a car only in those rare moments when their feelings can subdue their minds, and in most cases, buyers will begin to make rational decisions, choosing the best option for specific trips: taxi, car sharing or car subscription. Therefore, automakers need to change their business model, and it should be based not on traditional car sales, but on the sale of service. Today it is no longer enough to offer customers a service in the form of a standard life cycle



contract, according to which a car is sold with spare parts, repairs, and the ability to exchange it through trade-in. It is also necessary to make the car an element of the ecosystem: it must learn to generate, receive, and transmit information. This requires a telematics platform that allows the car to be connected to the Internet and receive all the necessary data from the network. The Internet of Things (IoT) should change any automaker more than business process reengineering, Six Sigma or the concept of lean manufacturing [13, p. 257]. This is a critical area for controlling the car from the outside.

The results of *implementing IoT-based changes* at a single plant of Harley-Davidson resulted in:

- 80 % acceleration of the decision-making process;
- increase in profitability by 3–4 %;
- reducing duration of assembly of products by 10–25 times [14, pp. 21–22; 15, p. 175].

«A little less than a year ago, we began to create a team of specialists to develop our own telematics platform», noted V. Shvetsov. «It will allow the car to be connected, and the range of transmitted data and services based on them will vary depending on the client's requirements. For example, for private use according to the car-sharing model, these are some services, and for business there are the other ones. We are well aware that the main problem in the commercial transportation market is autonomy of each link in the chain: there is a driver, there is a load, there is a vehicle. Modern telematics products make it possible to combine all these elements into a single, fully manageable process that will guarantee efficiency of transportation. For individuals, other interesting opportunities will be provided, for example, remote engine start or the ability to exchange cars» [2, p. 10].

It should be noted that Sollers PJSC, like other domestic car manufacturers, lag significantly behind in introduction of new services, which have long been widespread among their foreign competitors. Globally, subscription services (a service that combines features of car sharing, rental, and leasing) have been developing at an accelerated pace since 2016. Currently, the number of subscribers to this service is about 1 million people. It is provided by most car manufacturers, comprising Volvo, Mercedes-

Benz, BMW, Jaguar Land Rover, Porsche, Ford, Nissan, Toyota. This service is gaining more and more popularity, although the results obtained from its implementation vary from success to failure, depending on the strategy chosen by car manufacturers (the number of models for exchange, annual mileage limit, the cost of the service, etc.).

The widest selection was offered by General Motors, which began providing Cadillacs by subscription in the United States in 2017. For \$1,8 thousand a month, the client could choose and change 18 models within a year: from the roomy Cadillac XT5 crossover to the CTS-V sports sedan. Moreover, it was not necessary to go to the dealer to get the car, it was enough to call him, and the courier delivered the car directly to the house. The mileage limit was 38 thousand km per year. However, this service for General Motors turned out to be unprofitable and in 2019 the company stopped providing it [16, p. 19].

Other automakers have not abandoned this service and are still actively developing it. For example, Volvo says that by 2025 the company will sell 50 % of its cars through this service. It is to note that Volvo was the first company in the Russian car market to offer customers the use of a car by subscription. A service called Volvo Car Drive offers a new crossover Volvo XC60 TS, which can be used throughout the year for 59,5 thousand roubles per month. For the entire period of use, the car will be registered on the company's balance sheet. The monthly fee includes everything you need, except for washing and gasoline, including compulsory civil liability insurance and motor own damage insurance, maintenance and repair, seasonal replacement of tires and their storage, preparing of all documents and registration of the car. Of the restrictions for the user, one can note that the company prohibits the use of a car as a taxi, limits its mileage to 30 thousand km per year and the possibility of using it outside the Central and North-Western Federal Districts¹.

Hyundai became the second automaker to introduce subscriptions to the Russian domestic market from October 1, 2019. Having launched

¹ Volvo Car Drive: Russia's first car subscription service from a car manufacturer [Volvo Car Drive: *perviy v Rossii servis podpiski na avtomobil ot avtoproizvoditelya*]. June 3, 2019. [Electronic resource]: <https://www.volvocars.com/ru/about/our-stories/news/volvo-car-drive-russias-first>. Last accessed 11.12.2019.

the Hyundai Mobility application on a smartphone, the client can choose three subscription tariffs: firstly, the City tariff, according to which a car can be rented for a period of 1 to 24 hours (for 650–800 roubles per hour, depending on the chosen crossover: Creta, Tucson or Santa Fe); secondly, the Country tariff, which offers a car for a period from 1 day to a month (from 3,0 to 6,8 thousand roubles per day, depending on the period and brand of the car) and, thirdly, the Freedom tariff, designed for term from 1 month to a year (from 29,9 to 88,0 thousand roubles per month)².

Conclusion. Sollers PJSC is actively developing production at joint ventures, but lags behind in development of its own production of UAZ vehicles, updating the model range, introducing information technologies and providing subscription services, which are already actively offered by foreign competitors in the domestic market. This lag has a negative impact on the sales of UAZ vehicles, which decreased in 2018 by 9 % compared to 2016³. The development strategy followed by Sollers PJSC is designed to ensure the growth of products of both domestic and foreign production at joint ventures, as well as solution of internal problems of the company. The main areas of this strategy are:

- growth in production and sales of cars and auto components, including due to development of exports;
- updating the model range;
- creation and successful development of joint ventures with foreign partners companies: Mazda, Ford, etc.;
- development of own telematics platform and implementation of IoT-based changes in the company's car production;
- expansion of new services provided to customers, including subscription services.

REFERENCES

1. Nikitina, O. The car market went downhill [*Avtorynok poshel pod uklon*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 108, p. 9. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/4011539>. Last accessed 11.12.2019.
2. Online subscription service Hyundai Mobility [*Servis onlain-podpiski Hyundai Mobility*]. [Electronic resource]: <https://mobility.hyundai.ru/#tariffs>. Last accessed 11.12.2019.
3. Data on sales of UAZ vehicles in Russia for 2016 [*Dannie o prodazhakh avtomobilei UAZ v Rossii za 2016 god*]. [Electronic resource]: <https://auto.vercity.ru/statistics/sales/europe/2016/russia/uaaz/>. Last accessed 11.12.2019.

2. Shvetsov, V. Even big business is sitting in a trench [*Dazhe krupniy biznes sidit v okope*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 125, p. 10. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/4033008>. Last accessed 11.12.2019.
3. Grammatchikov, A. Machines took to growth [*Mashiny vzlyali na vyrost*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 47, p. 15. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/3915398>. Last accessed 11.12.2019.
4. Vladimirsky, I. The Russian car market: the fall is increasing [*Avtorynok Rossii: padenie usilivaetsya*]. Autoreview. News. June 6, 2019. [Electronic resource]: <https://autoreview.ru/news/avtorynok-rossii-padenie-usilivaetsya>. Last accessed 11.12.2019.
5. Nikitina, O., Pavlova, N. The Japanese year has fallen on the car market [*Na avtorynokobrushilsya yaponskiy god*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 80, p. 9. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/3967588>. Last accessed 11.12.2019.
6. Leasing versus credit: calculating real cars [*Lizing protiv kredita: rasschityvaem realnie avtomobili*]. [Electronic resource]: <https://dvizhok.ru/business/lizing-protiv-kredita-rasschityvaem-realnyie-avtomobili>. Last accessed 11.12.2019.
7. Nikitina O. «Gazelles» stalled without state support [*«Gazeli» buksuyut bez gospodderzhki*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 100, p. 9. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/3998495>. Last accessed 11.12.2019.
8. Nikitina, O. Why Ford Ross fell [*Pochemu pal Ford Ross*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 70, p. 10. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/3947596>. Last accessed 11.12.2019.
9. Nikitina, O. Ford will pay Sollers for participation [*Ford doplatit Sollers za uchastie*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 111, p. 7. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/4013478>. Last accessed 11.12.2019.
10. Tudose, S. Ford Set to Exit Passenger Car Market in Russia. [Electronic resource]: <https://www.carscoops.com/2019/03/ford-set-to-exit-passenger-car-market-in-russia/>. Last accessed 11.12.2019.
11. Nikitina, O. Mazda Sollers will go to their own [*Mazda Sollers poedet a svoi*]. *Kommersant*, 2019, Iss. 75, p. 7. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/3955396>. Last accessed 11.12.2019.
12. Makina, S. Car ownership will become a thing of the past [*Vladienie avtomobilem uidet v proshloe*]. *Computerra*, June 10, 2019. [Electronic resources]: <https://www.computerra.ru/238438/vladienie-avtomobilem-uidet-v-proshloe/>, <https://theconversation.com/car-ownership-is-likely-to-become-a-thing-of-the-past-and-so-could-public-transport-110550>. Last accessed 11.12.2019.
13. van den Berg, G., Pijtersma, P. Key Management Models. 3rd ed., The 75+ Models Every Manager Needs to Know, Pearson, London, 2014, 344 p. [Electronic resource]: <https://b-ok.cc/dl/5442842/ddfl2b>. Last accessed 11.12.2019.
14. Krantz, M. Building the Internet of Things: Implement New Business Models, Disrupt Competitors, Transform Your Industry. John Wiley & Sons, 2017, 336 p. [Electronic resource]: <https://ua.b-ok.cc/dl/2830370/e57243/>. Last accessed 11.12.2019.
15. Butov, A. V. The fourth industrial revolution and its impact on development of the world economy [*Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya i ee vliyaniye na razvitiye mirovoi ekonomiki*]. Collection: Problems and prospects for development of industry in Russia. Moscow, Rusayns publ., 2019, pp. 174–179. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39453169/>. Last accessed 11.12.2019.
16. Grammatchikov, A. Subscription to leave [*Podpiska o vyezde*]. *Auto. Commercial transport*, 2019, Iss. 158, p. 3. [Electronic resource]: <https://www.kommersant.ru/doc/4079826>. Last accessed 11.12.2019.





Зарубежные подходы к проведению аудита эффективности транспортной системы на региональном уровне



Солдатенко Игорь Александрович — Контрольно-счётная палата, Москва, Россия.

Игорь СОЛДАТЕНКО

Статья посвящена рассмотрению зарубежных инструментов проведения аудита эффективности в транспортной сфере и оценке возможности применения методов и процедур аудита эффективности российскими региональными контрольно-счётными органами. Цель исследования состоит в комплексном анализе международного опыта регламентации и осуществления аудита эффективности в транспортной сфере на примере практик Генерального аудитора Шотландии (Великобритания) и Генерального аудитора Манитобы (Канада).

Учитывая традиционно высокую долю расходов региональных бюджетов на развитие транспортной системы, отмечено, что оценка экономности, продуктивности и результативности использования публичных ресурсов важна не только для власти регио-

нов, но и для населения и хозяйствующих субъектов.

По итогам анализа «лучших практик» региональных органов государственного аудита Великобритании и Канады в части проведения аудитов эффективности в транспортной сфере зафиксированы передовые методы и аудиторские процедуры, возможные для применения российскими региональными контрольно-счётными органами. В частности, отмечены конкретика и точность рекомендаций органам исполнительной власти, представленных в аудиторском отчёте; проведение оценки корректности тендерных процедур и эффективности исполнения контрактов в рамках аудита эффективности; широкое использование внешних экспертов при проведении проверок и другие.

Ключевые слова: государственные расходы, транспортная сфера, аудит эффективности транспортной системы, органы аудита Шотландии и Манитобы, рекомендации по итогам аудита эффективности.

*Информация об авторе:

Солдатенко Игорь Александрович – Старший государственный инспектор инспекции № 1 Контрольно-счётной палаты г. Москвы, Москва, Россия, igor.soldatenko.94@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 09.10.2020, принята к публикации 26.12.2020.

For the English text of the article please see p. 196.

Являясь институтами надзора за легитимным и эффективным использованием централизованных фондов денежных средств, высшие и региональные органы внешнего государственного финансового контроля (государственного аудита) в ряде стран наделены особым статусом и широкими полномочиями, подкреплёнными высокой степенью ответственности перед гражданами. Иначе говоря, место и роль государственного аудита предопределены потребностями общества в нём. В таком контексте кратно возрастает актуальность изучения многолетней зарубежной практики осуществления государственного аудита, в том числе на региональном уровне.

Вопросы, связанные с международной практикой регламентации и осуществления внешнего государственного финансового контроля, подробно рассмотрены в ряде научных работ [1–7]. Между тем предметная область большинства исследований — результаты деятельности высших органов аудита, тогда как региональные органы аудита (особенно зарубежные) зачастую «остаются в тени».

С учётом вышесказанного основной целью исследования является изучение и анализ международных стандартов осуществления аудита эффективности использования государственных средств в транспортной сфере и соответствующих практик организации системы внешнего государственного финансового контроля на региональном уровне в ряде стран (Великобритания и Канада), в разрезе возможностей заимствования передовых инструментов российскими контрольно-счётными органами (КСО).

Помимо изучения разнообразных источников информации, включая зарубежные, в рамках исследования использовались *методы* сравнения, анализа и синтеза, индукции и дедукции, статистические методы.

РОССИЙСКИЕ РЕАЛИИ И АКТУАЛЬНОСТЬ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Начиная с 1994 года, в России формировалась система субфедеральных контрольно-счётных органов (далее — КСО), первым из которых стала Контрольно-

счётная палата Московской городской думы, преобразованная 1 ноября 1995 года в Контрольно-счётную палату Москвы (далее — КСП Москвы). Через некоторое время КСО появились и в других субъектах России. В числе первых в 1995 году были учреждены Контрольно-счётная палата Воронежской области, Счётная палата Владимирской области, Контрольно-счётная палата Санкт-Петербурга (далее — КСП Санкт-Петербурга) и другие.

Благодаря 25-летнему опыту осуществления внешнего государственного финансового контроля на уровне субъекта Российской Федерации, сформирован комплекс нормативных правовых актов, регламентирующих осуществление государственного аудита и, в частности, аудита эффективности, налажен обмен знаниями между КСО и заимствование лучших методик и практик, однако некоторые системные проблемы не решены до сих пор.

В международных стандартах аудит эффективности рассматривается как независимая проверка деятельности органов исполнительной власти, государственных организаций, выполнения программ в целях определения экономичности, продуктивности и результативности использования ресурсов [8, с. 110].

Несмотря на наличие международных стандартов ИНТОСАИ, Федерального закона от 07.02.2011 г. № 6-ФЗ «Об общих принципах организации и деятельности контрольно-счётных органов субъектов Российской Федерации и муниципальных образований», соответствующих законов субъектов РФ и локальных стандартов, организацию и проведение государственного аудита в ряде регионов нельзя назвать совершенными: значительные проблемы наблюдаются в части осуществления аудитов эффективности использования государственных средств. В разрезе основных причин такого положения выделяются следующие:

- недостаток материальных и трудовых ресурсов КСО для проведения аудита эффективности на должном уровне;
- смешение финансового аудита и аудита эффективности;
- устоявшаяся практика проведения аудитов эффективности без опоры на международные и локальные стандарты;



Краткая характеристика некоторых региональных органов аудита

Наименование органа государственного аудита	Год образования	Наименование должности руководителя	Количество сотрудников	Проведение аудитов эффективности
КСП Москвы (Россия)	1994	Председатель КСП Москвы	188	да
КСП Санкт-Петербурга (Россия)	1995	Председатель КСП Санкт-Петербурга	115	да
Audit Scotland (Великобритания)	2000	Chair of Audit Scotland Board	≈270	да
Wales Audit Office (Великобритания)	2005	Auditor General for Wales	≈240	да
City of Vienna Court of Audit (Австрия)	1920	Director of the City of Vienna Court of Audit	84	да
Bavarian Supreme Audit Office (Германия)	1812	President of the Bavarian Supreme Audit Office	≈130	да
Office of the Auditor General Manitoba (Канада)	1933	Auditor General	≈55	да

Источник: сформировано автором на основе данных официальных сайтов ряда российских и зарубежных органов государственного аудита¹.

• проблемный выбор критериев и показателей эффективности, игнорирование их в ходе контрольного мероприятия;

• недостаток современных методов осуществления аудита эффективности — оперирования «большими данными», сравнения проверяемого объекта с «лучшими органами/организациями», проведения интервью, опросов;

• стремление провести аудит эффективности «малыми силами», без должной доказательной базы по каждому из критериев оценки эффективности;

• недостаточная изученность международного опыта осуществления аудита эффективности, невысокая степень заимствования лучших зарубежных практик.

Кроме того, в России, в отличие от зарубежного опыта осуществления аудита эффективности, упор при проверке делается на законность и полноту расходования

средств государственного бюджета [9, с. 202]. В связи с этим невозможно переоценить значимость сотрудничества с зарубежными органами аудита, в том числе в целях совершенствования методологии аудита эффективности. Одной из форм такой кооперации является членство в Европейской организации региональных органов внешнего государственного финансового контроля (далее — ЕВРОРАИ), учреждённой 1 октября 1992 года в городе Манчестере и обеспечивающей обмен опытом и рациональное осуществление государственного аудита.

В соответствии со ст. 3 Устава ЕВРОРАИ любой региональный орган государственного аудита может стать членом ЕВРОРАИ при условии принятия Устава и утверждения Генеральной Ассамблеей во время регулярного заседания. По данным официального сайта ЕВРОРАИ на август 2020 года членами организации являлись более 90 учреждений из 16 стран (15 европейских государств и Бразилия). При этом наибольшее количество региональных (муниципальных) органов аудита представлено от России (17), Германии (13), Франции (13), Испании (12).

Безусловно, региональные органы аудита обладают отличительными чертами не только в связи с наличием на определённых территориях эксклюзивных управленческих механизмов и практик взаимодействия с исполнительной властью, но и в силу различного возраста учреждений, коли-

¹ Официальный сайт КСП Москвы. [Электронный ресурс]: <http://www.ksp.mos.ru>. Доступ 28.09.2020; Официальный сайт КСП Санкт-Петербурга. [Электронный ресурс]: <http://www.ksp.org.ru>. Доступ 28.09.2020; Официальный сайт Audit Scotland. [Электронный ресурс]: <http://www.audit-scotland.gov.uk>. Доступ 28.09.2020; Официальный сайт Wales Audit Office. [Электронный ресурс]: <http://www.wao.gov.uk>. Доступ 28.09.2020; Официальный сайт City of Vienna Court of Audit. [Электронный ресурс]: <http://www.stadtrechnungshof.wien.at>. Доступ 28.09.2020; Официальный сайт Bavarian Supreme Audit Office. [Электронный ресурс]: <http://www.orh.bayern.de>. Доступ 28.09.2020; Официальный сайт Office of the Auditor General Manitoba. [Электронный ресурс]: <http://www.oag.mb.ca>. Доступ 28.09.2020.

чества и квалификации штатных сотрудников (табл. 1).

Мировой опыт доказывает, что использование аудита эффективности как самостоятельного вида контроля улучшает сам процесс управления государственными ресурсами за счёт предоставления полной, достоверной и объективной информации об эффективности функционирования организаций-пользователей бюджетными средствами [10, с. 71].

Учитывая практическую значимость исследования зарубежных подходов к проведению аудита эффективности, нельзя не отметить ключевые (с позиций определения эффективности) сферы использования бюджетных средств, среди которых здравоохранение, образование, военная сфера (безопасность) и другие. В то же время особое место занимают государственные расходы на развитие транспортной системы, ведь от эффективности функционирования транспорта в значительной степени зависят не только показатели национальной (региональной) экономики, но и жизнь граждан.

Общемировые тренды на повышение эффективности инвестиций в транспортную сферу, разработку инновационных продуктов, цифровизацию и информатизацию, укрепление экономической безопасности не могли не затронуть российскую экономику, а степень их влияния подробно описана в ряде научных исследований [11–14].

Потребность со стороны общества и бизнеса в комплексной оценке экономности, продуктивности и результативности использования региональных публичных ресурсов на развитие транспортной сферы обусловлена объективными социально-экономическими факторами и тенденциями.

Во-первых, государственные расходы, приходящиеся на развитие транспортной системы, колоссальны, а реализуемые транспортные проекты повсеместно востребованы. Так, бюджетом города Москвы в 2019 году в целях совершенствования транспортной сферы профинансированы мероприятия на общую сумму 661,8 млрд руб. (26,6 % от бюджетных расходов), что больше совокупной величины затрат на образование и здравоохранение; бюджетом

города Санкт-Петербурга – на общую сумму 114,5 млрд руб. (17,6 % от бюджетных расходов). Помимо субфедеральных централизованных фондов развитие транспортной системы финансируется за счёт федерального бюджета, а также с участием частных инвесторов. При этом пример российских мегаполисов не является нетрадиционным. Очевидно, с ростом населения крупных городов, часто обусловленным региональной экономической дифференциацией, вызывающей внутреннюю (международную) миграцию, потребность в осуществлении инфраструктурных проектов в транспортной отрасли будет только возрастать.

Во-вторых, государство через нормативные правовые акты влияет на экономическое поведение всех участников производства и потребления транспортных услуг. В частности, в условиях новой конфигурации рынка и несбалансированности интересов его участников законодательные изменения должны мотивировать всех участников рынка к повышению эффективности работы железнодорожного транспорта и сокращению транспортных затрат в экономике в целом [15, с. 75].

В-третьих, немалая часть располагаемых ресурсов домохозяйств тратится на услуги в транспортной сфере. Если посмотреть на распределение расходов по децильным группам населения России, прослеживается следующий тренд – с ростом располагаемых доходовкратно возрастает доля расходов на транспорт. Например, в первой децильной группе в среднем расходы на транспорт составляли 1,3 %, в пятой группе – 4,8 %, в девятой – 11,5 % (данные за I квартал 2020 года) [16]. Подобная тенденция свойственна и европейским странам: в Германии в 2015 году население первого квинтиля расходовало 7,3 % располагаемых средств на транспорт, пятого квинтиля – 16,4 %; в Великобритании – 8,3 и 18,6 % соответственно; в Швеции – 8,9 и 15,1 % соответственно [17, с. 12]. В связи с этим полагаем, что с ростом реальных доходов населения в будущем будут увеличиваться расходы на продукты и услуги транспортного сектора как в абсолютном, так и в относительном выражении.

Таким образом, рост расходов населения на транспорт, укрупнение мегаполисов



и увеличение ёмкости государственных транспортных программ, заинтересованность в развитии транспортной инфраструктуры и снижении транспортных издержек (через повышение конкуренции) со стороны бизнеса обеспечивают высокий потенциальный спрос в отношении результатов деятельности органов государственного аудита через оценку эффективности использования публичных ресурсов в транспортной системе.

Иными словами, общее правило свойственно и транспортной сфере: когда ресурсы ограничены, необходимо решать государственные задачи с наименьшими расходами при достижении определённых целей (экономичность) либо достигать лучшего результата при фиксированном объёме финансирования (результативность) [18, с. 367].

В настоящее время в развитых странах органы финансового контроля широко используют аудит эффективности бюджетных расходов. В ряде государств доля аудита достигает 50–60 % в совокупном объёме проверок высших органов финансового контроля [19, с. 72]. При этом Контрольно-счётной палатой Москвы, например, в 2016 году проведено девять аудитов эффективности (4,3 % от общего количества контрольных мероприятий), в 2017 году — шесть аудитов эффективности (2,8 %), в 2018 году — шесть аудитов эффективности (2,6 %). Вместе с тем доля неэффективных расходов в общем объёме нарушений в денежном выражении составила 87,5 % в 2016 году, 70,2 % в 2017 году и 86,3 % в 2018 году. Статистика свидетельствует о высоком объёме неэффективных затрат бюджета при относительно небольшом количестве аудитов эффективности, что подчёркивает крайнюю значимость последних.

В то же время следует подчеркнуть, что аудит эффективности — контрольное мероприятие, нацеленное на определение экономности, продуктивности и результативности использования государственных ресурсов через установление критериев и показателей эффективности, поиск доказательств по каждому из критериев и проводимое с большим количеством трудовых затрат, с использованием информационных систем, больших данных, ма-

тематических методов, с проведением опросов и интервью. В связи с этим количество и качество проводимых российскими КСО аудитов эффективности зависит от ряда факторов:

- существование экономических, политических, социальных, экологических и других региональных особенностей;
- существование национальных норм (стандартов) и традиций осуществления аудита эффективности;
- различные структуры бюджета и объём проверяемых средств;
- различная штатная численность региональных органов государственного аудита;
- уникальность региональных систем управления, наличие устоявшихся практик взаимодействия КСО с исполнительной властью.

АУДИТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ СФЕРЫ В ШОТЛАНДИИ

В части методики и практики проведения аудита эффективности в транспортной сфере значительного внимания заслуживают британские региональные контрольные органы, что объясняется наличием передовых транспортных технологий, особенно в крупных городах, и высокими требованиями общества к транспортной системе.

Аудит эффективности в Великобритании направлен на сбор доказательств, позволяющих сделать вывод о соответствии затраченных средств и полученных результатов. Таким образом, Национальное управление аудита Великобритании при проведении аудита эффективности ориентируется исключительно на конечные результаты [20, с. 96].

Структурно региональные органы аудита в Великобритании имеют немало особенностей. В частности, Аудит Шотландии (Audit Scotland) включает Генерального аудитора Шотландии (Auditor General for Scotland) и Счётную комиссию (Accounts Commission). При этом Генеральный аудитор Шотландии отвечает за аудит всех государственных органов (кроме местных), среди которых правительство и правительственные учреждения Шотландии, полиция, пожарные службы, колледжи и другие.

Результатом деятельности является отчёт перед парламентским Комитетом по государственному аудиту и законодательному надзору. В свою очередь, Счётная комиссия является внешним контролёром государственных расходов местного самоуправления, способствующим принятию (корректировке) управленческих решений местных советов. Контролёр аудита (Controllor of Audit) отчитывается перед Счётной комиссией по вопросам, представляющим общественный интерес для местных органов власти, и выделяет проблемные области.

От имени Генерального аудитора Шотландии и Счётной комиссии ежегодно проводится около 15 аудитов эффективности, отчёты по результатам которых должны быть точными и актуальными. Для этих целей большинство аудитов эффективности реализуется с участием групп консультантов, приезжающих из-за пределов Шотландии. Чаще всего такие группы включают от шести до десяти членов, обладающих специальными знаниями в проверяемой сфере.

Из совокупности аудитов эффективности транспортной сферы, проведённых Генеральным аудитором Шотландии, выделен для рассмотрения аудит эффективности «Транспортные паромные перевозки Шотландии» (октябрь 2017 года) [21].

Отчёт по результатам аудита эффективности «Транспортные паромные перевозки Шотландии» содержит резюме (статистические сведения, рекомендации, сведения о предмете аудита в сжатом виде), четыре основные части (паромные перевозки в Шотландии, расходы и результативность, закупки, долгосрочное планирование), приложения.

Исходя из данных отчёта, проверяемая сфера характеризуется следующими статистическими сведениями (на момент формирования отчёта):

- в Шотландии функционирует 66 регулярных паромных маршрутов, управляемых государственными и коммерческими операторами;
- в 2016–2017 гг. потрачено 209,7 млн фунтов стерлингов государственных средств на паромные перевозки и активы, такие как суда и гавани;
- существует три основных паромных контракта, по которым субсидируются 32

паромных маршрута для ежегодной перевозки более 5 млн человек;

- за десять лет, начиная с 2007 года, расходы на паромное сообщение возросли на 115,0 % в реальном выражении; количество пассажиров увеличилось на 0,3 %, количество автомобилей — на 16,8 %;

- около 99 % паромных рейсов были выполнены вовремя и без задержек.

С учётом ограниченных бюджетных расходов на финансирование отмечен риск несоответствия спросу качества и объёма оказываемых в пределах выделенного бюджета услуг паромных перевозок.

Кроме того, Генеральным аудитором Шотландии проводится анализ закупочной деятельности с выделением проблем и недостатков. К примеру, в ходе осуществления процедуры определения оператора паромной линии в формате тендера, в котором участвовали две компании, информация по вопросам, связанным с предметом закупки, была запрошена более 800 раз, при этом имели место задержки в предоставлении компаниям важных сведений.

По итогам тендера победила заявка, цена которой составила 868 млн фунтов стерлингов, что было на 128 млн ниже, чем предполагалось Управлением транспорта Шотландии. При этом 350 обязательств, содержащихся в контракте, не были оценены в денежной форме, в результате чего после обновления контракта его стоимость увеличилась до 975 млн фунтов стерлингов.

Указанные проблемы и тенденции, выявленные в процессе аудита эффективности, нашли отражение в рекомендациях по его итогам.

Так, Управлению транспорта Шотландии рекомендовано:

1. Разработать долгосрочную стратегию в масштабах всей Шотландии для сети субсидируемых паромов с учётом:

- прогресса, нашедшего отражение в Плане паромных переправ;
- фиксации предполагаемых выгод от субсидируемых паромных перевозок, их вклада в достижение национальных результатов и способов его измерения, мониторинга;
- включения оценки долгосрочной доступности затрат на услуги и активы (с учётом бюджетной стратегии);



- распределения расходов по приоритетам внутри паромной сети;
- регулярного мониторинга разработанной стратегии в части своевременности бюджетного обеспечения, актуальности показателей и доступности услуг.

2. Убедиться, что Управление транспорта Шотландии располагает соответствующими ресурсами для разработки стратегии, её мониторинга и формирования отчётности по достижению целей стратегии.

3. Повысить прозрачность паромных услуг и создать возможность оценки качества услуг пользователями (укрепить социальную отдачу).

4. Улучшить механизм государственных закупок услуг по осуществлению паромных перевозок с учётом:

- формирования закупочных комиссий сотрудниками с квалификацией в сфере закупок и опытом работы в паромном секторе;
- увеличения времени на подготовку проектной документации;
- обеспечения точности, актуальности и прозрачности спецификации контрактов для потенциальных участников торгов;
- предоставления участникам торгов чёткой, качественной и своевременной информации.

Кроме этого, Управлению транспорта Шотландии совместно с паромными операторами рекомендовано продуктивнее взаимодействовать в рамках реализации своих функций и обязанностей.

Следует отметить, что в Великобритании особое внимание уделяется разработке стратегических документов в сфере транспорта, направленных на инвестиции в инновации. В частности, принята и реализуется техническая стратегия железнодорожного транспорта [22, с. 80]. При этом обоснованность разработки и ход реализации стратегий часто выступают предметом аудита эффективности.

АУДИТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОВИНЦИИ МАНИТОБА (КАНАДА)

В части регламентации и осуществления аудита эффективности использования государственных ресурсов в транспортной системе нельзя не отметить региональные

органы внешнего государственного финансового контроля Канады.

Одним из наиболее прозрачных с позиции размещения информации в открытых источниках представляется Управление Генерального аудитора Манитобы. Генеральный аудитор, назначаемый на десятилетний срок Законодательным собранием Манитобы, при содействии 55 штатных сотрудников Управления осуществляет государственный аудит в виде финансового аудита и «аудита проекта», подразделяющегося на аудит эффективности, специальный аудит (расследования) и аудит информационных технологий (IT-аудит).

Практикой деятельности Генерального аудитора Манитобы аудит эффективности закреплён как систематическая оценка результативности управления государственным органом или программой с учётом располагаемых полномочий и ресурсов. Посредством осуществления аудита эффективности исследуются инструменты государственного управления и внутреннего контроля, система отчётности в областях, имеющих стратегическое значение, с целью предоставления Законодательному собранию независимой и объективной информации о деятельности органов исполнительной власти.

В Манитобе аудит эффективности как процесс состоит из четырёх этапов, включая фазу планирования, фазу обследования, фазу отчётности и контроль состояния рекомендаций (рис. 1).

Во многом российские стандарты аудита эффективности предусматривают ту же последовательность действий, что и канадские. При этом в Канаде акцентируется внимание на некоторых значимых, на наш взгляд, процедурах.

Во-первых, разработка целей и критериев оценки эффективности осуществляется на этапе планирования. Ввиду того, что по каждому из критериев производится сбор аудиторских доказательств, важность разработки критериев сложно переоценить. При этом российскими КСО критерии часто дорабатываются в ходе основного этапа (фаза обследования), что затягивает процесс аудита и нивелирует результаты этапа планирования.

Во-вторых, особые методы и процедуры аудита эффективности, повсеместно ис-

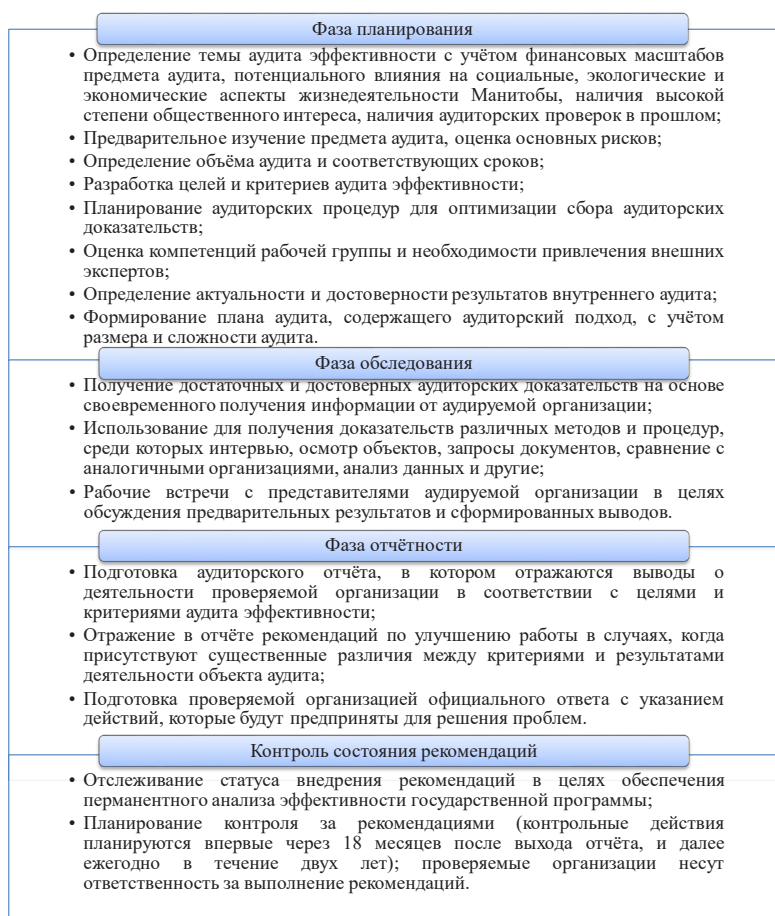


Рис. 1. Этапы (фазы) проведения аудита эффективности Генеральным аудитором Манитобы. Источник: Официальный сайт Управления Генерального аудитора Манитобы. [Электронный ресурс]: <https://www.oag.mb.ca>. Доступ 21.09.2020.

пользуемые канадскими органами государственного аудита, в России с учётом отсутствия закрепления их в стандартах не всегда используются, что на практике предопределяет смешение финансового аудита и аудита эффективности.

В-третьих, чётко установленные сроки осуществления контроля за рекомендациями способствуют стабильному внедрению этих рекомендаций и повышению ответственности объектов аудита.

Основным мерилом качества проведённого аудита эффективности является содержание отчёта о его результатах. Для оценки структуры отчёта и результатов аудита эффективности в транспортной сфере рассмотрен отчёт по итогам аудита эффективности «Безопасность коммерческого транспорта» (декабрь 2019 года) [23].

Отчёт по итогам аудита эффективности «Безопасность коммерческого транспорта» включил в себя несколько разделов, свойственных для основной массы

аудитов, проведённых Генеральным аудитором Манитобы: комментарий Генерального аудитора (введение), ключевые аспекты отчёта в схематичном виде, основные положения (подробное раскрытие ключевых моментов отчёта), ответ от проверяемой организации, справочная информация, сведения о цели, объёме и методах аудита эффективности, выводы и рекомендации (основной и наиболее объёмный раздел).

Согласно комментарию Генерального аудитора Манитобы, на момент контрольного мероприятия существовал ряд проблем в сфере безопасности коммерческого транспорта:

- грузовые автомобили массой более 4500 кг представляли риски безопасности;
- в результате дорожных происшествий 11 человек погибли, 533 человека получили травмы;
- Департаментом инфраструктуры выдано 7500 сертификатов соответствия



Цели и критерии аудита эффективности «Безопасность коммерческого транспорта»

Цель	Критерии
Оценить адекватность программы обеспечения безопасности автотранспортных средств	• Все автотранспортные компании, которым требуются сертификаты безопасности, должны их получить. • Сертификаты соответствия требованиям безопасности (как первоначальные, так и продлеваемые) должны выдаваться только перевозчикам, которые соблюдают установленные требования безопасности. • Рейтинги безопасности должны быть логически определены и должным образом подтверждены. • Проверки грузового транспорта должны эффективно способствовать повышению безопасности перевозчиков.
Оценить систему проведения дорожного техосмотра коммерческого транспорта	• Должны быть внедрены стандарты и политика для эффективного руководства проверками транспортных средств с учётом основных рисков. • Результаты работы инспекторов должны контролироваться, а недостатки деятельности инспекций устраняться.
Определить адекватность планирования и управления эффективностью	• Стратегические планы и соответствующие цели должны быть разработаны на основе достаточной и актуальной информации. • Стратегическое планирование должно выявлять и учитывать риски, а также значимые показатели эффективности. • Департамент инфраструктуры должен сообщать о ключевых аспектах безопасности коммерческого транспорта.

Источник: Independent Audit Report «Department of Infrastructure: Oversight of Commercial Vehicle Safety». [Электронный ресурс]: <https://www.oag.mb.ca/audit-reports/report/commercial-vehicle-safety/>. Доступ 30.09.2020.

требованиям безопасности, позволяющих эксплуатировать 45000 коммерческих автомобилей, однако по итогам аудита установлено, что Департамент должен тщательнее проверять получателей сертификатов.

Следуя цели аудита эффективности, Генеральным аудитором Манитобы была исследована система надзора со стороны Департамента инфраструктуры за безопасностью грузовых автомобилей, что затронуло процессы, связанные с:

- программой обеспечения безопасности автотранспортных средств;
- проведением дорожного техосмотра коммерческого транспорта;
- стратегическим планированием и управлением эффективностью.

В соответствии с внутренними стандартами Управления Генерального аудитора Манитобы для получения аудиторских доказательств по каждой из целей установлены критерии оценки эффективности (табл. 2).

Как видно из данных табл. 2, по каждой из целей разработаны 2–4 критерия. Сбор аудиторских доказательств по каждому из критериев позволил сформировать ключевые выводы по итогам аудита эффективности: программа безопасности Департамента инфраструктуры недостаточна для проверки безопасности; присутствуют «пробелы» в управлении дорожными инспекциями; система планирования недос-

точна, механизмы измерения эффективности неадекватны.

Следует отметить, что при условии наличия критериев эффективности отсутствует система показателей эффективности. Указанное объясняется установкой качественных, а не количественных критериев оценки эффективности.

Рекомендации по итогам аудита эффективности были разделены на три большие группы в соответствии с установленными целями. На рис 2 представлено в обобщенном виде содержание некоторых рекомендаций.

В результате рассмотрения рекомендаций Генерального аудитора Манитобы Департамент инфраструктуры согласился с ними и дал комментарий по практическому внедрению рекомендаций, что отражено в отчёте.

В частности, Департамент инфраструктуры предусмотрел возможность внедрения проверки знаний для новых операторов коммерческих транспортных средств и со-ответствия всех держателей сертификатов требованиям безопасности. Кроме того, для осуществления мониторинга коммерческих автомобилей в Манитобе Департамент планирует совершенствовать систему информационных технологий.

Для улучшения планирования Департамент исследует возможности более эффектив-

Программа обеспечения безопасности автомобильных транспортных средств (10 рекомендаций)	Управление дорожными инспекциями (6 рекомендаций)	Стратегическое планирование и управление эффективностью (1 рекомендация)
• Оценка безопасности должна быть более строгой и логичной. • Необходимо внедрение и гармонизация передовых методов, применяемых в других юрисдикциях (Канады, а также США).	• Необходимо избавиться от предсказуемости графика работы дорожных инспекций (весовых станций) и мобильных патрулей. • Необходим расширенный мониторинг работы офицеров дорожных инспекций и результатов их проверок. • Требуется отслеживание ремонтных процедур в отношении транспортных средств, неисправности которых выявлены, но не устранены в ходе дорожного контроля.	Департаменту следует разработать и внедрить план, который: • будет включать определение мер по преодолению выявленных рисков; • установит показатели эффективности деятельности Департамента.

Рис. 2. Обобщённое содержание некоторых рекомендаций Генерального аудитора Манитобы по результатам аудита эффективности «Безопасность коммерческого транспорта». Источник: Independent Audit Report «Department of Infrastructure: Oversight of Commercial Vehicle Safety». [Электронный ресурс]: <https://www.oag.mb.ca/audit-reports/report/commercial-vehicle-safety/>. Доступ 30.09.2020.

ного использования данных и обмена информацией в дальнейшем, учитывая существующие отношения с другими ведомствами, играющими общую роль в обеспечении безопасности коммерческих автомобилей.

ВЫВОДЫ

1. Учитывая «молодость» теории и практики аудита эффективности в России, особую актуальность приобретает изучение международного опыта проведения аудита эффективности, осуществляемого в ряде стран с середины XX века. Высокая развитость региональных транспортных систем Великобритании и Канады в совокупности с передовыми методами проведения аудитов эффективности обуславливают не только важность, но и необходимость исследования и заимствования «лучших практик» этих государств.

2. Аудит эффективности использования государственных средств в Шотландии обладает рядом особенностей по сравнению с российскими механизмами осуществления внешнего государственного финансового контроля:

- аудит Шотландии включает деятельность Генерального аудитора Шотландии, отвечающего за аудит всех государственных органов (кроме местных), и Счётной Комиссии, являющейся внешним контролёром расходов муниципалитетов;

- большинство аудитов эффективности реализуется с участием групп консультантов, включающих 6–10 членов, приезжающих из-за пределов Шотландии.

В части аудита эффективности транспортной сферы на основе отчёта по результатам аудита эффективности «Транспортные паромные перевозки Шотландии» отмечаются следующие особенности:

- отчёт построен на всестороннем анализе статистических сведений, внутри которого осуществляется поиск решений существующих проблем;

- помимо оценки эффективности работы паромных переправ проанализирована система осуществления закупок для снабжения паромной сети;

- рекомендации занимают основную часть отчёта и содержат конкретные мероприятия, необходимые для реализации



проверяемой организацией — Управлением транспорта Шотландии;

- особое внимание в рекомендациях уделено разработке долгосрочной стратегии для сети субсидируемых паромов, созданию возможности оценки качества услуг пользователями, улучшению механизма государственных закупок паромов и паромных услуг.

3. Генеральный аудитор Манитобы (Канада), в свою очередь, осуществляет финансовый аудит и «аудит проекта», включающий аудит эффективности, специальный аудит (расследования) и аудит информационных технологий (ИТ-аудит). Между тем методология проведения аудита эффективности во многом схожа с российской (за редкими, но важными исключениями). Данное явление объясняется заимствованием российскими КСО у канадских органов государственного аудита передовых методик и практик осуществления аудита эффективности.

Как и в Шотландии, Генеральным аудитором Манитобы особое внимание уделяется документам стратегического планирования. При этом в отчёте по итогам аудита эффективности «Безопасность коммерческого транспорта» приведены исключительно качественные (не количественные) критерии оценки эффективности.

В Канаде крайне важны не только непосредственные результаты аудита эффективности, но и конкретные (точные) рекомендации органам исполнительной власти по совершенствованию деятельности. В частности, Департаменту инфраструктуры Манитобы рекомендовано:

- внедрять передовые методы и процедуры оценки знаний водителей в части безопасности, применяемые в других юрисдикциях;
- избавиться от предсказуемости графика работы дорожных инспекций (весовых станций) и мобильных патрулей;
- разработать показатели эффективности деятельности Департамента инфраструктуры;
- изучить риски и необходимость координации с другими учреждениями.

4. Следует отметить, что исследование международного опыта осуществления аудита эффективности транспортной сферы должно иметь важный прикладной

эффект с точки зрения возможности внедрения лучших практик в деятельность региональных КСО России, особенно в функционирование КСП Москвы и КСП Санкт-Петербурга как органов, имеющих значительный потенциал, обширные трудовые и материальные ресурсы. Здесь целесообразно выделить, на наш взгляд, неотъемлемые основы проведения аудита эффективности транспортной системы, получившие широкое признание за рубежом, но находящиеся всё ещё в зачаточном состоянии в ряде субъектов РФ.

Во-первых, направленность на решение проблем управления региональными публичными ресурсами в целях формирования конкретных и точных рекомендаций органам исполнительной власти, отвечающим за использование средств на развитие транспортной системы. Между тем рекомендации включают, прежде всего, готовые решения, как то: необходимость принятия стратегических документов, внедрения передовых методик соседних юрисдикций и другие.

Во-вторых, аудит эффективности напрямую связан с оценкой экономности, продуктивности и результативности бюджетных расходов, что само собой подразумевает необходимость оценки корректности тендерных процедур и эффективности исполнения контрактов. Представляется разумным включение зарубежными контрольными органами мероприятий аудита в сфере закупок товаров, работ и услуг (далее — аудит закупок) в программу аудита эффективности, тогда как в России аудит закупок зачастую выделяется как отдельный вид контрольной или экспертно-аналитической деятельности.

В-третьих, осуществление аудита эффективности транспортной системы всегда сопровождается большими трудозатратами в связи с традиционно большой долей бюджетных расходов на транспорт, что обуславливает важность, а часто, необходимость привлечения внешних экспертов для качественного проведения контрольного мероприятия. Однако российские региональные КСО не всегда используют такую возможность — часто из-за нехватки ресурсов для привлечения.

Кроме этого, особого внимания заслуживает презентабельность и простота

рассмотренных отчётов по результатам аудитов эффективности, содержание в них критериев оценки эффективности. Документы, написанные простым и логичным языком с выделением проблем транспортной сферы, представляют потенциал не только для заинтересованных сторон, но и для рядовых граждан, предпринимателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саунин А. Н., Черняева З. А. Нормативное регулирование аудита эффективности: общее и особенности в зарубежных высших органах аудита // Финансовое право. — 2015. — № 10. — С. 12–17. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24283363>. Доступ 29.09.2020.
2. Синягин А., Дубинина И. Аудит эффективности: международный опыт и российские реалии // Бюджет. — 2008. — № 9. [Электронный ресурс]: <http://bujet.ru/article/46056.php>. Доступ 29.09.2020.
3. Шамшаев С. В., Шклярова П. П. Аудит эффективности расходования бюджетных средств как зарубежный опыт государственного финансового контроля // Актуальные вопросы учёта, анализа и аудита в социальной сфере. — 2013. — С. 364–369. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23895575>. Доступ 29.09.2020.
4. Шкодинский С. В., Кондрагьева Е. А. Сотрудничество между высшим органом внешнего государственного аудита (контроля) и службами внутреннего аудита государственных органов в целях повышения эффективности внешнего государственного аудита (контроля): основы и зарубежный опыт // Государственный аудит. Право. Экономика. — 2016. — № 4. — С. 35–41. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28199743>. Доступ 29.09.2020.
5. Boyne, G. External Regulation and Best Value in Local Government. *Public money & Management*, 2000, No. 3, pp. 7–12 [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=6391020>. Доступ 29.09.2020.
6. Pollitt, C. Performance audit in Western Europe: trends and choices. *Critical perspectives on accounting*, 2003, No. 1–2, pp. 157–170. DOI: 10.1006/sracs.2002.0521. Доступ 29.09.2020.
7. Yan, J. Performance audit in the service of internal audit. *Managerial Auditing Journal*, 1997, No. 4–5, pp. 192–195. DOI: 10.1108/02686909710173867. Доступ 29.09.2020.
8. Саунин А. Н. Аудит эффективности: международные стандарты проведения // Вестник АККОР. — 2012. — № 1 (20). — С. 109–117. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17730090>. Доступ 29.09.2020.
9. Ваганова О. Е. Аудит эффективности: тенденции развития в зарубежной и отечественной экономике // Известия Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. — 2015. — № 4 (22). — С. 200–207. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25498130>. Доступ 29.09.2020.
10. Коваленко С. Н., Трунова Е. А. Аудит эффективности: современные проблемы и пути их решения // Научные ведомости. Серия: Экономика. Информатика. — 2017. — № 2 (251). — С. 68–74. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28925924>. Доступ 29.09.2020.
11. Бубнова Г. В. Новая парадигма управления экономической безопасностью ТЛС // Мир транс-

порта. — 2016. — № 5 (66). — С. 96–101. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29366364>. Доступ 29.09.2020.

12. Бубнова Г. В., Лёвин Б. А. Цифровая логистика — инновационный механизм развития и эффективного функционирования транспортно-логистических систем и комплексов // *International Journal of Open Information Technologies*. — 2017. — № 3. — С. 72–78. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28426696>. Доступ 29.09.2020.

13. Ефимова О. В., Ларькова Н. А. Влияние долговых обязательств на показатели экономической безопасности промышленных предприятий транспорта // Экономика железных дорог. — 2008. — № 11. — С. 56–62. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11679619>. Доступ 29.09.2020.

14. Мачерет Д. А., Кудрявцева А. В. Об оценке эффективности инвестиций в инновационные проекты // Экономика железных дорог. — 2016. — № 12. — С. 21–26. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27434110>. Доступ 29.09.2020.

15. Бубнова Г. В., Подсорин В. А., Никитина М. А. Экономическое обоснование механизма взаимодействия транспортных компаний и потребителей услуг // Транспортное дело России. — 2014. — № 1. — С. 74–77. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21561736>. Доступ 29.09.2020.

16. Официальный сайт Росстата. «Доходы, расходы и потребление домашних хозяйств в 2020 году». [Электронный ресурс]: https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b20_102/Main.htm. Доступ 12.09.2020.

17. Бюллетень о текущих тенденциях мировой экономики. Выпуск № 54 (март 2020 года). [Электронный ресурс]: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/map_2020_web.pdf. Доступ 21.09.2020.

18. Терехина С. А., Солдатенко И. А. Современная бюджетная политика и основные параметры федерального бюджета на 2018 год и на плановый период 2019 и 2020 годов. Связь бюджетной политики с прогнозом-2030 // Финансы и кредит. — 2018. — Т. 24. — № 2. — С. 362–376. DOI: 10.24891/fc.24.2.362. Доступ 29.09.2020.

19. Сафиуллин Т. Р. Зарубежный опыт применения аудита эффективности в государственном финансовом контроле // Тенденции развития науки и образования. — 2018. — № 45 (3). — С. 71–73. DOI: 10.18411/lj-12-2018-70. Доступ 29.09.2020.

20. Богданович И. С., Лукьянова Ю. С. Сравнительная характеристика аудита эффективности использования бюджетных средств в России и за рубежом // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономика. Право. Управление. — 2017. — № 5. — С. 91–100. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30304199>. Доступ 29.09.2020.

21. Audit Report «Transport Scotland's ferry services». [Электронный ресурс]: <https://www.audit-scotland.gov.uk/report/transport-scotland-ferry-services>. Доступ 26.09.2020.

22. Куприяновский В. П., Куренков П. В., Бубнова Г. В., Дунаев О. Н., Синягов С. А., Намиот Д. Е. Экономика инноваций цифровой железной дороги. Опыт Великобритании // *International journal of open information technologies*. — 2017. — № 3. — С. 79–99. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28426697>. Доступ 29.09.2020.

23. Independent Audit Report «Department of Infrastructure: Oversight of Commercial Vehicle Safety». [Электронный ресурс]: <https://www.oag.mb.ca/audit-reports/report/commercial-vehicle-safety/>. Доступ 30.09.2020.





Foreign Approaches to the Audit of Transport System Efficiency at the Regional Level



Soldatenko, Igor A., Chamber of Control and Accounts, Moscow, Russia.*

Igor A. SOLDATENKO

ABSTRACT

The article is devoted to consideration of foreign instruments for performance audit in the transport sector and to assessment of possibility of applying the methods and procedures of performance audit by Russian regional control and accounting bodies. The objective of the study is to comprehensively analyse the international experience of regulation and organisation of performance audit in the transport sector based on the practices of the Auditor General of Scotland (Great Britain) and the Auditor General of Manitoba (Canada).

Considering the traditionally high share of regional budget expenditures spent on development of the transport system, it is noted that assessment of the economy, productivity

and efficiency of the use of public resources is important not only for regional authorities, but also for the population and business entities.

Based on the analysis of the best practices of regional government audit bodies of Great Britain and Canada in terms of performance audits in the transport sector, advanced methods and audit procedures were recorded that can be applied by Russian regional control and accounting bodies. In particular, the specifics and accuracy of recommendations to the executive authorities presented in the audit report; procedure of assessing correctness of tender procedures and effectiveness of contract execution as part of the performance audit; wide use of external experts during inspections and other features have been noted.

Keywords: *public expenditures, transport, transport system performance audit, Scotland and Manitoba audit bodies, performance audit recommendations.*

*Information about the author:

Soldatenko, Igor A. – Senior State Inspector of Inspection No. 1 of the Chamber of Controls and Accounts of Moscow, Moscow, Russia, igor.soldatenko.94@mail.ru

Article received 09.10.2020, accepted 26.12.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 184.

As institutions overseeing the legitimate and effective use of centralized funds, the supreme and regional bodies of external public financial control (state audit) in several countries are endowed with a special status and broad powers, supported by a high degree of responsibility to citizens. In other words, the place and role of government audit is predetermined by the needs of the society. In this context, the relevance of studying the long-term foreign practice of state audit, including at the regional level, multiplies.

Issues related to the international practices of regulation and implementation of external state financial control are discussed in detail in several scientific works [1–7]. Meanwhile, the subject area of most studies refers to the results of activities of supreme audit bodies, while regional audit bodies (especially foreign ones) often «remain in the shadows».

In view of the above, the main *objective* of the research is to study and analyse international standards for auditing effectiveness of the use of public funds in the transport sector and relevant practices of organising a system of external state financial control at the regional level in several countries (Great Britain and Canada), in terms of opportunities for borrowing advanced tools by Russian CAB.

In addition to studying various sources of information, including foreign ones, the study used *methods* of comparison, analysis and synthesis, induction and deduction, and statistical methods.

Russian realities and the relevance of international cooperation

Since 1994, a system of sub-federal control and accounting bodies (hereinafter referred to as CAB or CABs) has been formed in Russia, the first of which was the Control and Accounts Chamber of the Moscow City Duma, transformed on November 1, 1995 into the Chamber of Control and Accounts of Moscow (hereinafter referred to as CCA of Moscow). After a while, CAB appeared in other constituent entities of Russia. Among the first ones, in 1995, the Control and Accounts Chamber of Voronezh region, the Accounts Chamber of Vladimir region, the Control and Accounts Chamber of St. Petersburg (hereinafter referred to as CAC of St. Petersburg) and others were established.

Thanks to twenty-five years of experience in implementation of external state financial

control at the level of a constituent entity of the Russian Federation, a set of regulatory legal acts regulating implementation of state audit and performance audit, knowledge exchange between CABs and adoption of best methods and practices have been developed, but some systemic problems have not yet been resolved.

In international standards, performance audit is considered as an independent examination of the activities of executive authorities, public organisations, program implementation to determine economy, efficiency and effectiveness of resource use [8, p. 110].

Despite the existence of INTOSAI international standards, Federal Law No. 6-FZ dated 07.02.2011 «On the general principles of organisation and activities of control and accounting bodies of the constituent entities of the Russian Federation and municipalities», the relevant laws of the constituent entities of the Russian Federation and local standards, organisation and implementation of state audits in a number of Russian regions cannot be called perfect: significant problems are observed in implementation of audits of effectiveness of the use of public funds. In the context of the main causes for this situation, the following are distinguished:

- lack of material and labour resources of CAB to conduct performance audit at the proper level;
- mixing financial and performance audits;
- long-held practice of conducting performance audits without relying on international and local standards;
- problematic selection of criteria and performance indicators, ignoring them during the control event;
- lack of modern methods of performance audit which are operating big data, comparing the inspected object with the «best bodies/organisations», conducting interviews, polls;
- the desire to conduct a performance audit «with small forces», without a proper evidence base for each of the criteria for evaluating effectiveness;
- insufficient knowledge of international experience in performance audit, low degree of borrowing the best foreign practices.

In addition, in Russia, in contrast to the foreign experience of performance audit, the emphasis in the audit is placed on legality and completeness of spending of the state budget [9, p. 202]. In this regard, it is impossible to



Table 1
Brief description of some regional audit bodies

Name of the governmental audit body	Year of formation	Name of the position of the head	Number of employees	Conducting performance audits
CCA of Moscow (Russia)	1994	Chairman of CCA of Moscow	188	yes
CAC of St. Petersburg (Russia)	1995	Chairman of CAC of St. Petersburg	115	yes
Audit Scotland (Great Britain)	2000	Chair of Audit Scotland Board	≈ 270	yes
Wales Audit Office (Great Britain)	2005	Auditor General for Wales	≈ 240	yes
City of Vienna Court of Audit (Austria)	1920	Director of the City of Vienna Court of Audit	84	yes
Bavarian Supreme Audit Office (Germany)	1812	President of the Bavarian Supreme Audit Office	≈130	yes
Office of the Auditor General Manitoba (Canada)	1933	Auditor General	≈55	yes

Source: compiled by the author based on data of official websites of several Russian and foreign government audit bodies¹.

overestimate the importance of cooperation with foreign audit bodies, including with a view to improving the efficiency audit methodology. One of the forms of such cooperation is membership in the European Organisation of Regional External Public Finance Audit Institutions (hereinafter – EURORAI), established on October 1, 1992 in the city of Manchester and ensuring the exchange of experience and rational implementation of state audit.

In accordance with Art. 3 of the Charter of EURORAI, regional external public finance audit institution can become a member of EURORAI, subject to the acceptance of the Charter and approval by the General Assembly during a regular meeting. According to the official website of EURORAI, as of August 2020, more than 90 institutions from 16 countries (15 European countries and Brazil) were members

of the organisation. At the same time, the largest number of regional (municipal) audit institutions is represented by Russia (17), Germany (13), France (13), Spain (12).

Of course, regional audit institutions have distinctive features not only due to the presence in certain territories of exclusive management mechanisms and practices of interaction with the executive branch, but also due to the different age of institutions, the number and qualifications of staff members (Table 1).

World experience proves that the use of performance audit as an independent type of control improves the process of public resource management by providing complete, reliable, and objective information about efficiency of functioning of organisations that use budget funds [10, p. 71].

Considering the practical importance of studying foreign approaches to performance auditing, one cannot fail to note the key (from the standpoint of determining effectiveness) spheres of using budget funds, including health care, education, the military (security) and others. At the same time, a special place is provided to government spending on development of the transport system since not only the indicators of the national (regional) economy, but also the life of citizens, largely depend on efficiency of transport functioning.

Global trends in improving the efficiency of investments in the transport sector, developing innovative products, digitalisation and informatisation, strengthening economic

¹ Official website of CCA of Moscow. [Electronic resource]: <http://www.ksp.mos.ru>. Last accessed 28.09.2020; Official website of CAC of St. Petersburg. [Electronic resource]: <http://www.ksp.org.ru>. Last accessed 28.09.2020; Official website of Audit Scotland. [Electronic resource]: <http://www.audit-scotland.gov.uk>. Last accessed 28.09.2020; Official website of Wales Audit Office. [Electronic resource]: <http://www.wao.gov.uk>. Last accessed 28.09.2020; Official website of City of Vienna Court of Audit. [Electronic resource]: <http://www.stadtrechnungshof.wien.at>. Last accessed 28.09.2020; Official website of Bavarian Supreme Audit Office. [Electronic resource]: <http://www.orh.bayern.de>. Last accessed 28.09.2020; Official website of Office of the Auditor General Manitoba. [Electronic resource]: <https://www.oag.mb.ca>. Last accessed 28.09.2020.

security could not but affect the Russian economy, and the degree of their influence is described in detail in several research studies [11–14].

The need on the part of society and business for a comprehensive assessment of the economy, efficiency, and effectiveness of using regional public resources for development of the transport sector is due to objective socio-economic factors and trends.

Firstly, government spending on development of the transport system is colossal, and ongoing transport projects are in demand everywhere. So, the budget of the city of Moscow in 2019, in order to improve the transport sector, financed activities totalling 661,8 billion roubles (26,6 % of budget expenditures), which is more than the total amount of expenditures on education and health care; the budget of the city of St. Petersburg – for a total amount of 114,5 billion roubles (17,6 % of budget expenditures). In addition to sub-federal centralized funds, development of the transport system is financed from the federal budget, as well as with participation of private investors. Moreover, the example of Russian megalopolises is not unconventional. Obviously, with the growth of the population of large cities, often due to regional economic differentiation, causing internal (international) migration, the need for implementation of infrastructure projects in the transport industry will only increase.

Secondly, the state through normative legal acts influences the economic behaviour of all participants in production and consumption of transport services. In the context of the new configuration of the market and the imbalance of interests of its participants, legislative changes should motivate all market participants to improve efficiency of railway transport and reduce transport costs in the economy as a whole [15, p. 75].

Thirdly, a large part of the disposable resources of households is spent on services in the transport sector. If we look at distribution of expenditures by decile groups of the population of Russia, the following trend can be traced: with an increase in disposable income, the share of expenditures on transport multiplies. For example, in the first decile group, on average, transport costs were 1,3 %, in the fifth group – 4,8 %, in the ninth – 11,5 % (data regarding the first quarter of 2020) [16]. A similar trend is characteristic of European countries: in

Germany in 2015, the population of the first quintile spent 7,3 % of disposable funds on transport, the fifth quintile – 16,4 %; in Great Britain – 8,3 and 18,6 %, respectively; in Sweden – 8,9 and 15,1 %, respectively [17, p. 12]. In this regard, we believe that with the growth of real incomes of the population in the future, the expenses on products and services of the transport sector will increase both in absolute and in relative terms.

Thus, the growth of public spending on transport, enlargement of megalopolises and the expansion of state transport programs, interest in development of transport infrastructure and reduction of transport costs (through increased competition) on the part of business provide a high potential demand for the results of the activities of public audit institutions through an assessment of effectiveness of the use of public resources in the transport system.

In other words, the general rule is also characteristic of the transport sector: when resources are limited, it is necessary to solve public problems with the lowest costs while achieving certain goals (economy) or to achieve the best result with a fixed amount of funding (efficiency) [18, p. 367].

Currently, in developed countries, financial control authorities widely use the audit of effectiveness of budget expenditures. In a number of states, the share of audit reaches 50–60 % in the total volume of control activities undertaken by supreme audit institutions [19, p. 72]. At the same time, the CCA of Moscow, for example, in 2016 conducted nine performance audits (4,3 % of the total number of control activities), in 2017 – six performance audits (2,8 %), in 2018 – six performance audits (2,6 %) only, while the share of ineffective expenses in the total volume of violations in monetary terms was 87,5 % in 2016, 70,2 % in 2017 and 86,3 % in 2018. Statistics indicate a high volume of ineffective budget expenditures with a relatively small number of performance audits, which underlines the extreme importance of the latter.

At the same time, it should be emphasised that performance audit is a control activity aimed at determining economy, efficiency and effectiveness of the use of public resources through establishment of criteria and performance indicators, the search for evidence for each of the criteria, carried out with a large amount of labour costs, using information systems, big data, mathematical methods, surveys and interviews. In this regard,



the number as well as the quality of performance audits conducted by Russian CABs depends on a number of factors:

- existence of economic, political, social, environmental and other regional features;
- existence of national norms (standards) and traditions of performance audit;
- different budget structures and the amount of audited funds;
- different staffing levels of regional audit institutions;
- uniqueness of regional management systems, the presence of well-established practices of interaction between CABs and the executive branch.

Transport performance audit in Scotland

In terms of the methodology and practice of conducting performance audits in the transport sector, the British regional audit bodies deserve considerable attention, due to the presence of advanced transport technologies, especially in large cities, and high demands of society regarding the transport system.

A performance audit in Great Britain aims to gather evidence to conclude that the costs are in line with the results. Thus, the National Audit Office of Great Britain, when conducting performance audits, focuses exclusively on the final results [20, p. 96].

Structurally, regional audit institutions in Great Britain have many features. In particular, the Audit Scotland includes the Auditor General for Scotland and the Accounts Commission. At the same time, the Auditor General for Scotland is responsible for the audit of all government bodies (except local ones), including the government and government agencies of Scotland, the police, fire services, colleges and others. The activity results in a report to the parliamentary Public Accounts Committee. In turn, the Accounts Commission is the external controller of public expenditures of councils and other local government bodies, contributing to make (update) management decisions of local councils. The Controller of Audit reports to the Accounts Commission on matters of public interest to local government bodies and highlights areas of concern.

Approximately 15 performance audits are conducted annually on behalf of the Auditor General for Scotland and the Accounts Commission, and reports on the results thereof must be accurate and up to date. For these

purposes, most performance audits are carried out with participation of teams of consultants coming from outside Scotland. Most often, these groups include six to ten members with special knowledge of the area being audited.

From the totality of transport performance audits conducted by the Auditor General for Scotland, the performance audit on Transport Scotland's ferry services (October 2017) was selected for further consideration in this article [21].

The performance audit report contains the summary (key messages, recommendations, background, information about the audit), four main parts (Transport Scotland's ferry operations; analysis of the cost and performance of Transport Scotland's subsidised services; examination of procurement arrangements; the long-term planning of ferry services and assets), appendices.

Based on the data of the report, the audited area is characterised by the following statistical data (as of the date of publication of the report):

- There are an estimated 66 scheduled ferry routes in Scotland, managed by a range of public and commercial operators.
- In 2016/17, £209.7 million were spent on ferry services and assets, such as vessels and harbours.
- There are main ferry contracts, through which Transport Scotland subsidises 32 ferry routes, carrying over five million people each year.
- Over ten years period starting from 2007 Transport Scotland's spending on ferries increased by 115 per cent in real terms; the number of passengers increased by 0,3 per cent; car numbers increased by 16.8 per cent.
- More than 99 per cent of scheduled sailings took place and were on time.

In the context of limited public finances, Transport Scotland will find it challenging to continue to provide ferry services that meet the needs of users within its allocated budget.

Besides, the Auditor General for Scotland suggests the analysis of ferry procurement activity revealing the problems and weaknesses. For example, during the tender, which was a new procurement method, the two bidders submitted over 800 queries during the tender process and there were delays in providing them with important information.

Procurement tender was awarded to the bid that was £128 million lower than Transport

Scotland's estimate of £868 million contract cost. The 350 commitments in the bid were not assessed, and after the Transport Scotland updated the contract this has increased the contract cost to £975 million.

These problems and trends identified in the performance audit process were reflected in the recommendations.

The report recommends Transport Scotland particularly to:

1. Develop a Scotland-wide, long-term strategy for its network of subsidised ferries, considering:

- progress already made against the Ferries Plan,
- setting out its intended benefits of subsidised ferry services, their contribution to national outcomes, tools of its measurement and monitoring,
- inclusion of an assessment of the long-term affordability of its spending on services and assets (taking into account financial strategy),
- prioritisation of spending across its network,
- regular monitoring of the developed strategy to ensure it is on time and on budget, remains relevant and affordable.

2. To ensure that Transport Scotland has adequate resources to develop, monitor and report against its long-term ferries strategy.

3. To improve the transparency of ferry service and create the possibility for ferry users to assess the quality of service (e.g., to strengthen social feedback).

4. To improve mechanism of procuring ferry services, and this should include:

- ensuring that procurement teams include staff with procurement qualifications and experience of the ferry sector,
- building in sufficient time to prepare important project documentation,
- ensuring that contract specifications are accurate, up to date and clear to potential bidders,
- providing bidders with clear, good-quality and timely data.

Besides, Transport Scotland was recommended together with ferry operators to better communicate their roles, responsibilities, and accountabilities.

It should be noted that in Great Britain, special attention is paid to development of strategic documents in the field of transport,

aimed at investment in innovation. In particular, it is worth to mention Rail Technical Strategy which has been approved and is now implemented [22, p. 80]. At the same time, reasonableness of development and implementation of strategies are often the subject of performance audits.

Manitoba transport system performance audit (Canada)

Regarding the regulation and implementation of audit of effectiveness of the use of public resources in the transport system, one cannot but mention the regional bodies of external public audit of Canada.

The Office of the Auditor General of Manitoba appears to be one of the most transparent in terms of posting information in open access sources. The auditor general, appointed for a ten-year term by the Manitoba Legislative Assembly, and, assisted by 55 staff members of the Office, conducts public audits in the form of financial statement audits and project audits, the latter are subdivided into performance audits, special audits (investigations) and information technology audits (IT audits), governance audits and reviews.

In the practices of the Auditor General of Manitoba, performance audit is enshrined as a systematic assessment of effectiveness of the management of a government body or program, considering the available powers and resources. Performance audits examine the government's management practices, controls, and reporting systems in the areas that are of strategic importance to provide the Legislative Assembly with independent and objective information on activities of government organisations.

The performance audit in Manitoba as a process consists of four phases comprising planning phase, examination phase, reporting phase, and the phase of follow-up on the status of the recommendations, its features are summarised in Pic. 1.

In many ways, Russian performance audit standards provide for the same sequence of actions as Canadian ones. At the same time, in Canada, attention is focused on some significant, in our opinion, procedures.

Firstly, development of goals and performance evaluation criteria is carried out at the planning stage. Given that audit evidence is collected for each of the criteria, the importance of developing criteria cannot be overemphasised. At the same time, the Russian CAB criteria are often refined



PLANNING PHASE

- Identifying audit topics, considering the financial magnitude, impact of the subject matter on the social, environmental, economic, etc. aspects of Manitoba, high degree of public interest, audit work conducted in the past.
- Preliminary examination of the audit subject, identifying major risks.
- Establishing the scope of the audit as well as of audit timing.
- Developing the audit objective and criteria.
- Outlining audit procedures to optimise collection of appropriate evidence.
- Identifying the required team competency and whether experts will need to be engaged on the audit.
- Determining whether the knowledge gained from other audits performed on the audit subject is relevant – such as work undertaken by Internal Audit.
- Development of an audit plan outlining the approach that will be followed, varying depending on the size and complexity of the audit.

EXAMINATION PHASE

- Obtaining sufficient and appropriate audit evidence based on timely obtaining information from the audit entity.
- Employing a variety of information gathering techniques and procedures, such as interviews, site visits, document requests, benchmarking similar organisations, data analysis, and file review.
- Work meetings with audit entity to discuss preliminary audit findings and conclusions.

REPORTING PHASE

- Preparing an audit report that outlines their findings and concludes on the performance of the audit entity against the audit objective and criteria.
- Identification of recommendations for performance improvement where there are significant differences between the criteria and assessed results.
- Preparation by the audit entity of a formal response with the actions that will be taken to address the issues underpinning each of the audit's recommendations.

FOLLOW-UP PHASE

- Following up on the status of the recommendations to provide a continued analysis of the program performance.
- Scheduling of follow-up on the status of recommendations (first follow-up is scheduled about 18 months after an audit report is released, and annually thereafter for two more years); government departments and crown organizations are accountable to the PAC for the implementation of recommendations.

Pic. 1. Stages (phases) of performance audit by the Auditor General of Manitoba. Compiled by the author based on the information of the official website of the Office of the Auditor General of Manitoba. [Electronic resource]: <https://www.oag.mb.ca>. Last accessed 21.09.2020.

during the main stage (examination phase), which delays the audit process and levels out the results of the planning stage.

Secondly, special methods and procedures for performance auditing, commonly used by Canadian governmental audit bodies, are not always used in Russia, given the lack of their consolidation in standards, which in practice predetermines the confusion of financial auditing and performance auditing.

Thirdly, a well-defined time frame for monitoring recommendations contributes to stable implementation of these recommendations and increases the responsibility of audited entities.

The main measure of quality of the performance audit performed is the content of the report on its

results. To assess the structure of the report and the results of the efficiency audit in the transport sector, the report on the results of the efficiency audit «Oversight of Commercial Vehicle Safety» (December 2019) [23] was considered.

The report on the results of the performance audit regarding Oversight of Commercial Vehicle Safety included several sections typical for the bulk of audits conducted by the Auditor General of Manitoba: comments by the Auditor General, report highlights, main points (detailed disclosure of the key points of the report), response from the audited officials, background information, information about the objective, scope and approach of performance audit, findings and recommendations (the main and most voluminous section).

Table 2

Objectives and criteria of performance audit regarding Oversight of Commercial Vehicle Safety

Objective	Criteria
To assess the adequacy of motor-carrier safety-fitness program	• All motor carriers requiring safety-fitness certificates should obtain them. • Safety fitness certificates (both initial and annual renewals) should only be issued to carriers who meet established safety-fitness requirements. • Safety-fitness determinations and ratings should be logically determined and properly supported. • Facility audits should effectively support improvements to carrier safety.
To assess the on-road commercial-vehicle inspections	• Standards and policies should be in place to effectively guide on-road vehicle inspections, giving adequate consideration to underlying risks. • Inspectors' performance and results should be monitored and inspection deficiencies followed up with due diligence.
To determine the adequacy of strategic planning and performance management	• Strategic plans and clear objectives should be developed, based on sufficient and relevant information. • Strategic planning should identify and consider risks, meaningful performance measures for major activities, and coordination in areas of shared responsibility. • The Department should report on key aspects of commercial vehicle safety.

Compiled by the author based on: Independent Audit Report «Department of Infrastructure: Oversight of Commercial Vehicle Safety». [Electronic resource]: <https://www.oag.mb.ca/audit-reports/report/commercial-vehicle-safety/>. Last accessed 30.09.2020.

According to the comments by the Auditor General of Manitoba, there were a number of commercial vehicle safety issues at the time of the audit:

- the size and loads of heavy commercial vehicles (such as semi and straight trucks greater than 4,500 kg) presented unique safety risks;

- collisions involving these vehicles resulted in 11 deaths, 533 injuries;

- The Infrastructure Department has issued about 7,500 safety fitness certificates, allowing operation of about 45,000 heavy commercial vehicles. However, the audit notes that the Department can improve their processes to better verify and promote the safety of these operators.

In line with the objective of performance auditing, the Auditor General of Manitoba inspected how Infrastructure Department oversees commercial vehicle safety's processes related to:

- Motor-carrier safety-fitness program.
- On-road commercial-vehicle inspections.
- Strategic planning and performance management.

In accordance with the internal standards of the Office of the Auditor General of Manitoba, criteria for assessing effectiveness are established for obtaining audit evidence for each of the objectives (Table 2).

As can be seen from the data in Table 2, 2 to 4 criteria have been developed for each of

the objectives. The collection of audit evidence for each of the criteria made it possible to form key findings based on the results of the performance audit: safety program practices insufficient to verify and promote safety; there are gaps in management of on-road inspections; there are weak planning and performance measurement processes.

It should be noted that, subject to availability of performance criteria, there is no system of performance indicators. This is due to establishment of qualitative, rather than quantitative criteria for assessing efficiency.

The performance audit recommendations were divided into three large groups in accordance with the established objectives and criteria. Generalised examples of the contents of selected recommendations are shown in Pic. 2.

As a result of considering the recommendations of the Auditor General of Manitoba, the Infrastructure Department agreed with them and provided comments on practical implementation of the recommendations, which is reflected in the report.

In particular, the Infrastructure Department has envisaged to incorporate a knowledge test for new commercial vehicle operators and requiring all safety fitness certificate holders or applicants to complete a safety plan, to improve the information technology (IT) system that supports monitoring of commercial vehicles in Manitoba.



Safety program (10 recommendations)	On-road commercial- vehicle inspections (6 recommendations)	Strategic planning and performance management (1 recommendation)
• Safety assessment should be more rigorous and logical. • Implementation and harmonisation of best practices applied in other jurisdictions (e.g. in Canada and the USA).	• Greater variability in its weigh station and patrol operating hours in order to make them less predictable. • Monitoring individual officer's performance and inspection results. • It is necessary to require operators to provide proof that vehicle deficiencies not immediately corrected during inspection have been repaired.	The Department should develop and implement a formal plan for commercial vehicle safety that: • Identifies, analyses, and addresses risks; • Sets targets and performance measures that will help it assess the effectiveness of its efforts to improve commercial vehicle safety.

Pic. 2. Selected generalised recommendations of the Auditor General of Manitoba on the results of performance audit on Oversight of Commercial Vehicle Safety. Source: Independent Audit Report «Department of Infrastructure: Oversight of Commercial Vehicle Safety». [Electronic resource]: <https://www.oag.mb.ca/audit-reports/report/commercial-vehicle-safety/>. Last accessed 30.09.2020.

To improve planning, the Department is exploring ways to better use of data and information sharing opportunities going forward using its existing relationships with other agencies having a shared role in commercial vehicle safety.

Conclusions.

1. Considering the «youth» of the theory and practice of performance audit in Russia, the study of international experience of performance audit, carried out in a number of countries since the middle of the 20th century, is of particular relevance. The high development of the regional transport systems of Great Britain and Canada, together with the advanced methods of performance audits, determine not only the importance, but also the need to study and borrow the best practices of these states.

2. An audit of effectiveness of the use of public funds in Scotland has a number of features in comparison with the Russian mechanisms of external public financial control:

- the audit of Scotland includes the activities of the Auditor General for Scotland, who is responsible for the audit of all public

authorities (except local), and the Accounts Commission, which is the external controller of municipal expenditures;

- most performance audits are carried out with a team of consultants of 6–10 members from outside Scotland.

In terms of audit of efficiency of the transport sector, based on the report on the results of the performance audit on Transport Scotland's ferry services, the following features are noted:

- the report is based on a comprehensive analysis of statistical information, within which a search for solutions to existing problems is carried out;

- in addition to assessing the efficiency of ferry crossings, the procurement system for analysed;

- recommendations occupy the main part of the report and contain specific activities required for implementation by the audited organisation;

- special attention in the recommendations is paid to development of a long-term strategy for the network of subsidised ferries, creation of an opportunity to assess quality of services by users, and improvement of the mechanism

of public procurement of ferries and ferry services.

3. The Auditor General of Manitoba (Canada), in turn, carries out financial and project audits, which include performance audits, special audits (investigations) and information technology audits (IT audits). Meanwhile, the methodology for conducting performance audits is largely similar to the Russian one (with rare but important exceptions). This phenomenon is explained by borrowing by the Russian CABs from the Canadian governmental audit authorities of the best methods and practices of performance audit.

As in Scotland, the Auditor General of Manitoba places particular emphasis on strategic planning documents. At the same time, the report on the results of the efficiency audit on Oversight of Commercial Vehicle Safety contains mainly qualitative (not quantitative) criteria for assessing efficiency.

In Canada, not only the immediate results of the performance audit are extremely important, but also specific (precise) recommendations to the executive authorities on how to improve their performance. Specifically, the Manitoba Department of Infrastructure is advised to:

- implement best practices and procedures for assessing driver safety knowledge applied in other jurisdictions;
- get rid of predictability of the work schedule of road inspections (weight stations) and mobile patrols;
- develop performance indicators for the Infrastructure Department;
- examine the risks and need to coordinate with other institutions.

4. It should be noted that the study of international experience in implementation of the audit of efficiency of the transport sector should have an important applied effect from the point of view of the possibility of introducing best practices into the activities of regional CABs in Russia, especially in functioning of CCA of Moscow and CAC of St. Petersburg as bodies with significant potential, extensive labour and material resources. Here, it is advisable to highlight, in our opinion, the integral foundations of the audit of efficiency of the transport system, which have received wide recognition abroad, but are still in their infancy in several federal entities of the Russian Federation.

Firstly, the focus should be made on solving the problems of managing regional public resources to formulate specific and precise recommendations to the executive authorities responsible for the use of funds for development of the transport system. Meanwhile, the recommendations should include, first, ready-made solutions, such as the need for adoption of strategic documents, introduction of best practices in neighbouring jurisdictions, and others.

Secondly, performance audit is directly related to assessment of the economy, productivity and efficiency of budget expenditures, which naturally implies the need to assess correctness of tender procedures and effectiveness of contract execution. It seems reasonable that foreign control bodies include audit activities in the field of procurement of goods, works and services (hereinafter – procurement audit) in the performance audit program, while in Russia procurement audit is often singled out as a separate type of control or expert analytical activity.

Thirdly, implementation of the performance audit of the transport system is always accompanied by large labour costs due to the traditionally large share of budgetary costs for transport, which determines the importance, and often the need to involve external experts for a high-quality control event. However, Russian regional CABs do not always use this opportunity – often due to a lack of resources to attract.

Besides, special attention should be paid to presentable appearance and simplicity of the reviewed reports on the results of performance audits, the content of performance assessment criteria in them. Documents written in a simple and logical language highlighting the problems of the transport sector represent capacity and interest not only for stakeholders, but also for ordinary citizens and businessmen.

REFERENCES

1. Saunin, A. N., Chernyadeva, Z. A. Normative regulation of efficiency audit: general and features in foreign supreme audit bodies [*Normativnoe regulirovanie audita effektivnosti: obshchee i osobennosti v zarubezhnykh vysshykh organakh audita*]. *Finansovoe pravo*, 2015, Iss. 10, pp. 12–17. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24283363>. Last accessed 29.09.2020.
2. Sinyagin, A., Dubinina, I. Performance audit: international experience and Russian realities [*Audit effektivnosti: mezhdunarodniy opyt i rossiiskie realii*]. *Byudzhët*, 2008, Iss. 9. [Electronic resource]: <http://bujet.ru/article/46056.php>. Last accessed 29.09.2020.

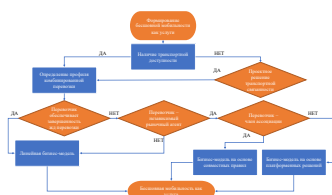


3. Shamshaev, S. V., Shklyarova, P. P. Audit of the efficiency of spending budgetary funds as foreign experience of state financial control [*Audit effektivnosti raskhodovaniya byudzhetykh sredstv kak zarubezhnyi opyt gosudarstvennogo finansovogo kontrolya*]. In: *Topical issues of accounting, analysis, and audit in the social sphere*, 2013, pp. 364–369. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23895575>. Last accessed 29.09.2020.
4. Shkodinsky, S. V., Kondratyeva, E. A. Cooperation between the supreme body of external governmental audit (control) and the internal audit services of government bodies in order to increase the efficiency of external governmental audit (control): fundamentals and foreign experience [*Sotrudnichestvo mezhdru vysshim organom vneshnego gosudarstvennogo audita (kontrolya): osnovy i zarubezhnyi opyt*]. *Gosudarstvennyi audit. Pravo. Ekonomika*, 2016, Iss. 4, pp. 35–41. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28199743>. Last accessed 29.09.2020.
5. Boyne, G. External Regulation and Best Value in Local Government *Public money & Management*, 2000, Iss. 3, pp. 7–12. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=6391020>. Last accessed 29.09.2020.
6. Pollitt, C. Performance audit in Western Europe: trends and choices. *Critical perspectives on accounting*, 2003, Iss. 1–2, pp. 157–170. DOI: 10.1006/cpac.2002.0521. Last accessed 29.09.2020.
7. Yan, J. Performance audit in the service of internal audit. *Managerial Auditing Journal*, 1997, No. 4–5, pp. 192–195. DOI: 10.1108/02686909710173867. Last accessed 29.09.2020.
8. Saunin, A. N. Efficiency audit: international standards of carrying out [*Audit effektivnosti: mezhdunarodnye standarty provedeniya*]. *Vestnik AKSOR*, 2012, Iss. 1 (20), pp. 109–117. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17730090>. Last accessed 29.09.2020.
9. Vaganova, O. E. Performance audit: development trends in the foreign and domestic economy [*Audit effektivnosti: tendentsii razvitiya v zarubezhnoi i otechestvennoi ekonomike*]. *Bulletin of Plekhanov Russian University of Economics*, 2015, Iss. 4 (22), pp. 200–207. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25498130>. Last accessed 29.09.2020.
10. Kovalenko, S. N., Trunova, E. A. Efficiency audit: modern problems and ways to solve them [*Audit effektivnosti: sovremennye problemy i puti ikh resheniya*]. *Scientific statements. Series: Economics. Informatics*, 2017, Iss. 2 (251), pp. 68–74. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28925924>. Last accessed 29.09.2020.
11. Bubnova, G. V. New paradigm of economic security management of transport logistics systems. *World of Transport and Transportation*, 2016, Vol. 14, Iss. 5 (66), pp. 96–101. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29366364>. Last accessed 29.09.2020.
12. Bubnova, G. V., Lyovin, B. A. Digital logistics – an innovative mechanism for development and effective functioning of transport and logistics systems and complexes [*Tsifrovaya logistika – innovatsionnyi mekhanizm razvitiya i effektivnogo funktsionirovaniya transportno-logisticheskikh sistem i kompleksov*]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, Iss. 3, pp. 72–78. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28426696>. Last accessed 29.09.2020.
13. Efimova, O. V., Larkova, N. A. Influence of debt obligations on indicators of economic safety of industrial transport enterprises [*Vliyaniye dolgovykh obyazatelstv na pokazateli ekonomicheskoi bezopasnosti promyshlennyykh predpriyatiy transporta*]. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 2008, Iss. 11, pp. 56–62. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11679619>. Last accessed 29.09.2020.
14. Macheret, D. A., Kudryavtseva, A. V. On assessment of the efficiency of investments in innovative projects [*Ob otsenke effektivnosti investitsii v innovatsionnye proekty*]. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 2016, Iss. 12, pp. 21–26. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27434110>. Last accessed 29.09.2020.
15. Bubnova, G. V., Podsorin, V. A., Nikitina, M. A. Economic substantiation of the mechanism of interaction between transport companies and consumers of services [*Ekonomicheskoe obosnovaniye mekhanizma vzaimodeistviya transportnykh kompanii i potrebitel'ei uslug*]. *Transportnoe delo Rossii*, 2014, Iss. 1, pp. 74–77. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21561736>. Last accessed 29.09.2020.
16. Official website of Rosstat. Household Income, Expenditure and Consumption in 2020 [*Ofitsialnyi sait Rosstat. «Dokhody, raskhody i potrebleniye domashnykh khozyaistv v 2020 godu»*]. [Electronic resource]: https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b20_102/Main.htm. Last accessed 12.09.2020.
17. Bulletin on current trends in the world economy. [*Byulleten o tekushchikh tendentsiyakh mirovoi ekonomiki*]. No. 54 (March 2020). [Electronic resource]: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/map_2020_web.pdf. Last accessed 21.09.2020.
18. Terekhina, S. A., Soldatenko, I. A. Modern budgetary policy and the main parameters of the federal budget for 2018 and for the planning period of 2019 and 2020. The relationship between fiscal policy and forecast-2030 [*Sovremennaya byudzhelnaya politika i osnovnye parametry federalnogo byudzheta na 2018 god i na planovyy period 2019 i 2020 godov. Svyaz byudzhemnoi politiki s prognozom-2030*]. *Finansy i kredit*, 2018, Vol. 24, Iss. 2, pp. 362–376. DOI: 10.24891/fc.24.2.362. Last accessed 29.09.2020.
19. Safiullin, T. R. Foreign experience in the use of performance audit in state financial control [*Zarubezhnyi opyt primeneniya audita effektivnosti v gosudarstvennom finansovom kontrole*]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2018, Iss. 45 (3), pp. 71–73. DOI: 10.18411/lj-12-2018-70. Last accessed 29.09.2020.
20. Bogdanovich, I. S., Lukyanova, Yu. S. Comparative characteristics of the audit of effectiveness of the use of budgetary funds in Russia and abroad [*Sravnitel'naya kharakteristika audita effektivnosti ispolzovaniya byudzhetykh sredstv v Rossii i za rubezhom*]. *Bulletin of Pskov State University. Series: Economics. Law. Management*, 2017, Iss. 5, pp. 91–100. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30304199>. Last accessed 29.09.2020.
21. Audit Report «Transport Scotland's ferry services». [Electronic resource]: <https://www.audit-scotland.gov.uk/report/transport-scotland-ferry-services>. Last accessed 26.09.2020.
22. Kupriyanovskiy, V. P., Kurenkov, P. V., Bubnova, G. V., Dunaev, O. N., Sinyagov, S. A., Namiot, D. E. Economics of digital railway innovations. UK experience [*Ekonomika innovatsii tsifrovoi zheleznoi dorogi. Opyt Velikobritanii*]. *International journal of open information technologies*, 2017, Iss. 3, pp. 79–99. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28426697>. Last accessed 29.09.2020.
23. Independent Audit Report «Department of Infrastructure: Oversight of Commercial Vehicle Safety». [Electronic resource]: <https://www.oag.mb.ca/audit-reports/report/commercial-vehicle-safety/>. Last accessed 30.09.2020. ●



КОМБИНИРОВАННЫЕ ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ 208

Перспективные бизнес-модели стремятся стать горизонтальными.



ГОРОДСКОЙ ОБЩЕСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТ 220

Как посчитать обеспеченность подвижным составом?

ТО 238

Проверяя работоспособность автомобиля, следует проверять и эффективность труда персонала.

ВСМ 248

Для расчёта перспектив нужно анализировать пассажиропотоки, знать мнение клиентов и информировать их.

COMBINED PASSENGER TRANSPORTATION 214

Promising business models tend to be horizontal.

URBAN PUBLIC TRANSPORT 229

Indicators and calculations of availability of the rolling stock.

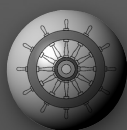


TECHNICAL MAINTENANCE 243

Checking motor cars, it is also necessary to check the efficiency of the employees.

HSR 260

To see prospects, it is necessary to analyse passenger turnover, know customers' opinion and to inform them.





Модели организации комбинированных (смешанных) пассажирских перевозок



Гуц Алексей Васильевич – ОАО «РЖД», Москва, Россия*.

Алексей ГУЦ

В статье рассматриваются бизнес-модели для смешанных (комбинированных) пассажирских перевозок и развитие комбинированных пассажирских перевозок как фактор роста ёмкости рынка железнодорожных пассажирских перевозок. Кризис на рынке транспортных услуг, вызванный внеэкономическими факторами (пандемией COVID-19), характеризуется классическим сочетанием шоков предложения и спроса на пассажирские перевозки, что делает актуальным вопрос о путях повышения объёмов пассажирских перевозок, в частности, железнодорожным транспортом, о способах формирования и увеличения спроса на услуги, предоставляемые населению с использованием железнодорожных активов.

Существующий в настоящее время подход к увеличению спроса на железнодорожные пассажирские перевозки путём развития железнодорожной маршрутной сети, улучшения оборудования железнодорожных вокзалов, повышения качества услуг, расширения линейки предлагаемых сервисов – всего того, что поощряет их потребление большим количеством клиентов, будет сохранять своё значение. Тем не менее этот подход должен быть критически осмыслен и дополнен в свете новых трендов экономики, обусловленных цифровыми технологиями, что особенно актуально именно сегодня,

когда в условиях ресурсных ограничений необходимо стратегическое организационное решение, направленное на масштабирование бизнеса, достижение оптимального баланса затрат, качества, компетенций, гибкости и клиентоориентированности.

Организация комбинированных пассажирских перевозок предполагает активное взаимодействие «по горизонтали» различных транспортных организаций как между собой, так и с разными когортами пассажиров со своими потребительскими предпочтениями и ограничениями по доходу. Актуален, следовательно, переход от линейных бизнес-процессов, построенных «по вертикали», к бизнес-процессам горизонтального типа, предлагающим специализированные пакеты услуг в системе «единого окна» по единым стандартам на базе цифровых технологий.

В статье предложены модели организации сетевого взаимодействия участников рынка пассажирских перевозок на основе цифровых технологий для обеспечения «бесшовной» мобильности населения при консолидирующей роли железнодорожного транспорта. Конкретные модели организации железнодорожных комбинированных перевозок должны строиться на базе определённой бизнес-модели, выбор которой является стратегическим решением компании.

Ключевые слова: железная дорога, железнодорожные пассажирские перевозки, рынок пассажирских перевозок, мультимодальные перевозки, сетевое взаимодействие, бизнес-модель, бесшовная мобильность.

*Информация об авторе:

Гуц Алексей Васильевич – начальник отдела маркетинга Дирекции скоростного сообщения – филиала ОАО «РЖД», Москва, Россия, aleksey_guts@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 02.11.2020, принята к публикации 21.12.2020.

For the English text of the article please see p. 214.

Организация комбинированных пассажирских перевозок — это адекватный и необходимый ответ на растущую мобильность населения, которая является функцией от таких переменных, как цена услуги (P), скорость передвижения (V), общее время в пути, которое выступает как фактор сжатия пространства за счёт развитой маршрутной сети (T), связанности/сопряжённости транспортной инфраструктуры (N):

$$M = f(P, V, T, N). \quad (1)$$

Зависимая переменная — «мобильность населения» — в системе социально-экономических приоритетов является «достойным благом», потребление которого следует поощрять. Организация комбинированных пассажирских перевозок служит инструментом роста мобильности населения, прежде всего, в крупных городах и агломерациях, где потребность в скорости передвижения, требования к качеству транспортных услуг, созданию «бесшовных» перевозок — по смешанным маршрутам и с использованием разных видов транспорта по единому билету — проявляются со всей остротой [1].

Формирование ценностного предложения для пассажира — «бесбарьерной» («бесшовной») мобильности как услуги — для компаний пассажирского транспортного комплекса выступает в определённой мере как вызов, поскольку не ограничивается повышением удобства железнодорожной маршрутной сети, улучшением оборудования железнодорожных вокзалов, повышением качества услуг, расширением линейки предлагаемых сервисов. Организация комбинированной пассажирской перевозки сопряжена с кардинальным сдвигом/трансформацией бизнес-процесса транспортной компании в сторону сетевой бизнес-модели, что требует от компании выработки стратегического решения о переходе на новую бизнес-модель, то есть новую логику создания ценности для клиента и монетизации результатов от её реализации для компании.

«Бесшовная» мобильность как услуга обеспечивается современной технологией транспортной работы, позволяющей на основе:

1) комбинации разных видов транспорта;

2) комплексного и сопряжённого развития транспортной инфраструктуры (маршрутная сеть; транспортно-пересадочные узлы, согласованные графики движения различных видов транспорта);

3) пула компетенций участников перевозочного процесса

создать комбинированную услугу перевозки по схеме «от двери до двери» («от дома до дома») по единому перевозочному документу и сформировать ценностное предложение для клиентов/пассажиров — мобильность, доступность и безопасность перевозки.

Организация комбинированной пассажирской перевозки предполагает взаимодействие разных видов транспорта/различных транспортных организаций как между собой, так и с разными когортами пассажиров, обладающих разными потребительскими профилями. Таким образом, требуется не только современная технология транспортной работы, но и особая технология обеспечения связанности между ними, а именно сетевое взаимодействие, опирающееся на выстроенную архитектуру горизонтальных связей между транспортными организациями — участниками комбинированной перевозки [2].

В отличие от горизонтальной кооперации участников процесса перевозки, сетевое взаимодействие строится на принципах совместно разделяемых ценностей, доверия, общепринятых стандартах, инструментах соединения, общих протоколах, системах поддержки организованности и контроля.

Современные цифровые технологии создают технические возможности для сетевого взаимодействия качественно нового уровня, позволяя интегрировать многослойную «реальную» сеть, состоящую из транспортных активов, маршрутной сети, транспортных услуг и разного рода сервисов, ориентированных на создание ценностей для людей, бизнеса и территорий [3; 4; 5].

Современный этап развития и широкого распространения сетей, получивший название «уберизации экономики», базируется на использовании платформенных решений.

Таким образом, модель организации комбинированной пассажирской перевоз-





Рис 1. Модель организации комбинированной перевозки (составлено автором).

ки имеет в качестве своего основания технологию транспортной работы по сопряжению видов транспорта и видов сообщения по перевозке «от двери до двери» на основе комплексного и сопряжённого развития транспортной инфраструктуры.

Технология мультимодальной перевозки реализуется через механизмы связности транспортных компаний между собой (интеграция по горизонтали и вертикали, сетевое взаимодействие) по созданию совместного продукта – комбинированной пассажирской перевозки по единому билету – на основе совместного бизнес-процесса.

Использование цифровых технологий и создание цифровой зоны взаимодействия компаний с пассажирами – «сетевого пространства», включающего транспортные организации, а также компании, создающие сопутствующие услуги, формирует общую бизнес-платформу как «единое окно» для получения «единого билета».

В самом общем виде модель организации комбинированной пассажирской перевозки может быть представлена как взаимодействие технологий по созданию комбинированной пассажирской перевозки (рис. 1).

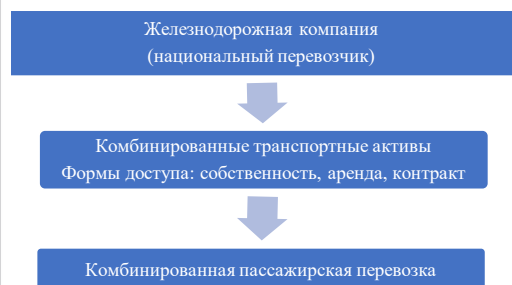


Рис. 2. Бизнес-модель, ориентированная на продукт (составлено автором).

Конкретные модели организации железнодорожных комбинированных перевозок будут строиться на базе определённой бизнес-модели, выбор которой является стратегическим решением компании.

Выделим модели организации комбинированных перевозок по такому критерию, как используемая компанией бизнес-модель.

1) Бизнес-модель, ориентированная на продукт (рис. 2).

Мы исходим из того, что железнодорожная компания, как правило, – национальный перевозчик, – берёт на себя функцию интегратора рынка пассажирских перевозок путём диверсификации своих активов (например, приобретает в собственность автобусный парк) для организации комбинированных перевозок. Управление объединённым активом позволяет увеличить рынок железнодорожных пассажирских перевозок, обеспечить рост их эффективности, создать новые центры прибыли и максимизировать совокупный доход.

В основе модели – цепь поставок, горизонтальный сквозной процесс, поток создания дополнительной стоимости/ценности продукта/услуги, направленный на формирование ценностного предложения комбинированной пассажирской перевозки. Компании, реализующие продуктовую бизнес-модель, в фокусе своего внимания держат цепь поставок/создания дополнительной ценности как своего главного конкурентного преимущества. Такого типа компании конкурируют не продуктами, а цепями поставок, что и определяет успешность их бизнеса. Конкурентные преимущества цепочки поставок достигаются с помощью технологических прорывов, снижения издержек, эффекта масштаба и маркетинга [6]; эффективность компании возрастает после каждого удвоения объёма выпуска, что сопровождается увеличением доли рынка и ростом конкурентоспособности компании по цене [7]. Цифровые технологии вносят неопределимый вклад в прирост эффективности продуктовой бизнес-модели за счёт прослеживаемости и большего охвата транзакций, кастомизации предложения. Однако, поскольку сама по себе бизнес-модель весьма ограниченно предполагает «выход» за пределы традицион-



Рис. 3. Бизнес-модель, построенная на совместных/интегрированных бизнес-процессах (составлено автором).

ного рынка продукта, его трансформацию, она не может в полной мере использовать потенциал, заложенный в цифровизации транспорта и логистики.

2) Бизнес-модель, построенная на совместных/интегрированных бизнес-процессах, объединяющих взаимосвязанные и взаимодополняющие производства, основные и сопутствующие виды деятельности, для получения совместного продукта/результата (рис. 3).

В такой модели компании, изначально имеющие продуктовую бизнес-модель, получают сигналы от рынка о возможностях масштабирования собственного бизнеса за счёт сетевых взаимодействий «по горизонтали», обмена информацией и данными между различными транспортными организациями как между собой, так и с компаниями, производящими комPLEMENTARНЫЕ и сопутствующие продукты, что создаёт новые механизмы монетизации ценности. Организация комбинированных пассажирских перевозок на базе сетевых взаимодействий предполагает выработку общих стандартов сотрудничества, доверия, систем поддержки организованности и контроля. Как правило, такая модель развивается при наличии институциональных условий — координирующих органов в форме ассоциаций, самоорганизуемых организаций, поддерживаемых системами государственного регулирования и судебной защитой контрактов. Цифровая трансформация транспорта и логистики создаёт технические возможности для организации сетевого взаимодействия по линии совместного использования активов, компле-



Рис. 4. Бизнес-модель, ориентированная на платформенные решения (составлено автором).

ментарных ресурсов по принципу «единого окна», оптимизации издержек и роста качества, с одной стороны, и «массовой индивидуализации» предложения для клиентов на базе цифровых технологий, — с другой.

3) Бизнес-модель, ориентированная на платформенные решения, — системы сервисов для агрегации независимых агентов рынка, координации и оптимизации взаимодействия между ними, как отраслевого и межотраслевого характера (B2B), так и в сегменте B2C (рис. 4).

В самом общем виде *платформа* — это общее основание, связывающее поставщиков с потребителями. Казалось бы, платформа не вносит во взаимодействие между поставщиком и клиентом никакой новой ценности (по сравнению с линейной организацией), однако здесь возникает «сетевое пространство» из поставщиков услуг и их потребителей, формирующее дополнительную ценность для его участников с точки зрения экономии издержек выбора и мобильности. Платформа предстаёт как:

- 1) основание, на котором интегрируется полный набор продуктов и услуг;
- 2) цепочки поставок/создания дополнительных ценностей и обслуживающих их транзакций;
- 3) свод правил, протоколов и условий взаимодействия участников платформы [5].

Платформенные решения позволяют фирме:

- во-первых, иметь несколько потоков/источников доходов за счёт коалиции с разными экономическими агентами, работы



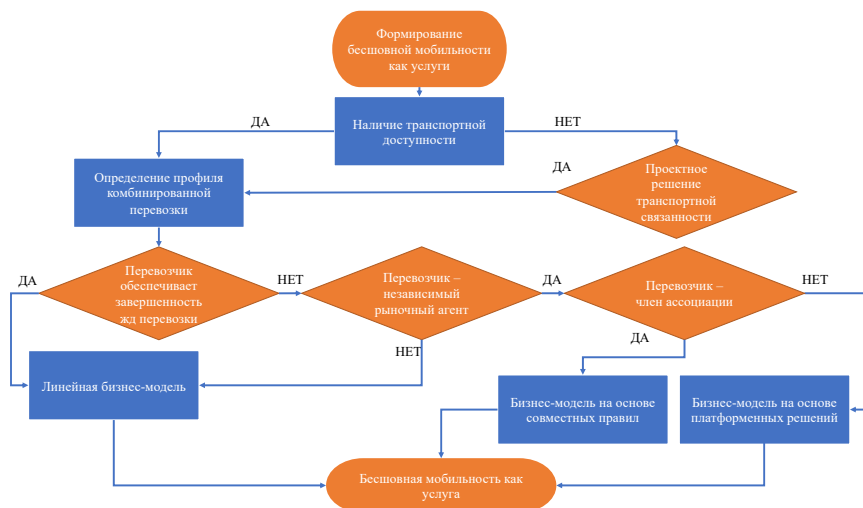


Рис. 5. Блок-схема сетевого взаимодействия для организации комбинированных пассажирских перевозок (составлено автором).

одновременно со многими различными данными, скорости коммуникаций и обмена информацией;

- во-вторых, не менее важным источником доходов и роста капитализации является переход к другому механизму координации: сетевому сотрудничеству, которое становится самостоятельным рыночным активом [8; 10; 11]. Чем больше участников сетевого взаимодействия, тем более содержательным и разнообразным оно становится, тем выше сетевые эффекты как для отдельных участников сети, так и для системы в целом. Участие в сети позволяет работать с различными компаниями/клиентами/данными, что увеличивает плотность экономического пространства, позволяет получать эффект масштаба; консолидация активов и совместное использование ресурсов обеспечивают качество сервисов при конкурентных издержках; разделяемые ценности, доверие и стандарты взаимодействия снижают издержки координации. Поскольку возникают положительные сетевые эффекты [9], постольку выгодно присоединиться к сети, быть её участником, что повышает рыночную стоимость активов компании. Затраты же тех, кто не находится в сети, неизбежно будут возрастать [8].

Платформа, таким образом, создаёт ценность для всех её участников:

- на стороне предложения — это транспортные организации, а также компании,

создающие сопутствующие услуги (аренда автомобиля, резервирование отеля и т.д.);

- на стороне спроса — это пассажиры, обладающие разным профилем предпочтений;

- продукт, торгуемый на платформе — это информация о расписании движения, наличии провозных мощностей и билетов, сопутствующих услуг;

- ценность, продуцируемая платформой, — это скорость, с которой могут взаимодействовать участники платформы, или, другими словами, новый уровень мобильности, экономия транзакционных издержек, обратная связь и продуцирование новых предложений (продуктов/услуг);

- выгодами на стороне потребителя/пассажира будут: минимизация времени на организацию поездки, оптимальная скорость поездки, единый стандарт качества обслуживания на всём маршруте, оптимальная цена услуги;

- выгодами на стороне производителя — присвоение сетевых эффектов, экономия транзакционных издержек, кастомизация предложения и лояльность клиента, продуцирование новых продуктов/услуг и увеличение прибыли, рост рыночной стоимости активов.

Блок-схема организации сетевого взаимодействия участников российского рынка и выбора приоритетной бизнес-модели для обеспечения «бесшовной» мобильности населения на основе цифровых техно-

логий при консолидирующей роли железнодорожного транспорта представлена на рис. 5.

На российском рынке пассажирских перевозок инициатором создания сетевого взаимодействия для расширения маршрутной сети, консолидации активов, оптимизации издержек и роста качества услуг перевозки в силу технологического и экономического положения может стать ОАО «РЖД». Сетевое взаимодействие с участием ОАО «РЖД» на основе современных информационных технологий запустит процесс проникновения услуг и сервисов железнодорожного транспорта на смежные рынки, привлечёт сервисную инфраструктуру для продвижения и обеспечения новых каналов сбыта и продвижения услуг до конечных потребителей.

ВЫВОДЫ

1. Организация комбинированных пассажирских перевозок служит консолидации ресурсов и резервов оптимизации затрат транспортных организаций, роста эффективности использования транспортных активов. Организация комбинированных пассажирских перевозок предполагает активное взаимодействие «по горизонтали» различных транспортных организаций как между собой, так и с разными когортами пассажиров со своими потребительскими предпочтениями и ограничениями по доходу. Актуален, следовательно, переход от линейных бизнес-процессов, построенных «по вертикали», к бизнес-процессам горизонтального типа, предлагающим специализированные пакеты услуг в системе «единого окна» по единым стандартам на базе цифровых технологий.

2. Усложнение технологий, цифровая трансформация производственных процессов повышают ценность сотрудничества — умения координировать свои действия с действиями других экономических агентов, когда конкуренция становится экономически невыгодной. Современные ИТ-технологии, платформенные решения создают технические возможности для интеграции бизнес-процессов разных видов транспорта в целях консолидации усилий и сетевого взаимодействия по линии совместного использования активов,

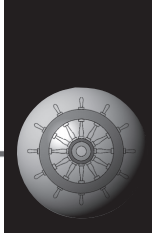
комплементарных компетенций, оптимизации издержек и роста качества.

3. Современные тренды в развитии мирового и российского рынка пассажирских перевозок свидетельствуют о необходимости разработки новых бизнес-моделей создания ценности для клиента и в целях компенсации убывающего спроса, где проявится новый формат использования железнодорожной инфраструктуры, ориентированный на создание ценностей для людей, бизнеса, территории. Модели организации железнодорожных комбинированных перевозок должны строиться на базе бизнес-моделей, выбор которых должен быть предопределён стратегическим решением компании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев О. Н., Гуц А. В. Рынок пассажирских перевозок: пути организации мультимодальных перевозок // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 1(80). — С. 23–26. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-passazhirskih-perevozok-puti-organizatsii-multimodalnyh-perevozok/pdf>. Доступ 21.12.2020.
2. Отчет международной ассоциации публичного транспорта: мобильность как сервис. Апрель 2019 г. [Электронный ресурс]: https://www.metropolis.org/sites/default/files/resources/Report_MaaS_final.pdf. Доступ 21.12.2020.
3. JR East Group Management Vision «Move Up» 2027 / Доклад Японской железнодорожной компании. 2017. [Электронный ресурс]: <https://www.jreast.co.jp/e/investor/moveup/>. Доступ 21.12.2020.
4. Линц К., Мюллер-Стивенс Г., Циммерман А. Радикальное изменение бизнес-модели: адаптация и выживание в конкурентной среде / Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2019. — 311 с.
5. Бизнес-модели для MaaS [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/321623880_Business_models_for_MaaS / Доступ 21.12.2020.
6. Дунаев О. Н. Управление изменениями бизнес-моделей компаний // Логистика. — 2020. — № 8 (165). — С. 29–31. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44043248/>. Доступ 21.12.2020.
7. Ламанова В. А. Эффект масштаба на железнодорожном предприятии // Economics. — 2020. — № 2 (45). — С. 77–82. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/effekt-masshtaba-na-zheleznodorozhnom-predpriyatii/pdf>. Доступ 21.12.2020.
8. Капитализм платформ / Пер. с англ. и науч. ред. М. Добряковой // Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. — 128 с.
9. Джошуа Купер Рамо. Седьмое чувство. Под знаком непредсказуемости. — М.: Эксмо, 2017. — 247 с.
10. Моазед А., Джонсон Н. Платформа: Практическое применение революционной бизнес-модели / Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2019. — 288 с. [Электронный ресурс]: <https://znanium.com/read?id=352338>. Доступ 21.12.2020.
11. Вайл П., Ворнер С. Цифровая трансформация бизнеса: Изменение бизнес-модели для организации нового поколения / Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2019. — 257 с.





Models of Organisation of Combined (Mixed-Mode) Passenger Transportation



Guts, Alexey V., JSC Russian Railways, Moscow, Russia.*

Alexey V. GUTS

ABSTRACT

The article examines business models for mixed-mode (combined) passenger transportation and development of combined passenger transportation as a factor in the growth of capacity of the railway passenger transportation market. The crisis in the transport services market, caused by non-economic factors (COVID-19 pandemic), is characterized by a classic combination of supply shocks and demand shocks for passenger transportation, which increases relevance of the problem of searching ways to rise the volume of passenger traffic, in particular, by rail, demand for services provided to the public using railway assets.

The current approach to increasing the demand for railway passenger transportation by developing the railway route network, improving the equipment of railway stations and the quality of service, expanding the range of services offered, promoting everything that encourages the consumption of services by a larger number of customers, will remain important. Nevertheless, this approach should be critically considered and supplemented in the light of new economic trends motivated by digital technology.

That is especially important today, when, in conditions of resource constraints, a strategic organisational solution is needed aimed at scaling a business, achieving an optimal «balance» of costs, quality, competencies, flexibility and customer focus.

The organisation of combined passenger transportation involves active «horizontal» interaction of various transport organisations, both among themselves and with different cohorts of passengers with their own consumer preferences and income restrictions. Therefore, the transition from linear business processes built «vertically» to horizontal business processes that offer specialised packages of services through a «single window» system according to uniform standards based on digital technologies is relevant.

The article proposes models for organising network interaction of participants in the passenger transportation market based on digital technologies to ensure «seamless» mobility of the population with the consolidating role of railway transport. Specific models for organising combined railway transportation should be based on a specific business model, the choice of which is determined by a strategic decision of the company.

Keywords: railways, passenger transportation market, multimodal transportation, networking, business model, seamless mobility.

*Information about the author:

Guts, Alexey V. – Head of the Marketing unit of the High-Speed Transportation Directorate, a branch of JSC Russian Railways, Moscow, Russia, aleksey_guts@bk.ru.

Article received 02.11.2020, accepted 21.12.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 208.

The organisation of combined passenger transportation¹ is an adequate and necessary response to the growing mobility of the population, which is a function of such variables as the price of the service (P), the speed of movement (V), the total travel time, which acts as a factor of space compression due to the developed route network (RN), connectivity of transport infrastructure (C):

$$M = f(P, V, RN, C). \quad (1)$$

The dependent variable, «population mobility», in the system of socio-economic priorities is a «merit good», the consumption of which should be encouraged. The organisation of combined passenger transportation serves as a tool for increasing the mobility of the population, primarily in large cities and agglomerations, where the need for speed of movement, requirements for the quality of transport services, the creation of «seamless» transportation, on routes using different modes of transport and for using different modes of transport with a single ticket, is manifested with all the acuteness [1].

The development of an offer which has a value for the passenger regarding «barrier-free» («seamless») mobility as a service, acts to a certain extent as a challenge for the companies of the passenger transportation, since it is not limited to improving the convenience of the railway route network, the equipment of railway stations, the quality of services, extended line of services offered. Organisation of combined passenger transportation is associated with a cardinal shift/transformation of the business process of a transport company towards a network business model, which requires the company to develop a strategic decision on the transition to a new business model, that is, a new logic of creating value for the client and monetising the results of its implementation for the company.

«Seamless» mobility as a service is provided by modern technology of transportation which, based on:

1) combinations of different modes of transport;

2) integrated and coupled development of transport infrastructure (route network, transport interchange hubs, agreed timetables for various modes of transport);

3) the pool of competencies of the participants in the transportation process, allows to create a combined transportation service according to the «door-to-door» («from home to home») scheme and with a single transportation document and creates the value offer for customers/passengers: *mobility, accessibility, and safety of transportation*.

The organisation of combined passenger transportation involves the interaction of different modes of transport/different transport organisations, both among themselves and with different cohorts of passengers with different consumer profiles. Thus, not only modern technology of transportation work is required, but also a special technology to ensure connectivity between them, namely, network interaction, based on the built architecture of horizontal links between transport organisations who are participants in combined transportation [2].

In contrast to the horizontal cooperation of participants in the transportation process, network interaction is based on the principles of shared values, trust, generally accepted standards, connection tools, common protocols, systems to support organisation and control.

Modern digital technologies create technical opportunities for network interaction of a qualitatively new level, allowing to integrate a multi-layer «real» network consisting of transport assets, route network, transport services and various kinds of services focused on creating value for people, businesses, and territories [3–5].

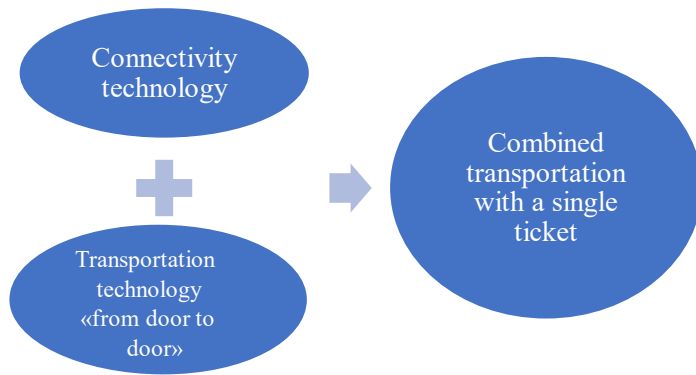
The current stage of development and widespread distribution of networks, called «uberization of the economy», is based on the use of platform solutions.

Thus, the model of organising combined passenger transportation is based on the transportation technology focused on door-to-door travel interfacing modes of transport with modes of transportation with the aid of the integrated and coupled development of transport infrastructure.

The multimodal transportation technology is implemented through the mechanisms of interconnection of transport companies with each other (horizontal and vertical integration, network interaction) to create a joint product –

¹ The terms «combined transportation», «mixed-mode transportation» are suggested as they literally reproduce the original terms in Russian used by the author. This does not refer in the context of the article to the discussions on the terminology regarding combined, multimodal, intermodal, mixed transportation, transit, commuting, etc. – *ed. note*.





Pic 1. Model of organisation of combined transportation (compiled by the author).

combined passenger transportation with a single ticket – based on a joint business process.

The use of digital technologies and the creation of a digital zone of interaction between companies and passengers: a «network space» that includes transport organisations; as well as companies that create related services, forms a common business platform as a «single window» for obtaining a «single ticket».

In its most general form, the model of organising combined passenger transportation can be represented as the interaction of technologies for creating combined passenger transportation (Pic. 1).

Specific models for organising combined railway transportation will be based on a specific business model, the choice of which is based on a strategic decision of the company.

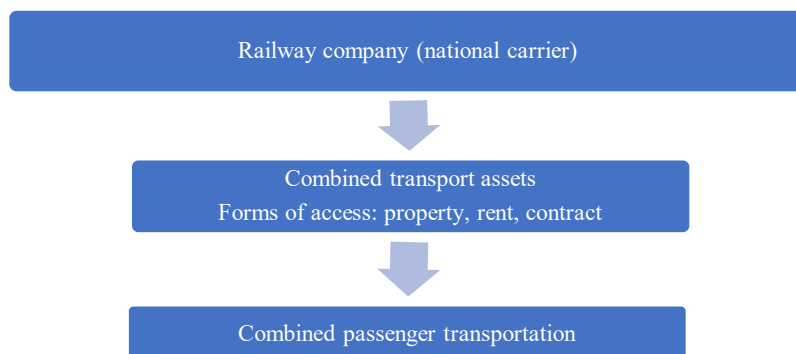
Let us single out the models for organising combined transportation by such a criterion as the business model used by the company.

1) Product oriented business model (Pic. 2).

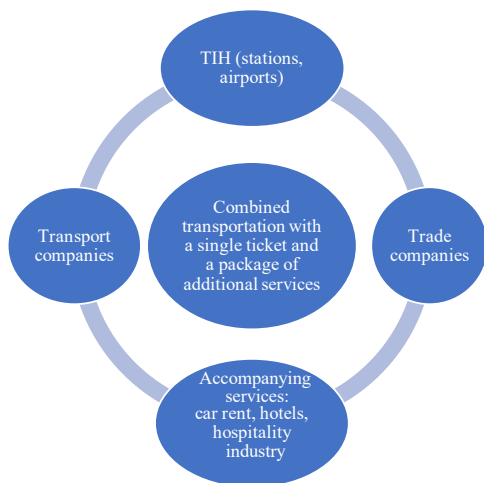
We proceed from the assumption that a railway company, a national carrier as a rule,

takes on the function of an integrator of the passenger transportation market by diversifying its assets (for example, acquiring a bus fleet) to organise combined transportation. Joint asset management enables the railway passenger market to grow, increase efficiency, create new profit centres, and maximize total revenue.

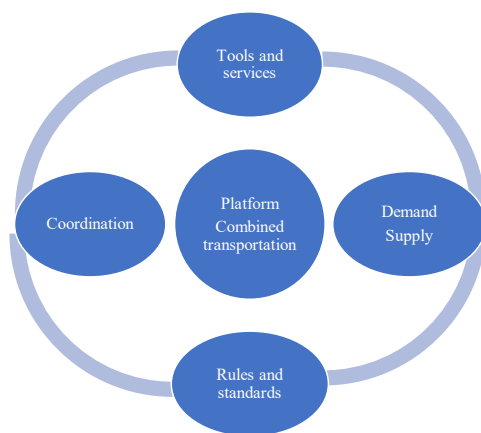
The model is based on a supply chain, a horizontal end-to-end process, a stream of additional value/value creation of a product/service aimed at forming a value offer for combined passenger transportation. Companies implementing a product business model keep the supply chain/value creation in focus as their main competitive advantage. Companies of this type compete not with products, but with supply chains, and that determines the success of their business. The competitive advantages of the supply chain are achieved through technological breakthroughs, cost reduction, scale effects and marketing [6]; the company's efficiency increases after each doubling of the output, which is accompanied by an increase



Pic. 2. Product oriented business model (compiled by the author).



Pic. 3. Business model, built on joint/integrated business processes (compiled by the author).



Pic. 4. Business model oriented on platform solutions (compiled by the author).

in market share and an increase in the company's competitiveness in terms of price [7]. Digital technologies make an invaluable contribution to increasing the efficiency of the product business model due to traceability and greater coverage of transactions, and customisation of the offer. However, since the business model itself very limitedly presupposes «going out» outside the traditional product market, either its transformation, it cannot fully use the potential inherent in digitalisation of transport and logistics.

2) A business model which is built on joint/integrated business processes that combine interrelated and complementary production, main and related activities, to obtain a joint product/result (Pic. 3).

In such a model, companies that initially have a product business model receive signals from the market about the possibilities of scaling their own business through «horizontal» network interactions, exchange of information and data between various transport organisations, both among themselves and with companies producing complementary and related products, creating thus new mechanisms for monetising value. The organisation of combined passenger transportation based on network interactions implies development of common standards for cooperation, trust, systems to support organisation and control. As a rule, such a model develops in the presence of institutional conditions (coordinating bodies in the form of associations, self-organising

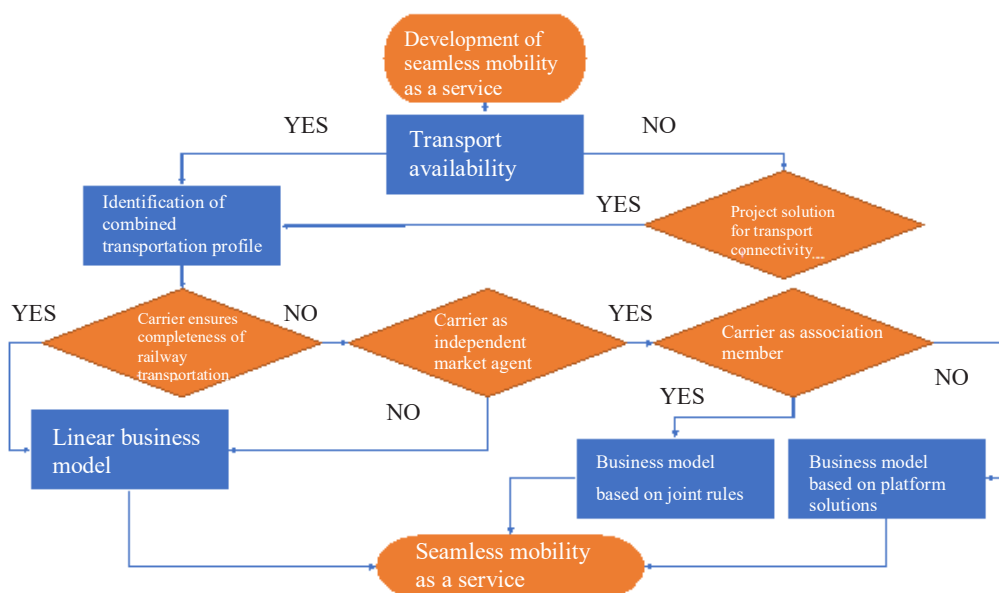
organisations, supported by systems of government regulation and judicial protection of contracts). The digital transformation of transport and logistics creates the technical capabilities for organising networking through the sharing of assets, complementary resources on the principle of a «single window», cost optimisation and quality growth, on the one hand, and «mass customisation» of the offer for customers based on digital technologies, on the other.

3) A business model that is focused on platform solutions: systems of services for aggregation of independent market agents, coordination and optimisation of interaction between them, both of a sectoral and cross-sectoral nature (B2B) and in the B2C segment (Pic. 4).

In its most general form, a platform is a common foundation linking suppliers to consumers. It would seem that the platform does not introduce any new value into the interaction between the supplier and the customer (in comparison with the linear organisation); however, here a «network space» arises on the part of service providers and their consumers, offering additional value for its participants in terms of saving selection costs and mobility. The platform appears as:

- 1) the basis on which the complete set of products and services is integrated;
- b) supply chain/chains of value creation and of support to transactions;
- c) a set of rules, protocols, and conditions for interaction between platform participants [5].





Pic. 5. Block diagram of network interaction for organisation of combine passenger transportation (compiled by the author).

Platform solutions allow the company to:

Firstly, to have several streams/sources of income due to a coalition with different economic agents, to work simultaneously with different data, the speed of communication and information exchange.

Secondly, an equally important source of income and capitalisation growth is the transition to a different coordination mechanism: network cooperation, which becomes an independent market asset [8; 10; 11]. The more participants are there in network interaction, the more meaningful and diverse it becomes, the higher are the network effects, both for individual network participants and for the system as a whole. Participation in the network allows working with different companies/clients/data, and that increases the density of the economic space, allows getting economies of scale; asset consolidation and resource sharing ensure service quality at competitive costs; shared values, trust, and communication standards reduce coordination costs. Since there are positive network effects [9], it is profitable to join the network, to be a member of it, which increases the market value of the company's assets. The costs of those who are not online will inevitably increase [8].

The platform thus creates value for all its participants:

- On the supply side, these are transport organisations, as well as companies that create related services (car rental, hotel reservations, etc.).

- On the demand side, these are passengers with different preference profiles.

- The product traded on the platform is information about the timetable, the availability of carrying capacity and tickets, related services.

- The value produced by the platform is speed with which platform participants can interact, or, in other words, a new level of mobility, savings in transaction costs, feedback and production of new offers (products/services).

- Benefits on the side of the consumer/passenger will be: minimisation of time for organising a trip, optimal travel speed, the single standard of service quality along the entire route, optimal service price.

- Benefits on the side of the manufacturer are appropriation of network effects, saving transaction costs, customising the offer and customer loyalty, producing new products/services, and increasing profits, increasing the market value of assets.

A block diagram of organisation of network interaction of Russian market participants and the choice of a priority business model to ensure «seamless» mobility

of the population based on digital technologies with the consolidating role of railway transport is shown in Pic. 5.

In the Russian passenger transportation market, JSC Russian Railways may become the initiator of networking to expand the route network, consolidate assets, optimise costs, and increase the quality of transportation services due to its technological and economic situation. Networking with the participation of JSC Russian Railways based on modern information technologies will launch the process of diffusion of services provided by railways into adjacent markets, attract service infrastructure to facilitate and provide new sales channels and promote services to end consumers.

Conclusions.

1. Organisation of combined passenger transportation serves to consolidate resources and reserves for optimising the costs of transport organisations, increasing the efficiency of using transport assets. Organisation of combined passenger transportation involves active «horizontal» interaction of various transport organisations, both among themselves and with different cohorts of passengers with their own consumer preferences and income restrictions. Therefore, the transition from linear business processes built «vertically» to horizontal business processes that offer specialized packages of services through a «single window» system according to uniform standards based on digital technologies is relevant.

2. The increasing complexity of technologies, digital transformation of production processes increases the value of cooperation: the ability to coordinate their actions with the actions of other economic agents when competition becomes economically unprofitable. Modern IT technologies, platform solutions create technical opportunities for integration of business processes of different modes of transport to consolidate efforts and network interaction towards shared assets, complementary competencies, optimizing costs and increasing quality.

3. Modern trends in development of the global and Russian passenger transportation market indicate the need to develop new business models for creating value for the client and to compensate for the diminishing

demand, where a new format of using the railway infrastructure will appear, focused on creating value for people, business, and territory. Models for organising combined railway transportation should be based on business models, the choice of which should be predetermined by the company's strategic decision.

REFERENCES

1. Dunaev, O. N., Guts, A. V. Market of passenger transportation: ways of organising multimodal transportation [Rynok passazhirskikh perevozok: puti organizatsii multimodalnykh perevozok]. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2019, Iss. 1 (80), pp. 23–26. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-passazhirskikh-perevozok-puti-organizatsii-multimodalnykh-perevozok/pdf>. Last accessed 21.12.2020.
2. Report of the International Public Transport Association: Mobility as a Service. April 2019 [Otchet mezhdunarodnoi assotsiatsii publichnogo transporta: mobilnost' kak servis. April 2019]. [Electronic resource]: https://www.metropolis.org/sites/default/files/resources/Report_MaaS_final.pdf. Last accessed 21.12.2020.
3. JR East Group Management Vision «Move Up» 2027. Report of Japanese railway company. 2017. [Electronic resource]: <https://www.jreast.co.jp/e/investor/moveup/>. Last accessed 21.12.2020.
4. Linz, K., Mueller-Stievens, G., Zimmerman, A. Radical change in the business model: adaptation and survival in a competitive environment [Radikalnoe izmenenie biznes-modeli: adaptatsiya i vyzhivanie v konkurentnoi srede. Transl. from English]. Moscow, Alpina Publisher, 2019, 311 p.
5. Business models for MaaS [Biznes-modeli dlya MaaS]. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/321623880_Business_models_for_MaaS. Last accessed 21.12.2020.
6. Dunaev, O. N. Management of changes in business models of companies [Upravlenie izmeneniyami biznes-modelei kompanii]. *Logistika*, 2020, Iss. 8 (165), pp. 29–31. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44043248/>. Last accessed 21.12.2020.
7. Lamanova, V. A. Scale economics at the railway enterprise [Effekt masshtaba na zheleznodorozhnom predpriatii]. *Economics*, 2020, Iss. 2 (45), pp. 77–82. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/effekt-masshtaba-na-zheleznodorozhnom-predpriatii/pdf>. Last accessed 21.12.2020.
8. Capitalism of platforms [Kapitalizm platform]. Transl. from English and scientific ed. M. Dobryakova. National Research University Higher School of Economics. Moscow, Publishing house of Higher School of Economics, 2019, 128 p.
9. Joshua Cooper Ramo. Seventh Sense. Under the sign of unpredictability [Sedmoe chuvstvo. Pod znakom nepredskazuemosti]. Moscow, Eksmo, 2017, 247 p.
10. Moazed, A., Johnson, N. Platform: Practical application of the revolutionary business model [Platforma: prakticheskoe primeneniye revolyutsionnoi biznes-modeli]. Transl. from English. Moscow, Alpina Publisher, 2019, 288 p. [Electronic resource]: <https://znanium.com/read?id=352338>. Last accessed 21.12.2020.
11. Wile, P., Warner, S. Digital transformation of business: Changing the business model for a new generation organization [Tsifrovaya transformatsiya biznesa: Izmenenie biznes-modeli dlya organizatsii novogo pokoleniya]. Transl. from English. Moscow, Alpina Publisher, 2019, 257 p. ●





Индикатор для оценки обеспеченности подвижным составом городского пассажирского транспорта общего пользования



Иосиф СПИРИН



Юлия ГРИШАЕВА



Ольга МАТАНЦЕВА

Спирин Иосиф Васильевич – ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ»), Москва, Россия.

Гришаева Юлия Михайловна – ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ»), Москва, Россия.

Матанцева Ольга Юрьевна – ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ»), Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*.

Целью статьи являются разработка и обоснование адекватности предлагаемого индикатора для оценки обеспеченности подвижным составом городского пассажирского транспорта (ГПТ). В качестве такого индикатора рекомендовано использовать расчётный показатель – условное стоимостное транспортное средство. Используемые в настоящее время показатели, характеризующие обеспеченность ГПТ транспортными средствами, учитывают только натуральное число последних. Это не обеспечивает оценки провозных возможностей ГПТ с учётом сложившихся условий эксплуатации (реальные эксплуатационные скорости движения на маршрутах ГПТ, сложившийся уровень коэффициента выпуска подвижного состава на маршруты). Предложенный индикатор обеспеченности подвижным составом учитывает не только натуральное число транспортных средств, но и их пассажироместность, указанные существенные технико-эксплуатационные показатели парка транспортных средств. За базу для оценки провозной способности парка подвижного состава принят условный стоимостный автобус, выполняющий перевозки на маршрутах со средней эксплуатационной скоростью движения. Для реальных автобусов эта базовая единица корректируется в соответствии с реальными

скоростями движения и сложившимися значениями технико-эксплуатационных показателей. Аналогичная корректировка выполняется для реальных троллейбусов и вагонов трамвая, что позволяет нивелировать эксплуатационные различия подвижного состава различных видов ГПТ с целью их взаимного сопоставления по провозной возможности.

Использованная при подготовке статьи методология опирается на комплексное применение научных знаний в областях прикладной науки об эксплуатации транспорта, статистики (статистическое наблюдение и учёт работы ГПТ), сравнительного анализа индикаторов, применяемых в различных отраслях, в частности, в сельском хозяйстве для оценки уровня обеспеченности основными производственными средствами (условный трактор), бенчмаркинга исследований и разработок российских и зарубежных авторов по проблеме совершенствования деятельности ГПТ.

Индикатор предназначен для использования при разработке и оценке уровня исполнения программ развития ГПТ и городской среды обитания, анализа качества транспортного планирования и обслуживания пассажиров ГПТ, сравнений обеспеченности транспортными средствами различных городов.

Ключевые слова: городской пассажирский транспорт, индикатор, транспортные средства, обеспеченность населения, планирование перевозок.

*Информация об авторах:

Спирин Иосиф Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ»), Москва, Россия, ivspirin@yandex.ru.

Гришаева Юлия Михайловна – доктор педагогических наук, доцент, заведующая аспирантурой ОАО «НИИАТ», Москва, Россия, j.m.g@mail.ru.

Матанцева Ольга Юрьевна – доктор экономических наук, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора ОАО «НИИАТ» по научной работе, профессор Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, omat@niiat.ru.

Статья поступила в редакцию 02.11.2020, принята к публикации 29.12.2020.

For the English text of the article please see p. 229.

ВВЕДЕНИЕ

В России наибольшее число пассажиров перевозится транспортом общего пользования (ТОП) в городах и их пригородных зонах. По данным сайта Минтранса России в 2018 г. от общего числа пассажиров в городском сообщении 46,3 % были перевезены автобусами, по 11,4 %, соответственно, — трамваями и троллейбусами, 30,6 % — метрополитенами (остальные — такси). Государство и муниципальные органы управления осуществляют меры поддержки ТОП и обеспечения его устойчивого развития [1–3].

Рационализация состава транспортных средств городского пассажирского транспорта (ГПТ) приобретает особое значение в условиях реализации концепции устойчивого развития социально-экономических отношений. Устойчивое развитие означает сбалансированный подход к решению совокупности экономических, социальных и экологических проблем. Городской пассажирский транспорт общего пользования имеет особое значение для обеспечения развития городов по устойчивому сценарию. Поэтому ГПТ стал пионером в деле устойчивого развития [1; 3].

Надлежащий учёт провозных возможностей парка подвижного состава ГПТ необходим при разработке и оценке выполнения программ развития транспорта, организации перевозок пассажиров, определении необходимого бюджетного финансирования городского транспорта и при установлении уровня качества транспортного обслуживания населения городов [4–8].

Для осуществления указанных функций учёта необходим индикатор уровня обеспеченности населения городов подвижным составом ГПТ. Определение значения этого индикатора должно быть основано на имеющихся данных статистического наблюдения и не вызывать методических затруднений при расчётах. Следует использовать в качестве индикатора такой показатель, который даст возможность определять обеспеченность подвижным составом как отдельно по видам ГПТ, так и устанавливать совокупную (интегральную) оценку обеспеченности в целом по городу. Индикатор также должен обладать «физическим смыслом», что обеспечит наглядность его использования.

В настоящее время, в России действующее государственное статистическое наблю-

дение предусматривает учёт числа единиц подвижного состава различных видов транспорта общего пользования в натуральном выражении. Транспортными организациями также учитываются и аккумулируются данные о планируемых и достигнутых значениях технико-эксплуатационных показателей (ТЭП) подвижного состава и ТЭП маршрутов регулярных перевозок пассажиров.

Целью статьи является обоснование индикатора обеспеченности населения городов подвижным составом городского пассажирского транспорта общего пользования, учитывающего помимо наличия транспортных средств также их пассажировместимость и эксплуатационные условия работы на маршрутах.

Методология, использованная при подготовке статьи, включает в себя комплекс знаний из областей:

- прикладной науки об эксплуатации транспортных систем и автомобильного транспорта;
- статистического наблюдения и ведомственного учёта услуг ГПТ;
- практического применения показателей (индикаторов) для оценки обеспеченности производственными средствами. В частности — понятия «условного трактора», используемого в сельскохозяйственном производстве;
- результатов анализа публикаций российских и зарубежных авторов, в которых рассматриваются подходы к определению необходимого парка подвижного состава ГПТ, и установлению целесообразных индикаторов оценки обеспеченности производственными средствами при выполнении работ и оказании услуг.

РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ГПТ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Изучение научно-технической литературы (около 250 источников) показало, что определение необходимого уровня обеспеченности ГПТ подвижным составом производится с использованием следующих двух подходов.

Во-первых, на основе установления потребного числа транспортных средств для каждого из маршрутов с последующим агрегированием полученных результатов для системы маршрутов населённого пункта (расчёт «снизу вверх»). Использование такого



подхода не позволяет нивелировать влияние экзогенных (внешних) факторов организации перевозок, поскольку для каждого из маршрутов число единиц подвижного состава определяется исходя из действующих на данный момент конфигурации улично-дорожной сети, условий дорожного движения на ней и концепции (модели), на основе которой сформирована система маршрутов ГПТ рассматриваемого населённого пункта [5, с. 165–185]. Данный подход используется для текущего установления потребности в транспортных средствах и организации перевозок на маршрутах ГПТ (иначе говоря, в настоящем времени).

Во-вторых, как установление усреднённого норматива обеспеченности подвижным составом территории населённого пункта или его населения с целью последующего использования в разработке перспективных проектов совершенствования транспортных систем городов, в том числе на основе концепции устойчивого развития. Такой подход также может применяться для выполнения сравнительных оценок развития городского транспорта. Сфера использования этого подхода – будущие периоды работы транспортных систем городов (планирование транспортной деятельности). Так, в монографии [5, с. 144–145] рассмотрена методика минимально допустимой нормативной обеспеченности городской территории автобусами в зависимости от средней дальности поездки пассажира.

В статье [9] представлен аналитический обзор публикаций по направлению институциональной экономики ГПТ, предусматривающей изучение перевозок пассажиров транспортом общего пользования с учётом «внешнего окружения», включающего проблемы не только на уровне микроэкономики транспортных организаций, но также учёт внутригородской политики, комплекса социальных отношений, экстерналий результатов транспортной деятельности и пр. Такой подход приведёт к существенным изменениям условий, в которых станет в перспективе работать ГПТ. Вопросы учёта экстерналий последствий работы городского транспорта также были поставлены нами в работе [1].

В перспективе внедрение в практику транспортного планирования и эксплуатации ГПТ положений концепции умного города (smart city) позволит изменить подходы к нормированию обеспеченности городов подвиж-

ным составом транспорта общего пользования. Средства транспортной телематики и спутниковой навигации обеспечат возможность оперативного формирования трасс городских маршрутов и выделения для них необходимого подвижного состава. Однако, перевозки по таким маршрутам будут осуществляться преимущественно автобусами и электробусами малой вместимости. Маршруты с мощными пассажиропотоками будут эксплуатироваться с использованием устоявшейся технологии перевозок [1; 10]. Для установления потребности оперативных маршрутов в подвижном составе необходимо уметь прогнозировать пассажиропотоки на краткосрочный период. В настоящее время исследования в этом направлении осуществляются китайскими учёными [11].

Статистические данные Росстата и Минтранса России об обеспеченности автобусами общего пользования (см. пример на рис. 1)¹ и транспортными средствами других видов ГПТ показывают значительные разбросы по годам наблюдения и существенные различия между субъектами Российской Федерации.

Такие изменения объясняются неравномерным экономическим и социальным развитием субъектов, различиями доли городского и сельского населения на их территориях, участием в перевозках пассажиров иных видов транспорта, размерами территорий, структурой дорожной и уличной сети, числом и людностью населённых пунктов на территориях субъектов, переменами в динамике движения парка транспортных средств (списание и пополнение), структурой использования транспортных средств по видам сообщения и прочими причинами. Это подтверждает необходимость использования индикатора обеспеченности подвижным составом, учитывающего существенные факторы, обуславливающие подобные различия.

ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ ГПТ

Статистическое наблюдение аккумулирует информацию о наличии подвижного состава в натуральных единицах используемых транспортных средств (автобус, троллейбус,

¹ Аналогичные примеры можно привести по другим видам пассажирского транспорта и для остальных федеральных округов, субъектов Российской Федерации.

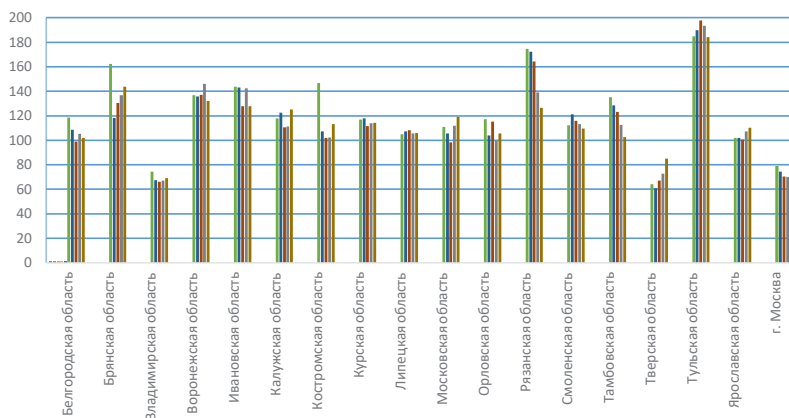


Рис. 1. Обеспеченность автобусами транспорта общего пользования субъектов Центрального федерального округа Российской Федерации по данным Росстата: по оси ординат указано число автобусов на 100 тыс. жителей, ед.; вертикальные столбики показывают обеспеченность на конец года в 2015–2019 гг.

вагон). При этом не учитывается, что в зависимости от модели подвижного состава каждая его единица имеет определённую пассажироместность. Пассажироместность оказывает существенное влияние на провозную способность транспортного средства.

Провозную способность автобусов, троллейбусов и трамваев существенно ограничивают технико-эксплуатационные показатели использования парка подвижного состава, прежде всего — эксплуатационная скорость $V_{\text{ср}}$ движения на регулярных маршрутах. Для средних условий эксплуатации эта скорость примерно равна:

- для автобусов — 18 км/ч;
- троллейбусов — 17 км/ч;
- вагонов трамвая — 16 км/ч;
- поездов метрополитена — 36 км/ч;
- автобусов особо малой пассажироместности, эксплуатируемых в режиме движения маршрутных такси — 23 км/ч.

Повышение эксплуатационной скорости движения на маршрутах ГПТ позволяет увеличить число рейсов за сравнимое время. В свою очередь, это приводит к увеличению провозных возможностей транспорта общего пользования и сокращению затрат времени пассажиров на поездки [5; 8]. При расчётах обеспеченности подвижным составом определённого города следует принимать во внимание не указанные средние значения эксплуатационной скорости движения, а использовать фактические данные о работе ГПТ в этом городе.

На провозную способность используемых транспортных средств также влияют:

- средняя длина маршрута. Чем короче маршрут, тем большую долю времени оборотного рейса на нём занимают задержки на конечных остановочных пунктах, связанные с оборотом подвижного состава (выполнение технологически обусловленных операций на конечном пункте маршрута, кратковременный отдых водителя, перевод транспортного средства на обратное направление движения). Однако отдельно принимать во внимание влияние длины маршрута на провозную возможность транспортных средств нет необходимости, поскольку задержки на конечных остановочных пунктах фактически уже учтены при нормировании эксплуатационной скорости движения на каждом маршруте, в каждом рейсе;

- коэффициент непрямолинейности маршрута (маршрутов). Очевидно, что перемещение транспортного средства в пространстве по непрямолинейному маршруту от начального до конечного остановочного пункта происходит медленнее, по сравнению со спрямлённым маршрутом.

Очевидно, что у транспортных организаций ГПТ нет значительных возможностей беспрепятственного спрямления участков маршрутной системы, начертание которой тесно связано со структурой улично-дорожной сети города.

Разумеется, добиться полной прямолинейности всех маршрутов невозможно. В связи с этим, согласно нашим исследованиям, повышенная непрямолинейность маршрутов приводит к перерасходу не менее 10...15 % ресурсов, в первую очередь по ве-



дущим статьям себестоимости перевозок. Прежде всего, это расходы, связанные с пробегом транспортных средств, а именно:

- на горючее и электроэнергию, потребляемые транспортными средствами;
- заработную плату водителей транспортных средств;
- выполнение технического обслуживания и текущего ремонта транспортных средств.

Принимая во внимание изложенное, актуально введение в научный оборот показателя, который будет учитывать указанные факторы, влияющие на производительность подвижного состава на маршрутах регулярных перевозок пассажиров. Такой показатель может служить адекватным индикатором уровня обеспеченности подвижным составом городского населения.

Использование индикатора позволит оценивать и сопоставлять уровни обеспеченности транспортными средствами ГПТ различных городов, определять приоритетность финансирования развития парка подвижного состава, осуществлять комплекс мероприятий по организации перевозок в соответствии с Федеральным законом «Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 13.07.2015 г. № 220-ФЗ (с изм., далее — ФЗ № 220), Социальным стандартом транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским электрическим транспортом (распоряжение Минтранса РФ от 31 января 2017 г. № НА-19-р, далее — Социальный стандарт), другими отраслевыми стандартами и строительными правилами².

Легитимацию рассматриваемого индикатора для практического использования предлагается осуществлять включением его в состав стандартов транспортного обслуживания населения, разрабатываемых на основе научно обоснованной методологии [12].

² Например, СП 42.13330.2011. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89 (с поправкой). Введён в действие с 20.05.2011 г. — М.: Минрегион России, 2011. — 109 с.

АНАЛОГ ИНДИКАТОРА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Изучение опыта использования показателей обеспеченности основным производственным оборудованием в различных отраслях народного хозяйства позволило установить ближайший аналог для оценки уровня обеспеченности подвижным составом ГПТ. Таким аналогом является используемый в сельскохозяйственном производстве условный (эталонный) трактор — УЭТ.

За УЭТ принят трактор, обеспечивающий обработку одного условного га земли за 1 ч сменного времени. При этом за эталонный гектар принимают соответствующий по площади участок пахотных земель с определёнными средними характеристиками: удельное сопротивление почвы, глубина пахоты, рельеф (ровный), прямоугольная конфигурация, длина гона за проход по участку, высота над уровнем моря, агрофон (наличие стерни зерновых культур в сочетании с определённой влажностью почвы), отсутствие каменистости и других препятствий в почве.

Таким образом, использование в расчётах эталонного гектара учитывает средние условия эксплуатации УЭТ. За базу для перевода натурального числа тракторов в условные эталонные трактора принята выработка последних. В качестве УЭТ ранее рассматривали трактор ДТ-75 или Т-74.

В настоящее время Минсельхозом РФ рекомендованы³ к рассмотрению ТЭ-100 (близкий по параметрам к трактору ДТ-75Д), ТЭ-150 (близкий по параметрам к трактору Т-150-05-09) [13].

По аналогии с УЭТ, в качестве индикатора обеспеченности подвижным составом ГПТ жителей городов предлагается использовать условное транспортное средство (УТС). Учитывая, что автобусы составляют наибольшую долю численности подвижного состава ГПТ, за УТС рекомендуется принять автобус вместимостью 100 пассажиров — условный стоместный автобус. При этом стоместный эквивалент исполь-

³ Методика использования условных коэффициентов перевода тракторов, зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов в эталонные единицы при определении нормативов их потребности: инструктивно-методическое издание. — М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. — 56 с.

зован исключительно для удобства выполнения расчётов по предлагаемой методике. Для удобства дальнейшего изложения введём обозначения условного транспортного средства — $УТС_{100}$ и равного ему условного стоместного автобуса $УА_{100}$. $УТС_{100} = УА_{100}$.

Примем во внимание, что работа на маршрутах $УТС_{100}$ рассматривается в эталонных (обычных, средних) эксплуатационных условиях. При этих условиях средняя эксплуатационная скорость движения маршрутного автобуса $V_3 = 18$ км/ч.

Подвижной состав городского наземного электрического транспорта имеет иные средние эксплуатационные скорости: для троллейбусов V_3 равна 17 км/ч, а для вагонов трамвая — 16 км/ч. Учитывая это обстоятельство, введём в рассмотрение условные стоместные троллейбус ($УТр_{100}$) и вагон трамвая ($УВТ_{100}$).

Используя введённые обозначения с учётом средних условий эксплуатации подвижного состава ГПТ, получаем следующие зависимости:

$$УТр_{100} = УТС_{100} \cdot 17:18 = 0,944 УТС_{100};$$

$$УТС_{100} = 1,059 УТр_{100};$$

$$УВТ_{100} = УТС_{100} \cdot 16:18 = 0,888 УТС_{100};$$

$$УТС_{100} = 1,126 УВТ_{100}.$$

Исходя из того, что $УА_{100} = 1,059 УТр_{100} = 1,126 УВТ_{100}$ получаем:

$$УТр_{100} = 1,063 УВТ_{100} \text{ и } УВТ_{100} = 0,94 УТр_{100}.$$

Полученные зависимости справедливы для усреднённых условий эксплуатации транспортных средств. Для реальных условий эксплуатации в определённом городе указанные скорости движения должны быть откорректированы в соответствии со сложившимися обстоятельствами.

ПРИВЕДЕНИЕ НАТУРАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ К СТОМЕСТНОМУ ТРАНСПОРТНОМУ СРЕДСТВУ

При определении уровня обеспеченности учитываться должны не среднесписочные единицы подвижного состава, находящиеся на балансе транспортных организаций или арендованные ими — A_{cc} , а ходовые — A_x , используемые для работы на маршрутах регулярных перевозок. Число ходовых единиц равно произведению A_{cc} на безразмерный коэффициент выпуска на линию — α_b , фактически сложившийся или расчётный на

обозримую перспективу (в зависимости от целей использования).

Каждый натуральный автобус, троллейбус или вагон соответствует A_p расчётным $УТС_{100}$ с учётом поправочного коэффициента, численно равного отношению пассажировместимости приводимой единицы подвижного состава к расчётно-условной единице с вместимостью 100 пассажиров. Например, автобус пассажировместимостью 63 пассажира эквивалентен $63/100 = 0,63 УТС_{100}$, а троллейбус пассажировместимостью 113 пассажиров эквивалентен $113/100 = 1,13 УТС_{100}$.

Помимо пассажировместимости, необходимо учитывать также эксплуатационную скорость движения. В итоге для определения числа условных стоместных ТС A_p предлагается пользоваться следующей зависимостью:

$$A_p = \frac{A_{cc} \cdot \alpha_b \cdot q \cdot V_3}{1800}, \quad (1)$$

где q — пассажировместимость одного транспортного средства, пасс.;

1800 — переводной коэффициент, полученный умножением пассажировместимости условного ТС (100 пасс.) на среднюю эксплуатационную скорость движения базового ТС — автобуса, т.е. 18 км/ч, и имеющий размерность [пасс. • км/ч].

Пример определения числа УТС представлен в табл. 1.

Как видно из этой таблицы, число приведённых УТС на 46 % меньше числа среднесписочных ТС. Из рассмотренного примера следует, что использование при оценке обеспеченности подвижным составом только среднесписочного числа ТС может вносить недопустимо большую погрешность в получаемые результаты.

Таким образом, основной отличительной особенностью предложенной методики от известных подходов к определению обеспеченности подвижным составом является учёт выработки транспортных средств, а не только его наличия в организациях ГПТ, исчисляемого в натуральных единицах. Рассмотренный индикатор отражает наличие подвижного состава с учётом различной пассажировместимости эксплуатируемых транспортных средств ГПТ, эксплуатационной скорости движения на маршрутах, других технико-эксплуатационных показателей, обуславливающих фактические результаты использования подвижного состава. Поэтому использо-



Таблица 1

Пример расчёта числа условных стоместных ТС (данные усреднены; при расчётах в реальных ситуациях следует использовать фактические значения) (составлено авторами)

Вид ГПТ	Данные о подвижном составе				$V_{\text{ср}}$, км/ч	Число условных ТС, ед.
	$A_{\text{ср}}$, ед.	α_n	A_n , ед.	q , пасс.		
Автобус	133	0,83	110,39	45	18	49,68
	72	0,79	56,88	76		42,23
	51	0,91	46,41	92		42,70
	23	0,85	19,55	120		24,46
	50	0,93	46,50	11	23	6,54
Троллейбус	44	0,86	37,84	90	17	32,16
	16	0,83	13,28	120		15,05
Трамвай	66	0,79	52,14	60	16	27,81
	49	0,85	41,65	80		29,62
Итого	504	—	—	—	—	270,25

вание предложенного индикатора будет способствовать адекватному сопоставлению и оценкам провозной возможности парка транспортных средств и рационализации расходов на его реновацию и развитие.

Обратим внимание также на то, что предложенная методика определения обеспеченности подвижным составом опирается на использование при расчётах имеющейся учётно-статистической информации.

КОРРЕКТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ КОНТИНГЕНТА ПассажиРОВ ГПТ ПРИ РАСЧЁТАХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ

В целях нормирования минимальной обеспеченности подвижным составом ГПТ необходимо определить критический уровень значения этого показателя. Подчёркнём, что критический уровень не соответствует минимальному значению обеспеченности, установленному стандартами транспортного обслуживания. Критический уровень может быть значительно меньше стандартизованного значения и устанавливается исходя из возможности перевозок пассажиров с преобладающей ролью ГПТ общего пользования в осуществлении перевозок населения. Разумным для обеспечения такой возможности представляется требование выполнения не менее 50 % всех перевозок пассажиров с использованием ГПТ общего пользования. В противном случае ГПТ будет иметь в городских перевозках вспомогательное значение.

Выполненное в 1991–2005 гг. экспериментальное исследование временной динамики обеспеченности городов России расчётными стоместными автобусами (рис. 2) в сопоставлении с экспериментально установленной транспортной подвижностью городского населения показало, что критическое значение уровня этой обеспеченности в расчёте на тысячу жителей равно примерно 0,54 расчётных автобуса. В 1994–1997 гг. качество транспортного обслуживания было очень низким, в частности, уровень обеспеченности был ниже указанного критического значения [5, с. 145]. Таким образом, гипотетически предложенный критический уровень 0,54 ед. был подтверждён произошедшим в указанный промежуток времени кризисом транспортного обслуживания.

В последние годы обеспеченность транспортными средствами ГПТ, несмотря на некоторое сокращение парка подвижного состава, улучшилась. Существенное значение на это оказала развивающаяся автомобилизация населения, при которой потенциальный контингент пассажиров ГПТ имеет тенденцию к сокращению.

Коэффициент обеспеченности городов подвижным составом общего пользования представляет собой соотношение натурального числа УТС, состоящих на балансе транспортных организаций ГПТ города, к нормативному числу таких транспортных средств. Определение этого коэффициента выполняют по методике, рассматриваемой в настоящей статье.

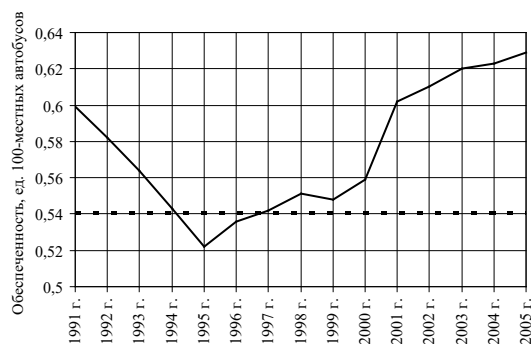


Рис. 2. Критический уровень и динамика обеспеченности условными автобусами в период наибольшего снижения качества транспортного обслуживания на ГПТ (выполнено авторами).

Учитывая, что автомобилизация «перетягивает на себя» часть потенциальных пассажиров ГПТ, при расчётах обеспеченности следует исходить не из полной численности населения определённых городов, а делать поправку на соответствующее сокращение пользователей услугами ГПТ. В первом приближении рекомендуется использование следующей зависимости для определения численности контингента потенциальных пассажиров ГПТ ($N_{\text{ГПТ}}$):

$$N_{\text{ГПТ}} = 0,8 \frac{N \cdot A_{1997}}{A}, \quad (2)$$

где 0,8 — эмпирический коэффициент, учитывающий полноту использования парка автомобилей, находящихся в собственности жителей города;

N — численность населения города (люди) на конец года, предшествовавшего расчётному периоду времени, тыс. чел.;

A_{1997} — численность парка легковых автомобилей в собственности жителей города на конец 1997 г., ед. Указанный год выбран за базу для сопоставления в связи с тем, что в 1997 г., согласно рис. 2, обеспеченность транспортными средствами ГПТ была минимальной;

A — численность парка легковых автомобилей в собственности жителей города на конец года, предшествующего расчётному периоду времени, ед.

При расчётах обеспеченности подвижным составом определённых городов необходимо также учитывать не только постоянное их население, но и дополнительное дневное население (лиц, приезжающих на работу или учёбу из пригородной зоны).

Отметим, что формула (2) даёт результат, являющийся лишь первым приближением к истинному значению $N_{\text{ГПТ}}$, и для получения более точного результата необходимо выполнение дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в статье методика оценки и нормирования обеспеченности ГПТ подвижным составом с учётом реальных эксплуатационных условий его использования позволяет обосновывать проекты развития парка транспортных средств ГПТ общего пользования, устанавливать объективно необходимый лимит денежных средств, направляемых на финансирование деятельности транспорта общего пользования, сопоставлять результаты использования для перевозок пассажиров транспортных средств различных видов ГПТ (с учётом присущих этим видам транспорта затрат и производительности использования ТС на маршрутах).

Изложенный подход к построению индикатора обеспеченности подвижным составом ГПТ может быть дополнен корректировками его нормативного значения с учётом других факторов (приведённая в статье корректировка численности контингента пассажиров является частным случаем таких действий). Также по аналогии возможна разработка индикаторов обеспеченности подвижным составом для других видов транспорта и перевозок грузов.

При том, что расчёты выполнялись с использованием нормативной базы и статистических данных применительно к Российской Федерации, предложенная методология может быть адаптирована к условиям других стран и городов.





Практическое использование показателя УТС в качестве индикатора обеспеченности городов подвижным составом транспорта общего пользования возможно в следующих ситуациях:

- разработка проектов развития транспортных систем городов, проектов расширения парка подвижного состава ГПТ;
- сравнение реальной провозной возможности транспортных средств различных видов ГПТ, в том числе при организации различных форм организации движения на маршрутах (поостановочное, экспрессное, полукспрессное, скоростное сообщение);
- оценка и анализ сложившейся ситуации в обеспеченности подвижным составом городов;
- обеспечение расчётов по устойчивому развитию городской среды и транспортной инфраструктуры, в том числе с целью обеспечения исполнения требований действующего социального стандарта и строительных правил. Отметим, что проектирование устойчивых транспортных систем выдвигает повышенные требования к кадровому обеспечению как проектировщиков, так и эксплуатационников.

В связи с этим необходимой представляется модернизация профессионального образования и повышения квалификации кадров на транспорте. Основные рекомендации в сфере решения этой проблемы изложены в работах [14; 15].

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-razvitiye-transporta-v-gorodah-rossii-opyt-i-aktualnye-zadachi/pdf>. Доступ 23.12.2020.
2. Донченко В. В. Проблемы обеспечения устойчивого функционирования городских транспортных систем: Монография. — М.: ИКФ «Каталог», 2005. — 184 с. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24133949>. Доступ 23.12.2020.
3. Донченко В. В., Кунин Ю. И., Казьмин Д. М., Мехоношин В. В. Проблемы устойчивого развития городских транспортных систем в Российской Федерации // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник ВИНТИ РАН. — 2008. — № 7. — С. 37–46.
4. Асалиев А. М., Завьялова Н. Б., Сагинова О. В., Спирин И. В., Скоробогатых И. И. и др. Маркетинговый подход к управлению качеством транспортного обслуживания: Монография / Под ред. к.т.н. Н. Б. Завьяловой, д.э.н. О. В. Сагиновой, д.т.н. И. В. Спирина. — Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2016. — 172 с.

[Электронный ресурс]: <https://www.rea.ru/ru/org/cathedries/prlogkaf/Documents/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82.pdf>. Доступ 23.12.2020.

5. Спирин И. В. Научные основы комплексной реструктуризации городского пассажирского транспорта: Монография. — М.: Каталог, 2007. — 200 с. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19847033>. Доступ 23.12.2020.

6. Якимов М. Р. Научная методология формирования эффективной транспортной системы крупного города / Автореф дис... док. техн. наук. — М.: МАДИ, 2011. — 418 с. [Электронный ресурс]: https://new-dissert.ru/_avtoreferats/01005513620.pdf. Доступ 23.12.2020.

7. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/902132678>. Доступ 23.12.2020.

8. Papagostas, C. G. Fundamentals of Transportation Engineering. A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs, New Jersey, 1987, 458 p. [Электронный ресурс]: http://simkeu.unigoro.ac.id/fundamentals_of_transportation_engineering_by_papacostas.pdf. Доступ 23.12.2020.

9. Canitez, F. Urban public transport systems from new institutional economics perspective: a literature review. Transport Reviews, 2019, Vol. 39, pp. 511–530. [Электронный ресурс]: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2018.1552631?scroll=top&needAccess=true>. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1552631>. Доступ 23.12.2020.

10. Horažďovský, P., Kozhevnikov, S., Svitek, M. Dynamic Public Transport. Smart city symposium in Prague. Proceedings of Smart Cities Symposium Prague (SCSP). Czech Republic, 2019. [Электронный ресурс]: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8805716>. Доступ 23.12.2020.

11. Huawei, Zhai; Licheng, Cui; Yu, Nie; Xiaowei, Xu; Weishi, Zhang. A Comprehensive Comparative Analysis of the Basic Theory of the Short-Term Bus Passenger Flow Prediction (Review). Symmetry-Basel, 2018, Vol. 10, Iss. 9, Article Number 369. DOI: 10.3390/sym10090369. Доступ 23.12.2020.

12. Донченко В. В., Ибраев К. А., Енин Д. В., Евсеев О. В. Методологические подходы к разработке и применению стандартов транспортного обслуживания населения // Автотранспортное предприятие. — 2016. — № 6. — С. 22–25. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26165081>. Доступ 23.12.2020.

13. Юрков М. М., Борисов Н. С. Методика определения коэффициента перевода в условные эталонные трактора // Техника и технологии. — 2020. — № 1 (49). — С. 72–74. DOI: 10.35694/YARCX.2020.49.1.015. Доступ 23.12.2020.

14. Grishaeva, Yu. M., Spirin, I. V., Matantseva, O. Yu. Aspects of Professional Education in the Higher School in the Interests of the Techno-Sphere Safety. Modern Research of Social Problems (Online Scientific Journal), 2016, Vol. 9 (65), pp. 5–18. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/aspects-of-professional-education-in-the-higher-school-in-the-interests-of-the-techno-sphere-safety/pdf>. Доступ 23.12.2020.

15. Ноосферное образование в евразийском пространстве. — Т. 8: Ноосферное образование как механизм становления ноосферной России: коллективная монография / Под ред. А. И. Субетто. — СПб.: Астерион, 2018. — 588 с. [Электронный ресурс]: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0001/005d/2225-mn.pdf>. Доступ 23.12.2020. ●



Indicator for Assessing Availability of Rolling Stock for Public Urban Passenger Transport



Iosif V. SPIRIN



Yulia M. GRISHAEVA



Olga Yu. MATANTSEVA

Spirin, Iosif V., JSC Scientific Research Institute of Road Transport (JSC NIIAT), Moscow, Russia.

Grishaeva, Yulia M., JSC Scientific Research Institute of Road Transport (JSC NIIAT), Moscow, Russia.

Matantseva, Olga Yu., JSC Scientific Research Institute of Road Transport (JSC NIIAT), Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia.*

ABSTRACT

The objective of the article is to develop and to substantiate adequacy of the proposed indicator for assessing availability of rolling stock for urban mass transit or urban passenger transport (UPT). As such an indicator, it is recommended to use a calculated indicator: a conventional one-hundred-seat vehicle. The currently used indicators characterising provision of UPT with vehicles, consider only the physical number of the latter. This does not provide an assessment of carrying capacity of UPT, considering the existing operating conditions (real operating speeds on the routes of UPT, the existing level of the coefficient of the fleet being used on the routes as compared to the total number of fleet units, etc.). The proposed indicator of availability of the rolling stock considers not only the natural number of vehicles, but also their passenger capacity, the indicated significant technical and operational indicators of the vehicle fleet. The basis for assessing the carrying capacity of the rolling stock fleet is a conventional one-hundred-seat bus, which performs transportation on routes with an average operating speed. For real buses, this basic unit is adjusted in

accordance with real travel speeds and the prevailing values of technical and operational indicators. A similar adjustment is performed for real trolleybuses and tram cars, which makes it possible to level the operational differences in the rolling stock of various types of UPT to compare them in terms of carrying capacity.

The methodology used in preparation of the article is based on the integrated use of scientific knowledge in the fields of applied science on operation of transport, statistics (statistical observation and accounting of the work of UPT), a comparative analysis of indicators used in various industries, in particular, in agriculture to assess the level of provision with the main production vehicles (conventional tractor), benchmarking research and development of Russian and foreign authors on the problem of improving operation of UPT.

The indicator is intended for use in development and assessment of the level of implementation of programs for development of UPT and the urban environment, analysis of the quality of transport planning and services provided to passengers, comparisons of provision with vehicles in different cities.

Keywords: urban passenger transport, indicator, vehicles, population security, transportation planning.

*Information about the authors:

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

Grishaeva, Yulia M. – D.Sc. (Pedagogics), Associate Professor, Head of Ph.D. Studies Department of JSC Scientific Research Institute of Motor Transport (JSC NIIAT), Moscow, Russia, j.m.g@mail.ru.

Matantseva, Olga Yu. – D.Sc. (Economics), Ph.D. (Eng), Deputy General Director of JSC Scientific Research Institute of Motor Transport (JSC NIIAT) for scientific work, Professor at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, omat@niat.ru.

Article received 02.11.2020, accepted 29.12.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 220.

Background. In Russia, the largest number of passengers are transported by public transport (PT) in cities and their suburban areas. According to the website of the Ministry of Transport of Russia, in 2018, 46,3 % of the total number of passengers in urban traffic were transported by buses, 11,4 % of passengers were transported equally, by trams and trolleybuses, 30,6 % by metro (the rest were transported by taxi). The state and municipal authorities carry out measures to support PT and ensure its sustainable development [1–3].

Rationalization of the composition of vehicles of urban passenger transport (UPT) is of particular importance in the context of implementation of the concept of sustainable development of socio-economic relations. Sustainable development means a balanced approach to solving a set of economic, social, and environmental problems. Public urban passenger transport is of particular importance for ensuring sustainable urban development. Therefore, UPT became a pioneer in sustainable development [1; 3].

A proper accounting of carrying capacity of the rolling stock fleet of UPT is necessary when developing and evaluating implementation of transport development programs, organizing passenger transportation, determining the necessary budgetary funding for urban transport and when establishing the quality level of transport services for the population of cities [4–8].

To carry out these accounting functions, an indicator of the level of provision of the urban population with the rolling stock of UPT is required. Determination of the value of this indicator should be based on the available statistical observation data and should not cause methodological difficulties in calculations. An indicator should be used so that to make it possible to determine availability of rolling stock both separately by the types of UPT, and to establish an aggregate (integral) assessment of its availability in the city. The indicator should also have a «physical meaning», which will provide clarity of its use.

Currently, the state statistical monitoring in Russia provides for registration of the number of rolling stock units of various types of public transport in physical terms. Transport organisations also consider and accumulate data on the planned and achieved values of technical and operational indicators (TOI) of

rolling stock and TOI of routes for regular passenger transportation.

The *objective* of the article is to substantiate the indicator of provision of urban population with the rolling stock of public urban passenger transport, considering, in addition to availability of vehicles, their passenger capacity and operating conditions on the routes.

The *methodology* used in preparing the article includes a knowledge and methods from the following fields:

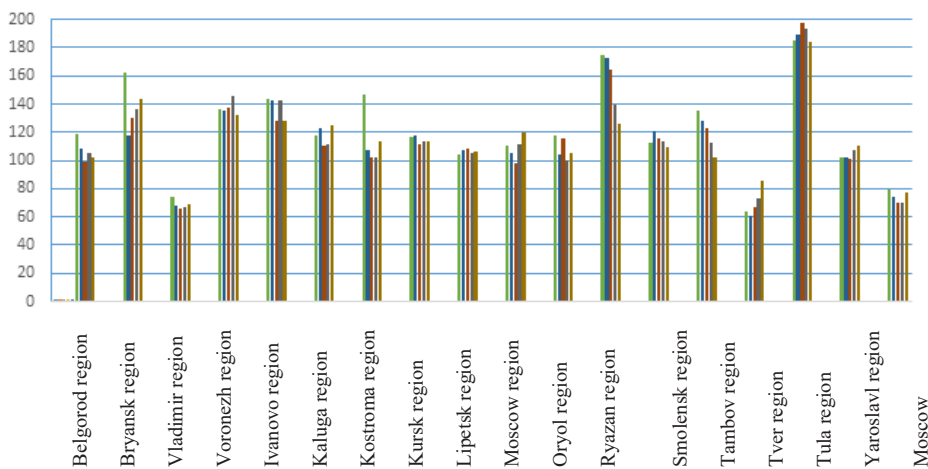
- Applied science in the field of operation of transport systems and road transport.
- Statistical data and departmental accounting of services provided by UPT.
- Practical application of indicators to assess supply of production assets. In particular — the concept of «conventional tractor» used in agricultural sector.
- The results of analysis of publications by Russian and foreign authors, considering approaches to determining the qualitative requirements with regard to rolling stock fleet of UPT, and establishing reasonable indicators for assessing availability of production facilities in performance of work and provision of services.

Developments in the field of determining the provision of UPT with vehicles

The study of scientific and technical literature (about 250 sources) has shown that determination of the required level of provision of UPT with rolling stock is carried out using the following two approaches.

The first one is based on identification of the required number of vehicles for each of the routes, followed by aggregation of the results obtained for the route system of the settlement («bottom-up» calculation). The use of this approach does not allow levelling the influence of exogenous (external) factors of organisation of transportation, since for each of the routes the number of rolling stock units is determined based on the current configuration of the road network, traffic conditions on it and the concept (model), based on which the route system of UPT of the settlement under consideration is formed [5, pp. 165–185]. This approach is used for current determination of the need for vehicles and organisation of transportation on the routes of UPT (in other words, in the present time).

Second approach is associated with the setting of an average standard for provision of



Pic. 1. Provision of public transport buses to the territorial entities of the Central Federal District of the Russian Federation according to Rosstat [Federal State Statistics Service] data: the ordinate indicates the number of buses per 100 thousand inhabitants, units; vertical bars show end-of-year availability in 2015–2019.

rolling stock to the territory of a settlement or its population for the purpose of subsequent use in development of promising projects to improve transport systems of cities, including projects based on the concept of sustainable development. This approach can also be applied to make comparative assessments of urban transport development. The scope of this approach regards future periods of operation of urban transport systems (planning of transport activities). So, in the monograph [5, pp. 144–145] the methodology of the minimum permissible normative provision of the urban area with buses, depending on the average distance of the passenger's trip, is considered.

The article [9] presents an analytical review of publications in the field of the institutional economics of UPT, which suggests the study of passenger transportation by public transport, considering the «external environment»: problems not only at the level of microeconomics of transport organisations, but also intracity policy, a complex of social relations, external results of transport activities, etc. This approach will lead to significant changes in the conditions under which UPT will work in the future. The issues of considering the external consequences of the operation of urban transport were also raised by us in [1].

In the long term, introduction of the provisions of the concept of a smart city into practices of transport planning and operation of UPT will change the approaches to regulation of the provision of cities with rolling stock of

public transport. Tools and devices of transport telematics and satellite navigation will provide the possibility to promptly trace the city routes and to provide them with necessary rolling stock. However, transportation on such routes will be carried out mainly by buses and small electric buses. Routes with powerful passenger traffic will be operated using the well-established transportation technology [1; 10]. To determine the need for operational routes in rolling stock, it is necessary to be able to predict passenger flows in the short term. Currently, research in this direction is carried out by Chinese scientists [11].

Statistical data of the Federal State Statistics Service [Rosstat] and the Ministry of Transport of Russia on provision of public buses (see example in Pic. 1)¹ and vehicles of other types of UPT show significant variations over the years of observation and significant differences between the constituent entities of the Russian Federation.

Such changes are explained by uneven economic and social development of the constituent entities, the differences in the proportion of the urban and rural population within their territories, participation of other types and modes of transport in passenger transportation, the size of the territories, the structure of the road and street network, the number and population

¹ Similar examples can be cited for other types of passenger transport and for other federal districts and territorial entities of the Russian Federation.





of settlements within the territories of the constituent entities, changes in the dynamics of traffic, in the fleet of vehicles (acquisition and decommissioning), the structure of the use of vehicles by type of routes, and by other reasons. This confirms the need to use the acquisition and decommissioning of rolling stock, considering the significant factors that cause such differences.

Factors affecting the provision of UPT with rolling stock

Statistical observation accumulates information on availability of rolling stock in natural units of vehicles used (buses, trolleybuses, cars). At the same time, it is not considered that, depending on the model and series of rolling stock fleet, each of its units has a certain passenger capacity. Passenger capacity has a significant impact on the carrying capacity of a vehicle.

The carrying capacity of buses, trolleybuses and trams is significantly limited by the technical and operational indicators of the use of the rolling stock fleet, first, by operational speed V_o of movement on regular routes. For average operating conditions, this speed is approximately equal to:

- for buses – 18 km/h;
- for trolleybuses – 17 km/h;
- for tram cars – 16 km/h;
- for metro trains – 36 km/h;

- for buses of especially small passenger capacity, operated in the route taxi mode – 23 km/h.

An increase in operational speed of movement on the routes of UPT allows an increase in the number of trips during comparable time. In turn, this leads to an increase in carrying capacity of public transport and to a reduction in the time spent by passengers on travel [5; 8]. When calculating availability of rolling stock for a certain city, it is necessary to consider not the indicated average values of operational speed of traffic but to use actual data on operation of UPT in this city.

Carrying capacity of the vehicles used is also influenced by:

- *Average route length.* The shorter is the route, the greater share of the turnaround trip time on it is spent on delays at the final stopping points associated with the turnover of rolling stock (performing technologically determined operations at the final point of the route, a short rest for the driver, transferring the vehicle to the opposite direction of movement). However, there is no need to separately take into account the effect of the route length on carrying capacity of vehicles, since delays at final stopping points have actually already been taken into account when standardising operating speed on each route, for each trip.

- Coefficient of non-straightness of the route (routes). It is obvious that movement of a vehicle in space along a non-straight route from the initial to the final stopping point is slower in comparison with a straightened route.

Obviously, transport organisations of UPT do not have significant opportunities for unhindered straightening of sections of the route system, the outline of which is closely related to the structure of the city's street and road network.

Of course, it is impossible to achieve complete straightness of all routes. In this regard, according to our research, the increased non-straightness of routes leads to overspending of at least 10...15 % of resources, primarily regarding the leading items of the cost of transportation. First, these are the costs associated with vehicle mileage, namely:

- With fuel and electricity consumed by vehicles.
- With wages of vehicle drivers.
- With maintenance and current repair of vehicles.

Considering the foregoing, it is relevant to introduce an indicator into research, which will consider the indicated factors affecting the performance of rolling stock on the routes of regular passenger transportation. Such an indicator can serve as an adequate indicator of the level of provision of the urban population with rolling stock.

The use of the indicator will make it possible to assess and compare the levels of provision of UPT with vehicles in various cities, to determine the priority of financing development of the rolling stock fleet, to carry out a set of measures for organising transportation, that in Russia should be in conformity with the Federal Law «On Organisation of Regular Transportation of Passengers and Luggage by Motor Transport and Urban Land Electric Transport in the Russian Federation and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation» dated July 13, 2015 No. 220-FZ (as amended), hereinafter referred to also as FZ No. 220, Social standard of transport services for the population when transporting passengers and luggage by road and city electric transport (order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated

January 31, 2017 No. NA-19-r), hereinafter referred to also as the Social Standard, other industry standards and building rules².

It is proposed to legitimise the indicator under consideration for practical use by including it in the standards of transport services for the population, developed based on a scientifically grounded methodology [12].

Analogue of the vehicle availability indicator

The study of the experience of using indicators of provision with basic production equipment in various sectors of the national economy made it possible to establish the closest analogue for assessing the level of provision of UPT with rolling stock. Such an analogue is the conventional (reference) tractor used in agricultural production – RT.

RT is a tractor, providing the processing of one conditional hectare of land for 1 hour of shift time. At the same time, a plot of arable land corresponding to the area with certain average characteristics is taken as a reference hectare. Those features comprise soil resistivity, ploughing depth, relief (even), rectangular configuration, rutting length per pass through the plot, height above sea level, soil background (presence of stubble of grain crops combined with a certain soil moisture), the absence of stony and other obstacles in the soil.

Thus, the use of the reference hectare in the calculations considers the average operating conditions of RT. The development of the latter is taken as the basis for converting the natural number of tractors into conventional reference tractors. DT-75 or T-74 tractors were previously considered as RT.

Currently, the Ministry of Agriculture of the Russian Federation has recommended³ for consideration TE-100 (close in parameters to DT-75D tractor), TE-150 (close in parameters to T-150-05-09 tractor) tractors [13].

By analogy with RT, it is proposed to use a conditional (reference) vehicle (RV) as an

² For example, SP 42.13330.2011. Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements. Updated edition of SNiP 2.07.01-89 (as amended). Put into effect from 20.05.2011. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2011, 109 p.

³ Method of using conditional coefficients for converting tractors, grain and forage harvesters into reference units in determining the standards for their needs: instructive and methodological edition. Moscow, FGNU Rosinformagrotech, 2009, 56 p.



Table 1

An example of calculating the number of reference 100-seat vehicles (the data are averaged; when calculating in real situations, the actual values should be used) (compiled by the authors)

UPT type	Data on rolling stock				V_o , km/h	Number of reference vehicles, un.
	A_{ll} , un.	α_v	A_{oper} , un.	q , pass.		
Bus	133	0,83	110,39	45	18	49,68
	72	0,79	56,88	76		42,23
	51	0,91	46,41	92		42,70
	23	0,85	19,55	120		24,46
	50	0,93	46,50	11	23	6,54
Trolleybus	44	0,86	37,84	90	17	32,16
	16	0,83	13,28	120		15,05
Tram	66	0,79	52,14	60	16	27,81
	49	0,85	41,65	80		29,62
Total	504	—	—	—	—	270,25

indicator of availability of UPT rolling stock for urban residents. Considering that buses make up the largest share of UPT rolling stock, it is recommended to take a bus with a capacity of 100 passengers, a conventional (reference) one-hundred-seat bus, as RV. At the same time, the one-hundred-seat equivalent is used solely for the convenience of performing calculations according to the proposed method. For the convenience of further presentation, we will introduce the designation of a conventional vehicle (RV_{100}) and an equivalent conventional 100-seat bus RB_{100} . $RV_{100} = RB_{100}$.

Let us assume that operation of RV_{100} on routes is considered under reference (normal, average) operating conditions. Under these conditions, the average operating speed of a route bus is $V_o = 18$ km/h.

The rolling stock of urban land electric transport has different average operating speeds: for trolleybuses, V_o is 17 km/h, and for tram coaches – 16 km/h. Taking this circumstance into account, let us introduce into consideration the conventional one-hundred-seat trolleybus (RTB_{100}) and the tram car (RTW_{100}).

Using the introduced designations, considering the average operating conditions of UPT rolling stock, we obtain the following dependencies:

$$RTB_{100} = RV_{100} \cdot 17:18 = 0,944 RV_{100};$$

$$RV_{100} = 1,059 RTB_{100};$$

$$RTW_{100} = RV_{100} \cdot 16:18 = 0,888 RV_{100};$$

$$RV_{100} = 1,126 RTW_{100}.$$

Since $RB_{100} = 1,059 RTB_{100} = 1,126 RTW_{100}$ we get:

$$RTB_{100} = 1,063 RTW_{100} \text{ and } RTW_{100} = 0,94 RTB_{100}.$$

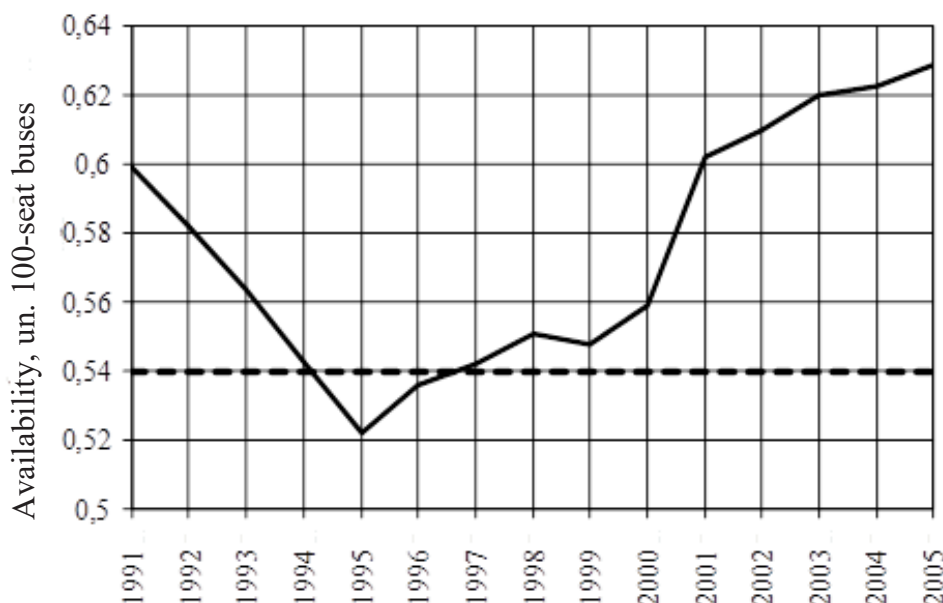
The obtained dependencies are valid for the average operating conditions of vehicles. For real operating conditions in a certain city, the indicated speeds should be adjusted in accordance with the prevailing circumstances.

Reducing natural number of vehicles to a hundred-seat vehicle

When determining the level of provision, running units of rolling stock (A_{oper}) used to work on regular transport routes should be considered and not the average listed rolling stock units that are listed on the balance sheet of transport organisations or leased by them (A_{ll}). The number of running units is equal to the product of A_{ll} and the dimensionless coefficient of output per line (α_v), currently formed or calculated for the foreseeable future (depending on the purposes of use).

Each physical bus, trolleybus or coach corresponds to A_{calc} (calculated RV_{100}), considering the correction factor, which is numerically equal to the ratio of the passenger capacity of the driven rolling stock unit to the calculated reference unit with a capacity of 100 passengers. For example, a bus with a passenger capacity of 63 passengers is equivalent to $63/100 = 0,63 RV_{100}$, and a trolleybus with a passenger capacity of 113 passengers is equivalent to $113/100 = 1,13 RV_{100}$.

In addition to the passenger capacity, operating speed must also be considered. As a result, it is proposed to use the following dependence to determine the number of conditional 100-seat vehicles A_{calc} :



Pic. 2. Critical level and dynamics of provision with reference buses during the period of the greatest decline in quality of transport services at UPT (compiled by the authors).

$$A_{calc} = \frac{A_{II} \cdot \alpha_v \cdot q \cdot V_o}{1800}, \tag{1}$$

where q – passenger capacity of one vehicle, passengers;

1800 – conversion factor obtained by multiplying the passenger capacity of a conventional vehicle (100 passengers) by the average operating speed of the base vehicle – a bus, i.e. 18 km/h, and having the dimension [pass. • km/h].

An example of determining the number of RV is presented in Table 1.

As can be seen from this table, the number of listed RV is 46 % less than the number of average listed vehicles. From the considered example, it follows that the use of only the average number of vehicles in the assessment of availability of rolling stock can introduce an unacceptably large error in the results obtained.

Thus, the main distinguishing feature of the proposed methodology from the known approaches to determining availability of rolling stock is accounting for performance of vehicles, and not only its availability in organisations of UPT, calculated in natural units. The considered indicator reflects the presence of rolling stock, considering the different passenger capacity of the operated vehicles of UPT, operating speed on the

routes, and other technical and operational indicators that determine the actual results of operation of the rolling stock. Therefore, the use of the proposed indicator will contribute to an adequate comparison and assessment of carrying capacity of the vehicle fleet and rationalisation of the costs of its renewal and development.

Let us also pay attention to the fact that the proposed method for determining availability of rolling stock is based on the use of available accounting and statistical information in the calculations.

Adjustment of the size of the contingent of passengers of UPT when calculating availability of rolling stock

To standardise the minimum provision of UPT with rolling stock, it is necessary to determine the critical level of the value of this indicator. Let us emphasise that the critical level does not correspond to the minimum value of the provision set by the transport service standards. The critical level can be significantly less than the standardised value, and is established based on the capacity of passenger transportation with the predominant role of public transport vehicles in implementation of public transportation. To ensure this possibility, it seems reasonable to



require the fulfilment of at least 50 % of all passenger transportation with UPT. Otherwise, UPT will have an auxiliary value in urban transportation.

An experimental study of 1991–2005 on the temporal dynamics of provision of Russian cities with calculated 100-seat buses (Pic. 2) in comparison with the experimentally established transport mobility of the urban population, showed that the critical value of the level of this provision per thousand inhabitants is approximately 0,54 calculated buses. In 1994–1997 quality of transport services was considerably lower, since the level of provision was below the specified critical value [5, p. 145]. Thus, the hypothetically proposed critical level of 0,54 units was confirmed by the crisis of transport services that occurred during the specified period.

In recent years, the provision of UPT with vehicles, despite a slight reduction in the rolling stock fleet, has improved. The growing motorisation of the population, regarding which the potential contingent of passengers of UPT tends to decline, has a significant impact on this phenomenon.

The coefficient of provision of cities with rolling stock for general use is the ratio of the physical number of UTS units listed on the balance sheets of the city's transport organisations to the standard number of such vehicles. The determination of this coefficient is carried out according to the methodology considered in this article.

Considering that motorisation «pulls over» a part of potential passengers of UPT, when calculating the provision, one should not proceed from the total population of certain cities but make an allowance for the corresponding reduction in the number of users of UPT services. As a first approximation, it is recommended to use the following relationship to determine the size of the contingent of potential UPT passengers (N_{UPT}):

$$N_{\text{UPT}} = 0,8 \frac{N \cdot A_{1997}}{A}, \quad (2)$$

where 0,8 – an empirical coefficient that takes into account the completeness of the use of the car fleet owned by residents of the city;

N – population of the city (population size) at the end of the year preceding the estimated period, thousand people;

A_{1997} – the number of passenger car fleet owned by residents of the city at the end of

1997, units. The specified year was chosen for Russia as the basis for comparison since in 1997, according to Pic. 2, the provision of UPT with vehicles was minimal;

A – the number of passenger car fleet owned by residents of the city at the end of the year preceding the estimated period, units.

When calculating availability of rolling stock for certain cities, it is also necessary to consider not only their permanent population, but also the additional daytime population (people who come to work or study from the suburban area).

Note that formula (2) gives a result that is only the first approximation to the true value of N_{UPT} , and additional studies are required to obtain a more accurate result.

Conclusion. The methodology for assessing and rationing the provision of UPT with rolling stock, considered in the article, and accounting the real operating conditions of its use, allows to justify projects for development of a fleet of vehicles of UPT for general use, to establish an objectively necessary limit of funds allocated to finance the activities of public transport, to compare the results of operation of various types of UPT vehicles for passenger transportation (considering the costs inherent in these types of transport and productivity of using a vehicle on a route).

While the calculations were executed based on regulations, standards, and statistical data for the conditions prevailing in Russian Federation, the suggested methodology can be adapted to the conditions of other countries and cities.

The outlined approach to construction of the indicator of availability of UPT rolling stock can be supplemented by adjustments to its normative value, considering other factors (e.g., adjustment of the number of passengers in the article is a special case of such actions). Also, by analogy, it is possible to develop indicators of availability of rolling stock for other types of transport and cargo transportation.

Practical use of RV indicator as an indicator of provision of cities with the rolling stock of public transport is possible in the following situations:

- development of projects for development of transport systems of cities, projects for expanding the rolling stock fleet of UPT;

- comparison of real carrying capacity of vehicles of various types of UPT, e.g., when organising various forms of services regarding given mass transit routes (stop-off, express, semi-express, high-speed traffic);
- assessment and analysis of the current situation in provision of cities with rolling stock;
- providing calculations for sustainable development of the urban environment and transport infrastructure, e.g., to ensure compliance with the requirements of the current social standard and building rules.

It should be noted that the design of sustainable transport systems puts forward increased requirements for staffing regarding both designers and operators.

In this regard, it seems necessary to modernise vocational education and improve the qualifications of transport personnel. The main recommendations for solving this problem are set out in the works [14; 15].

REFERENCES

1. 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 aktualnye zadachi]. *South of Russia: ecology, development*, 2018, Vol. 13, Iss. 4, pp. 24–46. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoichivoe-razvitiye-transporta-v-gorodakh-rossii-opyt-i-aktualnye-zadachi/pdf>. Last accessed 23.12.2020.
2. Donchenko, V. V. Problems of ensuring sustainable functioning of urban transport systems: Monograph [Problemy obespecheniya ustoichivogo funktsionirovaniya gorodskikh transportnykh sistem: Monografiya]. Moscow, ICF Catalog, 2005, 184 p. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24133949>. Last accessed 23.12.2020.
3. Donchenko, V. V., Kunin, Yu. I., Kazmin, D. M., Mekhonoshin, V. V. Problems of sustainable development of urban transport systems in the Russian Federation [Problemy ustoichivogo razvitiya gorodskikh transportnykh sistem v Rossiiskoi Federatsii]. *Transport: science, technology, management. Scientific information collection of VINITI RAS*, 2008, Iss. 7, pp. 37–46.
4. Asaliev, A. M., Zavyalova, N. B., Saginova, O. V., Spirin, I. V., Skorobogatikh, I. I. [et al]. Marketing approach to quality management of transport services: Monograph [Marketingoviy podkhod k upravleniyu kachestvom transportnogo obsluzhivaniya: Monografiya]. Ed. by Ph.D. (Eng) N. B. Zavyalova, D.Sc. (Economics) O. V. Saginova, D.Sc. (Eng) I. V. Spirin. Novosibirsk, CRNS Publishing House, 2016, 172 p. [Electronic resource]: <https://www.rea.ru/ru/org/cathedries/prlogkaf/Documents/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82.pdf>. Last accessed 23.12.2020.
5. Spirin, I. V. Scientific foundations of complex restructuring of urban passenger transport: Monograph [Nauchnye osnovy kompleksnoi restukturizatsii gorodskogo passazhirskogo transporta: Monografiya]. Moscow, Catalog publ., 2007, 200 p. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19847033>. Last accessed 23.12.2020.
6. Yakimov, M. R. Scientific methodology for formation of an effective transport system in a large city. Abstract of D.Sc. (Eng) thesis [Nauchnaya metodologiya formirovaniya effektivnoi transportnoi sistemy krupnogo goroda. Avtoref. dis... doc. tekhn. nauk]. Moscow, MADI publ., 2011, 418 p. [Electronic resource]: <https://new-dissert.ru/avtoreferats/01005513620.pdf>. Last accessed 23.12.2020.
7. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. Approved by the order of the Government of the Russian Federation [Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda. Utv. Rasporyazheniem Pravitelstva Rossiiskoi Federatsii]. [Electronic resource]: <http://docs.cntd.ru/document/902132678>. Last accessed 23.12.2020.
8. Papagostas, C. G. Fundamentals of Transportation Engineering. A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs. New Jersey, 1987, 458 p. [Electronic resource]: http://simkeu.unigoro.ac.id/fundamentals_of_transportation_engineering_by_papacostas.pdf. Last accessed 23.12.2020.
9. Canitez, F. Urban public transport systems from new institutional economics perspective: a literature review. *Transport Reviews*, 2019, Vol. 39, pp. 511–530. [Electronic resource]: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2018.1552631?scroll=top&needAccess=true>. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1552631>. Last accessed 23.12.2020.
10. Horažďovský, P., Kozhevnikov, S., Svitek, M. Dynamic Public Transport. Smart city symposium in Prague. Proceedings of Smart Cities Symposium Prague (SCSP). Czech Republic, 2019. [Electronic resource]: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8805716>. Last accessed 23.12.2020.
11. Huawei, Zhai; Licheng, Cui; Yu, Nie; Xiaowei, Xu; Weishi, Zhang. A Comprehensive Comparative Analysis of the Basic Theory of the Short-Term Bus Passenger Flow Prediction (Review). *Symmetry-Basel*, 2018, Vol. 10, Iss. 9, Article Number 369. DOI: 10.3390/sym10090369. Last accessed 23.12.2020.
12. Donchenko, V. V., Ibraev, K. A., Enin, D. V., Evseev, O. V. Methodological approaches to development and application of transport service standards for the population [Metodologicheskie podkhody k razrabotke i primeneniyu standartov transportnogo obsluzhivaniya naseleniya]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2016, Iss. 6, pp. 22–25. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26165081>. Last accessed 23.12.2020.
13. Yurkov, M. M., Borisov, N. S. Methodology for determining the conversion factor into conventional reference tractors [Metodika opredeleniya koeffitsienta perevoda v uslovnie etalonnii traktora]. *Tekhnika i tekhnologii*, 2020, Iss. 1 (49), pp. 72–74. DOI: 10.35694/YARCX.2020.49.1.015. Last accessed 23.12.2020.
14. Grishaeva, Yu. M., Spirin, I. V., Matantseva, O. Yu. Aspects of Professional Education in the Higher School in the Interests of the Techno-Sphere Safety. *Modern Research of Social Problems (Online Scientific Journal)*, 2016, Vol. 9 (65), pp. 5–18. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/aspects-of-professional-education-in-the-higher-school-in-the-interests-of-the-techno-sphere-safety/pdf>. Last accessed 23.12.2020.
15. Noosphere education in the Eurasian space [Noosfernoe obrazovanie v evraziiskom prostranstve]. Vol. 8: Noospheric education as a mechanism for formation of noospheric Russia: a collective monograph. Ed. by A. I. Subetto. St. Petersburg, Asterion publ., 2018, 588 p. [Electronic resource]: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0001/005d/2225-mn.pdf>. Last accessed 23.12.2020. ●





Контроль производственного персонала при выполнении работ технического обслуживания автомобилей



Дмитрий МАЛЬЦЕВ



Дмитрий РЕПЕЦКИЙ

*Мальцев Дмитрий Викторович – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Репецкий Дмитрий Станиславович – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*.*

Цель исследования – анализ трудовой дисциплины производственного персонала при выполнении работ технического обслуживания (ТО) автомобилей. В настоящее время многие автосервисные предприятия практически не контролируют качество работы исполнителей. Эти обязанности возлагают на низшее звено управления – мастеров, бригадиров, однако они либо сильно загружены работой, либо не заинтересованы в выполнении функций контроля. Кроме того, трудоёмкость выполнения работ ТО и ремонта устанавливается заводом-изготовителем на минимально возможном уровне, из расчёта, что персонал имеет высокую квалификацию, а предприятие обеспечено всем необходимым специальным инструментом. В результате исполнителям сложно или невозможно уложиться в нормативы, поэтому чтобы выполнить план и не потерять часть заработной платы, они пропускают или не выполняют часть работ, оплаченных клиентом. Исследования проводились в Перми на базе типового автосервиса, являющегося официальным дилером отечественной марки автомобилей. Анализ работы персонала проводился при помощи сравнения фактически выполненных работ с технологией завода-изготовителя. Для этого

проводилась видеофиксация всех действий исполнителя. Отмечалась полнота выполнения каждой операции, а также затраченное время. Эффективность работы оценивалась при помощи диаграмм «спагетти», на которых отмечаются все перемещения исполнителей. Представлена методика, позволяющая дать итоговую оценку работы слесарей, которая заключается в начислении штрафных баллов за превышения нормативного времени, частичное выполнение или пропуск операций. Разработана шкала оценки исполнителей. Представлены результаты исследований проведения ТО двух одинаковых автомобилей. Обнаружены и проанализированы недостатки работы производственного персонала. Для повышения производительности труда возможно использование принципов «бережливого производства» системы 5 «S». Необходимо оснастить посты инструментом, выдать исполнителям чек-листы и на посту ТО использовать схему передвижения, оснастить посты камерами видеонаблюдения и периодически осуществлять выборочный контроль работ. Для мотивации персонала необходимо пересмотреть систему премий и штрафов с учётом результатов работы.

Ключевые слова: оценка персонала, автосервис, трудовая дисциплина, техническое обслуживание автомобилей.

* Информация об авторах:

Мальцев Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, mdv@pstu.ru.

Репецкий Дмитрий Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, repetsky@pstu.ru.

Статья поступила в редакцию 30.07.2020, принята к публикации 18.11.2020.

For the English text of the article please see p. 243.

В условиях рыночной экономики автосервисы вынуждены конкурировать между собой за клиентов. Снижение стоимости оказываемых услуг может быть эффективно только в краткосрочной перспективе для привлечения новых клиентов, в долгосрочной — приведёт к снижению прибыли. Более перспективным путём является повышение качества оказываемых услуг. Потребители, оплачивая услуги, ожидают как само собой разумеющееся, что все заявленные работы будут выполнены в полном объёме и автомобиль будет готов к эксплуатации точно в заявленный срок. Хотя в реальности это не всегда так. Заводы-изготовители, желая продать как можно больше автомобилей, привлекают клиентов, в том числе, низкими ценами на техническое обслуживание (ТО) и текущий ремонт (ТР), которые достигаются уменьшением нормо-часов при сохранении объёма работ. При этом многие сервисы не имеют необходимого перечня оборудования, оснастки и инструмента, а персонал длительное время не проходил курсы повышения квалификации и работает не эффективно [1–3]. С другой стороны, заработная плата слесаря зависит от количества отработанных нормо-часов по заказ-нарядам, поэтому чтобы уложиться в норматив приходится идти на ухищрения. Например, пропускать или выполнять не полностью часть работ, которые сложно проверить (осмотровых, контрольных, крепёжных). В результате клиент оплачивает полную стоимость работ, которые могли и не проводиться. Качество обслуживания зависит от организации труда на конкретном предприятии и добросовестности слесаря.

Целью данной статьи является анализ работы производственного персонала автосервиса при проведении работ технического обслуживания.

Проблемы управления персоналом являются актуальными для всех стран мира, например, в исследовании [4] приведено отличие антикризисного управления в Китае от опыта западных стран. Ключевым для этой страны является общественное мнение, поэтому недовольные клиенты через социальные сети могут нанести существенный ущерб бизнесу, примером является бойкот KFC [4–5]. В нашей стране клиенты также стано-

вятся всё активнее в сети и стараются обращать внимание на отзывы, но общественное мнение не является основополагающим фактором. Достаточно много исследований и у европейских учёных, однако, они направлены либо на управление человеческими ресурсами в общем, либо проводились в других отраслях экономики: машиностроении, лёгкой промышленности, медицине [6–7]. Сервис автомобилей в развитых странах сформировался в середине прошлого века, достаточно жёстко контролируется, поэтому в зарубежных странах подобные проблемы не столь актуальны, особенно в части ТО и ремонта у официальных дилеров.

Наши исследования проводились на предприятии автоцентр «ГАЗ» в Перми. Основной вид деятельности автоцентра — ТО и ТР автомобилей «ГАЗ», дополнительные виды деятельности — торговля транспортными средствами марки «ГАЗ» и запасными частями к ним. Производственная зона оснащена универсальными постами ТО и ТР, а также постами диагностики, уборочно-моечных работ, шиномонтажа. Производственный персонал состоит из 12 человек, в числе которых восемь слесарей, два мастера-приёмщика и два мастера смены. Данное предприятие по оснащению производственной зоны, персоналу, организации труда и прочего является типовым для отрасли сервисных услуг.

За 2019 год в автоцентре продано 894 автомобиля марки «ГАЗ», зафиксировано 3516 заездов автомобилей, из которых 1116 пришлось на ТО. Существенный объём работ по ТР связан с тем, что владельцы автомобилей предпочитают проводить обслуживание в автоцентре только в период гарантии, затем обращаются в независимые сервисы или осуществляют ТО своими силами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эффективность работы производственного персонала оценивалась при помощи диаграммы «спагетти». При использовании этого метода наблюдатель на плане рабочего места (поста ТО) отмечает все перемещения исполнителя, а также количество сделанных шагов или время, потраченное на перемещение и выполнение операции.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем:



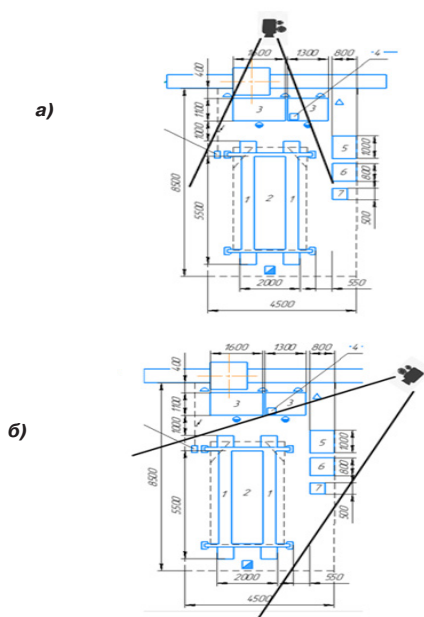


Рис. 1. Ракурсы съёмки технического обслуживания автомобиля «ГАЗ» (выполнено авторами).



Рис. 2. Примеры кадров из видеозаписей.

1) проводилась видеофиксация всех действий исполнителя;

2) наблюдатель, на подготовленном бланке с планом поста ТО, отмечал все перемещения исполнителя и затраченное время;

3) затем анализировалась запись ТО, на бланке заводской технологии отмечалось фактическое время выполнения каждой операции и ошибки при наличии.

Видеозапись осуществлялась при помощи цифровой камеры EKEN H9 с возмож-

ностью записи с частотой 60 кадров/с и разрешением 1080 p. Для того чтобы не отвлекать исполнителя от работы, съёмка велась на штативах, план поста и расположение камер представлены на рис. 1.

При проведении исследования анализировалось ТО автомобилей ГАЗель «NEXT» с пробегом 20 тыс. километров (ТО-1). Всего осуществлено две видеозаписи, автомобили имели одинаковую комплектацию и полностью идентичный перечень работ. Исполнители: штатные слесари по ремонту автомобилей, в возрасте 32 и 38 лет, оба имеют непрерывный стаж работы не менее восьми лет. Оборудование, оснастка и инструмент на рабочих местах – идентичны. Каждый исполнитель перед проведением эксперимента был информирован о видеофиксации.

В результате получены две видеозаписи продолжительностью 138 и 121 минут, примеры кадров представлены на рис. 2.

Ошибки исполнителей разделялись на три группы, для комплексной оценки за ошибки начислялись штрафные баллы:

- исполнитель не успел выполнить операцию (1 балл);
- исполнитель выполнил операцию не в полном объёме (3 балла);
- исполнитель полностью не выполнил операцию (5 баллов).

Безусловно, все операции ТО очень важны. Собственно, они являются минимально необходимыми для поддержания работоспособного состояния автомобиля. Однако операции отличаются трудоёмкостью и влиянием на безопасность эксплуатации. Для простоты было принято решение учитывать при начислении штрафных баллов только трудоёмкость:

$$\text{ШБ} = K \cdot t_{\text{уд}}, \quad (1)$$

где ШБ – суммарные штрафные баллы, присвоенные исполнителю за операцию;

K – коэффициент допущенной ошибки (1, 3, 5);

$t_{\text{уд}}$ – время, отведённое на операцию по заводской технологии.

Для оценки работы предложена шкала (табл. 1), она составлена таким образом, что пропуск любой операции приводит к оценке «неудовлетворительно», т.к. это считается некачественным оказанием услуги и является нарушением ст. 4 и 10 закона РФ «О защите прав потребителей» [8].

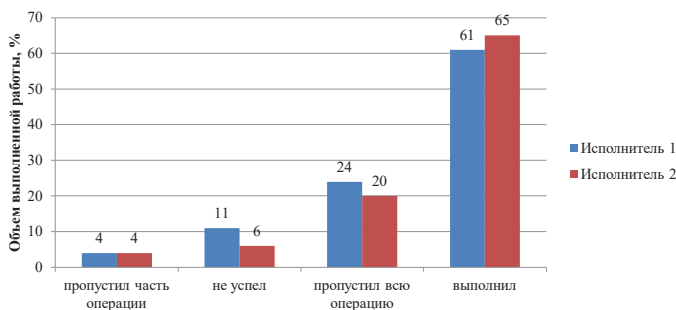


Рис. 3. Результаты анализа работы исполнителей (составлено авторами).

Получить «отлично» можно только при условии, что все операции, которые входят в состав ТО, будут выполнены. При этом допускается незначительно превысить трудоёмкость, установленную заводской технологией. Исполнитель получит «хорошо», если превысит заводскую трудоёмкость более, чем на 15 минут, «удовлетворительно» – при частичном пропуске одной или двух операций (в основном осмотровые работы).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате анализа видеозаписей (рис. 3) видно, что 35–39 % операций выполнены с нарушением технологии, слесари пропустили операций в среднем на 0,63 нормо-часа, что составляет около 20 % общей трудоёмкости ТО. Количество штрафных баллов первого исполнителя – 2,11, второго – 2,91, что соответствует оценке «неудовлетворительно».

Исполнителями были пропущены операции, влияющие на активную безопасность, пожаробезопасность, а также операции, вследствие невыполнения которых может наступить дорогостоящий ремонт.

По диаграмме «спагетти» (рис. 4) видно, что чаще всего слесари подходили к верстаку и инструментальному ящику, что свидетельствует о неэффективном использовании инструментальной тележки и нерациональном размещении инструмента. Несколько раз они отлучались с рабочего места: первый исполнитель посещал склад четыре раза, второй – два. Во время проведения ТО у первого исполнителя не было необходимого инструмента, на поиски потрачено девять минут, а второй отлучался в комнату отдыха на шесть минут. Отмечено, что оба механика не всегда поднима-

Таблица 1

Оценка работы исполнителя с помощью штрафных баллов

«5»	«4»	«3»	«2»
0–0,1	0,11–1,0	1,1–2,0	2,0–16,7

ли автомобиль на достаточную высоту, для комфортной работы под ним.

Для повышения производительности труда возможно использование принципов «бережливого производства» системы 5«S» [9–12]. Необходимо дооснастить посты инструментом и рационально его разместить в легко доступном месте. Например, часто используемый – в инструментальной тележке, редко используемый – на стеновых щитах. Для предотвращения пропуска операций предлагается выдать исполнителям чек-листы и на посту ТО использовать схему передвижения (рис. 5). Схему легко нанести на на-

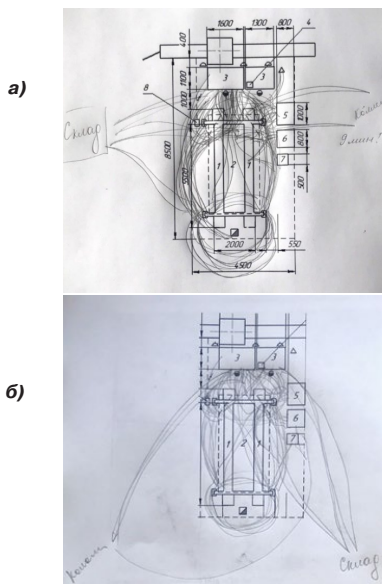


Рис. 4. Диаграммы «спагетти»: а) первый исполнитель, б) второй исполнитель (составлено авторами).



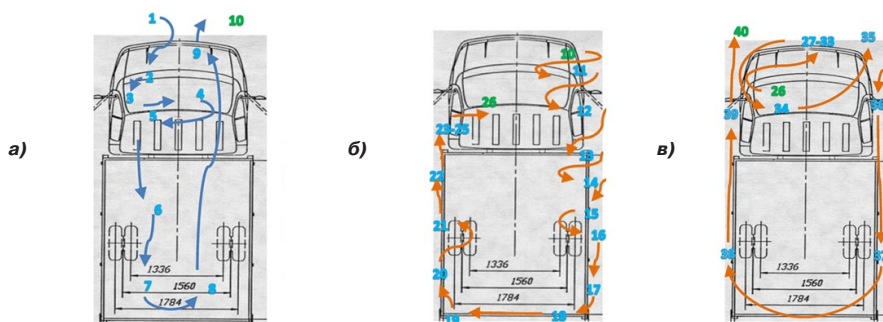


Рис. 5. Схема передвижения исполнителя:

а) – операции «снизу», б) – операции «сверху», в) – операции «из салона» (составлено авторами).

польное покрытие краской или при помощи наклеек.

Целесообразно оснастить посты камерами видеонаблюдения и периодически осуществлять выборочный контроль работ, который лучше возложить на независимого эксперта. Для снижения потерь времени необходимо докупить инструмент в достаточном количестве, а также пересмотреть взаимодействие со складом, т.к. получение материалов для ТО отнимает много времени. Для мотивации персонала необходимо пересмотреть систему премий и штрафов с учётом результатов работы.

Таким образом, исследование выявило серьёзные нарушения при проведении работ ТО автомобилей «ГАЗ»: частичное или полное невыполнение 35–39 % операций. Нарушения отчасти связаны с неэффективной организацией труда и малой трудоёмкостью работ заводской технологии. Решить проблему можно за счёт дооснащения рабочих мест инструментом, усовершенствованием работы склада, ужесточением контроля над исполнителями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев Д. В., Генсон Е. М., Репецкий Д. С. Электронные учебные пособия для прикладного бакалавриата // Высшее образование в России. – 2019. – № 4. – С. 134–141. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnye-uchebnye-posobiya-dlya-prikladnogo-bakalavriata/pdf>. Доступ 03.11.2020.
2. Мальцев Д. В., Репецкий Д. С. Удовлетворённость обучающихся качеством образовательных услуг технического университета // Высшее образование в России. – 2020. – № 5. – С. 45–52. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/udovletvoryonnost-obuchayushchih-sya-kachestvom-obrazovatelnyh-uslug-tehnicheskogo-universiteta/pdf>. Доступ 03.11.2020.
3. Шаихов Р. Ф. Контроль производственного персонала на автотранспортном предприятии

// Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. Изд-во ПНИПУ. – 2019. – № 3. – С. 89–95. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41069810>. Доступ 03.11.2020.

4. Yijing, Wang; Laufer, D. How does crisis management in China differ from the West? A review of the literature and directions for future research Journal of International Management, 2020, Iss. 26, pp. 1–10. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S107542531830379X>. Доступ 03.11.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intman.2019.100708>.

5. Bundy, J., Pfarrer, M. D., Short, C. E., Coombs, W. T. Crises and Crisis Management: Integration, Interpretation, and Research Development. Journal of Management, 2017, Vol. 43 (6), pp. 1661–1692. DOI: <https://doi.org/10.1177/0149206316680030>.

6. Dhanesh, G. S., Sriramesh, K. Culture and Crisis Communication: Nestle India's Maggi noodles case. Journal of International Management, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intman.2017.12.004>.

7. Bortoluzzi, G., Chiarvesio, M., Tabacco, R. Managing distribution networks in emerging markets. Evidence from the furniture sector. European Business Review, 2015, Vol. 27, Iss. 6, pp. 617–637. DOI: <https://doi.org/10.1108/EBR-07-2014-0056>.

8. Закон Российской Федерации от 07.02.1992 г. № 2300–1 (в ред. ФЗ от 24.04.2020) «О защите прав потребителей». [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/. Доступ 30.07.2020.

9. Масааки И. Кайдзен: ключ к успеху японских компаний. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 142 с. [Электронный ресурс]: <https://gmpua.com/Management/Kaidzen/KaidzenMasaaki.pdf>. Доступ 03.11.2020.

10. Вялов А. В. Бережливое производство: Учеб. пособие. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2014. – 100 с. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/29584211-A-v-vyalov-berezhlivoe-proizvodstvo.html>. Доступ 03.11.2020.

11. Партин Р. В. Развитие производственных систем: стратегия бизнес-прорыва. Кайдзен. Лидерство. Бережливое производство. – СПб.: Питер, 2015. – 272 с. [Электронный ресурс]: <https://piratebooks.ru/attachments/razvitie-proizvodstvennykh-sistem-pdf.411806/>. Доступ 03.11.2020.

12. Ключев А. В. Концепция бережливого производства: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального ун-та, 2013. – 88 с. [Электронный ресурс]: <https://b-ok.global/dl/3519623/7f92c5>. Доступ 03.11.2020.



Control of Production Personnel when Performing Vehicle Maintenance

**Dmitry V. MALTSEV****Dmitry S. REPETSKY**

*Maltsev, Dmitry V., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.
Repetsky, Dmitry S., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*.*

ABSTRACT

The objective of this article is to analyse labour discipline of production personnel when performing vehicle maintenance works. Currently, many car service enterprises practically do not control the quality of the work of the employees. These responsibilities are assigned to the lower management level – foremen, however, they are either heavily loaded with work, or are not interested in performing control functions. In addition, labour intensity of technical maintenance and repair work is set by the manufacturer at the lowest possible level, assuming that the staff is highly qualified, and the company is provided with all the necessary special tools. As a result, it is difficult or impossible for employees to meet the standards, therefore, to fulfil the plan and not lose part of the wages, they miss or do not perform part of the work paid by the client. The studies were carried out in Perm at a typical car service enterprise, which is an official dealer of a domestic car brand. The analysis of the work of the personnel was carried out by comparing the actual work performed following

the technology defined by the manufacturer. For this, video recording of all the actions of an employee was carried out. The completeness of each operation was noted, as well as the time spent. Work efficiency was assessed using Spaghetti diagrams, which indicate all movements of the performers. A methodology is presented that allows to give a final assessment of the work of locksmiths, which consists in calculating penalty points for exceeding standard time, partial execution or omission of operations. A scale for evaluating performers has been developed. The results of studies of carrying out maintenance of two identical cars are presented. The shortcomings of the production personnel are discovered and analysed.

To increase labour productivity, it is possible to use the principles of lean production of the 5 «S» system. It is necessary to equip the posts with tools, issue checklists to the performers and use the movement scheme at the maintenance post, equip posts with video surveillance cameras and periodically carry out selective control of work. To motivate staff, it is necessary to revise the system of bonuses and fines, considering the results of work.

Keywords: personnel assessment, car service and maintenance, labour discipline, vehicle maintenance.

*Information about the authors:

Maltsev, Dmitry V. – Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Cars and Technological Machines of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, mdv@pstu.ru.

Repetsky, Dmitry S. – Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Cars and Technological Machines of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, repetsky@pstu.ru.

Article received 30.07.2020, accepted 18.11.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 238.

In a market economy, car maintenance enterprises are forced to compete for customers. Reducing the cost of services provided can be effective only in the short term to attract new customers, in the long term – it will lead to a decrease in profits. A more promising way is to improve quality of services provided. When paying for services, consumers expect as a matter of course that all declared work will be completed in full and the car will be ready for operation exactly on time. Although in reality this is not always the case. Manufacturing plants, aspiring to sell as many cars as possible, attract customers particularly by low prices for technical maintenance and current repair, which are achieved by reducing the standard hours while maintaining the volume of work. At the same time, many service workshops do not have the necessary list of equipment, rigging and tools, and their employees have not attended for a long time the advanced training courses and do not work efficiently [1–3]. On the other hand, a locksmith's salary depends on the number of hours worked to execute the received workshop orders, so to meet the standard, you might go for tricks, for example, skip or incomplete part of the work that is difficult to check (inspection, control, fastening). As a result, the client pays the full cost of the work that probably has not been performed. The quality of service depends on organisation of work at a particular enterprise and conscientiousness of a particular locksmith.

The *objective* of this article is to analyse the work of the production personnel of a car service enterprise during technical maintenance work.

The problems of personnel management are relevant for all countries of the world, for example, the study [4] shows the difference between anti-crisis management in China and the experience of Western countries. Public opinion is key for China, therefore, dissatisfied customers through social networks can cause significant damage to business, for example, to boycott the KFC [4–5]. In Russia, customers are also becoming more active online and are trying to pay attention to reviews, but public opinion is not a fundamental factor. Many studies have been conducted by European researchers, however, they focus either on human resource management in general, or on other sectors of the economy: mechanical engineering, light industry, medicine [6–7]. Car service in developed countries was formed in the

middle of the last century, it is rather tightly controlled, therefore, in foreign countries, such problems are not so urgent, especially in terms of maintenance and repair by official dealers.

The research was carried out at GAZ car centre in Perm. The main activity of the centre is maintenance and repair of GAZ vehicles, additional activity refers to sales of GAZ vehicles and spare parts. The production area is equipped with universal maintenance and repair stations, as well as with diagnostic, cleaning and washing stations, and tire fitting. The production staff consists of 12 people: eight locksmiths, two technicians-receptionists and two shift foremen. This enterprise as for its equipment of the production area, personnel, labour organisation and other things is typical of the service industry.

In 2019, 894 GAZ cars were sold in the car centre, 3516 car entries were recorded, of which 1116 were for maintenance. A significant amount of work on technical maintenance is due to the fact that car owners prefer to carry out maintenance in a car centre only during the warranty period, then they turn to independent services or carry out maintenance on their own.

Materials and methods

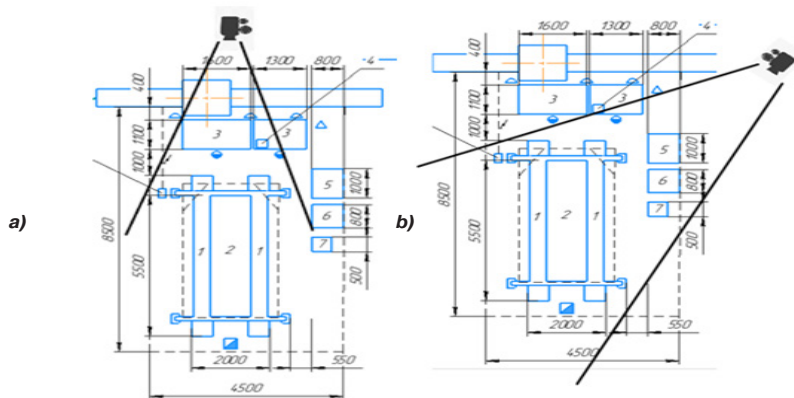
The performance of the production personnel was assessed using a *spaghetti diagram*. When using this *method*, the observer on the plan of the workplace (maintenance area) notes all the movements of the employee, as well as the number of steps taken, or time spent on moving and performing the operation.

The experimental procedure was as follows:

- 1) video recording of all actions of the employee was carried out;
- 2) the observer, on the prepared form with the plan of the maintenance area, noted all the movements of the employee and the time spent;
- 3) then the maintenance record was analysed, the actual execution time of each operation and errors, if any, were noted on the factory technology form.

Video recording was carried out using an EKEN H9 digital camera with the ability to record at a frequency of 60 frames/s and a resolution of 1080 p. In order not to distract the employee from the work, the shooting was carried out on tripods, the area plan and the location of the cameras are shown in Pic. 1.

In the course of the study, maintenance was analysed regarding GAZelle «NEXT» cars



Pic. 1. Foreshortenings of GAZ vehicle maintenance (made by the authors).



Pic. 2. Examples of frames from video recordings.

with a mileage of 20 thousand kilometres (technical maintenance-1). In total, two video recordings were made, the cars had the same equipment and a completely identical list of works to be performed. Employees were full-time auto repair technicians, aged 32 and 38, both have continuous work experience of at least eight years. The equipment, tooling and tools at the workplace are identical. Each employee was informed about the video recording before the experiment.

As a result, two video recordings with a duration of 138 and 121 minutes were obtained, examples of frames are shown in Pic. 2.

The mistakes of the employees were divided into three groups; for a comprehensive assessment, penalty points were awarded for mistakes:

- the technician failed to complete the operation on time (1 point);
- the technician did not complete the operation in full (3 points);
- the technician did not complete the operation at all (5 points).

Of course, all maintenance operations are particularly important. Actually, they are minimum necessary to maintain the vehicle's

working condition. However, operations are labour intensive and have an impact on operational safety. For simplicity, it was decided to take into account only labour input when calculating penalty points:

$$PP = K \cdot t_{all}, \quad (1)$$

where PP – total penalty points assigned to the employee for the operation;

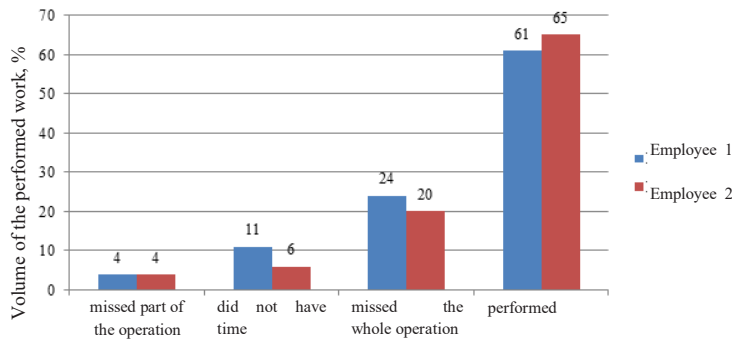
K – error coefficient (1, 3, 5);

T_{all} – time allotted for the operation according to the factory technology.

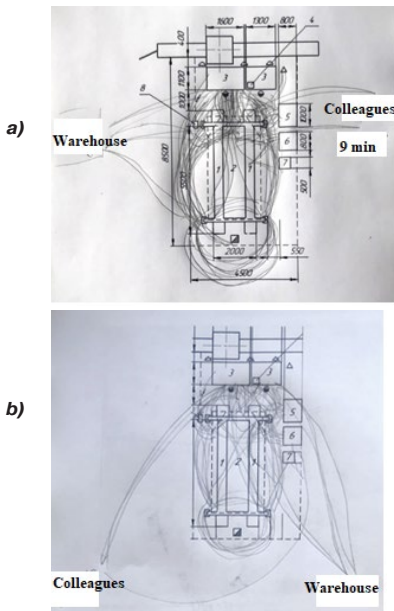
To assess the work, a scale is proposed (Table 1), it is designed in such a way that the omission of any operation leads to an «unsatisfactory» assessment since this is considered a poor-quality service and is a violation of Art. 4 and 10 of the RF Law «On Protection of Consumer Rights» [8].

It is only possible to get «excellent» assessment if all the operations that are part of the technical maintenance will be performed. In this case, it is allowed to slightly exceed the labour intensity established by the factory technology. The employee will receive «good» score if he exceeds the factory labour intensity by more than 15 minutes, and «satisfactory» score if one or two





Pic. 3. Results of the analysis of work of employees (compiled by the authors).



Pic. 4. «Spaghetti» diagrams: a) first employee, b) second employee (compiled by the authors).

operations are partially skipped (mainly inspection work).

Results and conclusions

As a result of the analysis of video recordings (Pic. 3), it can be seen that 35–39 % of operations were performed with violation of the technology, locksmiths missed operations by an average of 0,63 standard hours, which is about 20 % of the total labour intensity of maintenance. The number of penalty points of the first employee is 2,11, of the second – 2,91, which corresponds in the latter case to the unsatisfactory assessment.

The employees missed operations important for active safety, fire safety, either operations, as a result of non-fulfilment of which, expensive repairs may occur.

Table 1

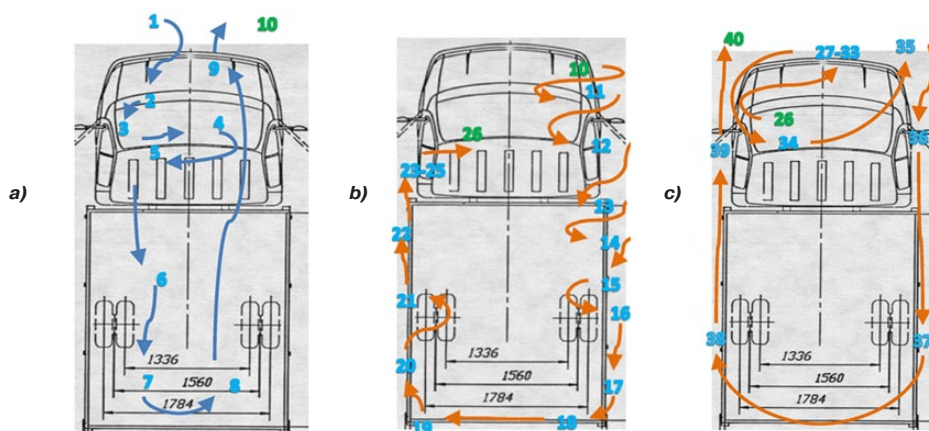
Evaluation of the work of an employee using penalty points

«5»	«4»	«3»	«2»
0–0,1	0,11–1,0	1,1–2,0	2,0–16,7

The «Spaghetti» diagram (Pic. 4) shows that most frequently the locksmiths approached the workbench and toolbox, which indicates ineffective use of the tool trolley and irrational tool placement. They were absent from the workplace several times: the first employee visited the warehouse four times, the second visited it twice. During the maintenance, the first employee did not have the necessary tool, nine minutes were spent on the search, and the second left to the rest room for six minutes. It was noted that both mechanics did not always raise the car to a sufficient height for comfortable work under it.

To increase labour productivity, it is possible to use the principles of lean production of the 5 «S» system [9–12]. It is necessary to equip the posts with tools and rationally place them in an easily accessible place. For example, often used tools should be placed in a tool trolley, rarely used – on wall panels. To prevent skipping operations, it is proposed to issue checklists to employees and use the movement pattern at the maintenance post (Pic. 5). The scheme is easy to apply to the flooring with paint or stickers.

It is advisable to equip posts with video surveillance cameras and periodically carry out selective control of work, which is better to entrust to an independent expert. To reduce the loss of time, it is necessary to purchase enough tools, as well as revise interaction with the warehouse, since obtaining materials for



Pic. 5. Scheme of movement of an employee:
a) operations «from below», b) operations «from above», c) operations «from the compartment»
 (compiled by the authors).

maintenance is time-consuming. To motivate staff, it is necessary to revise the system of bonuses and fines, considering the results of work.

Thus, the study revealed serious violations during the maintenance of GAZ vehicles: partial or complete failure to perform 35–39 % of operations. Violations are partly related to ineffective labour organization and low labour intensity of the plant technology. The problem can be solved by equipping the workplaces with tools, improving the work of the warehouse, and tightening control over the performers.

REFERENCES

1. Maltsev, D. V., Genson, E. M., Repetsky, D. S. Electronic textbooks for applied baccalaureate [Elektronnye uchebnye posobiya dlya prikladnogo bakalavriata]. *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2019, Iss. 4, pp. 134–141. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnye-uchebnye-posobiya-dlya-prikladnogo-bakalavriata/pdf>. Last accessed 03.11.2020.
2. Maltsev, D. V., Repetsky, D. S. Satisfaction of students with the quality of educational services of a technical university [Uдовлетворенность обучающихся технических университетов]. *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2020, Iss. 5, pp. 45–52. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/udovletvoryonnost-obuchayuschih-sya-kachestvom-obrazovatelnykh-uslug-tehnicheskogo-universiteta/pdf>. Last accessed 03.11.2020.
3. Shaikhov, R. F. Control of production personnel at a motor transport enterprise [Kontrol proizvodstvennogo personala na avtotransportnom predpriyatii]. *Transport. Transport facilities. Ecology*. Publishing house PNRPU, 2019, Iss. 3, pp. 89–95. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41069810>. Last accessed 03.11.2020.
4. Yijing, Wang; Laufer, D. How does crisis management in China differ from the West? A review of the literature and directions for future research *Journal of International Management*, 2020, Iss. 26, pp. 1–10. [Electronic resource]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S107542531830379X>. Last accessed 03.11.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intman.2019.100708>.
5. Bundy, J., Pfarrer, M. D., Short, C. E., Coombs, W. T. Crises and Crisis Management: Integration, Interpretation, and Research Development. *Journal of Management*, 2017, Vol. 43 (6), pp. 1661–1692. DOI: <https://doi.org/10.1177/0149206316680030>.
6. Dhanesh, G. S., Sriramesh, K. Culture and Crisis Communication: Nestle India's Maggi noodles case. *Journal of International Management*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intman.2017.12.004>.
7. Bortoluzzi, G., Chiarvesio, M., Tabacco, R. Managing distribution networks in emerging markets. Evidence from the furniture sector. *European Business Review*, 2015, Vol. 27, Iss. 6, pp. 617–637. DOI: <https://doi.org/10.1108/EBR-07-2014-0056>.
8. Law of the Russian Federation of 07.02.1992, No. 2300-1 (as amended by the Federal Law of 24.04.2020) «On Protection of Consumer Rights» [Zakon Rossiiskoi Federatsii ot 07.02.1992 g. № 2300-1 (v red. FZ ot 24.04.2020 g.) «O zashchite prav potrebitel'ei»]. [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/. Last accessed 30.07.2020.
9. Masaaki, I. Kaizen: the key to the success of Japanese companies [Kaizen: klyuch k uspekhу yaponskikh kompanii]. Moscow, Alpina Business Books, 2007, 142 p. [Electronic resource]: <https://gmpua.com/Management/Kaidzen/KaidzenMasaaki.pdf>. Last accessed 03.11.2020.
10. Vyalov, A. V. Lean production: Study guide [Berezhlivoe proizvodstvo: Ucheb. posobie]. Komsomolsk-on-Amur, «KnAGTU», 2014, 100 p. [Electronic resource]: <https://docplayer.ru/29584211-A-v-vyalov-berezhlivoe-proizvodstvo.html>. Last accessed 03.11.2020.
11. Partin, R. V. Development of production systems: business breakthrough strategy. Kaizen. Leadership. Lean. [Razvitie proizvodstvennykh sistem: strategiya biznes-proryva. Kaizen. Liderstvo. Berezhlivoe proizvodstvo]. St. Petersburg, Piter publ., 2015, 272 p. [Electronic resource]: <https://piratebooks.ru/attachments/razvitie-proizvodstvennykh-sistem-pdf.411806/>. Last accessed 03.11.2020.
12. Kluyev, A. V. Concept of lean production: Study guide [Konceptsiya berezhlivogo proizvodstva: Ucheb. posobie]. Yekaterinburg, Publishing house of the Ural Federal University, 2013, 88 p. [Electronic resource]: <https://b-ok.global/dl/3519623/7f92c5>. Last accessed 03.11.2020.





Развитие ВСМ в России с учётом динамики пассажиропотоков и общественного мнения



Елена ИВАНОВА



Татьяна ФЛЯГИНА

*Иванова Елена Алексеевна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.
Флягина Татьяна Анатольевна – Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

С целью исследования проблем и возможностей реализации проектов высокоскоростных магистралей (ВСМ), а также для подтверждения потенциального спроса на услуги высокоскоростных перевозок авторами изучены общественное мнение в отношении трёх потенциальных маршрутов ВСМ, а также опыт зарубежных стран в области освоения прогнозируемых пассажиропотоков, финансирования строительства высокоскоростных магистралей и оценки их влияния на общеэкономический рост регионов.

При проведении исследования авторами применены методы анкетного социологического опроса, анализа, сравнения, индукции.

Основные результаты исследования показали, что при развитии и реализации дорогостоящих проектов ВСМ особое значение имеют выявление спроса пассажиров на высокоскоростные перевозки, выяснение общего отношения и готовности населения стран пользоваться такими магистралями. В статье изучена динамика спроса на пассажирские перевозки фирменными и нефирменными поездами на ключевых направлениях, что позволило обосновать наиболее перспективные из них для развития ВСМ. Выполненное авторами социологическое исследование

методом анкетирования в социальных сетях позволило выявить отношение жителей страны к потенциально наиболее перспективным для реализации проектов ВСМ направлениям Москва–Санкт-Петербург, Москва–Казань и Москва–Ростов-на-Дону. В соответствии с полученными результатами опроса россияне положительно относятся к развитию ВСМ в стране, большинство опрошенных предполагают пользоваться ими при необходимости совершения междугородних поездок, особенно на направлении Москва–Санкт-Петербург.

Авторами представлены внешние экономические эффекты и риски создания ВСМ на территории России. К первым относится, прежде всего, рост транспортной подвижности населения. Потенциальные риски развития проектов ВСМ определяются сложностью обеспечения надёжной работы подвижного состава и объектов инфраструктуры данных магистралей в сложных климатических условиях в России, а также высокой стоимостью поездки для россиян, отрицательно влияющей на спрос. Для преодоления последнего риска важное значение имеет формирование положительного имиджа проектов путём моделирования общественного мнения.

Ключевые слова: железная дорога, высокоскоростные магистрали, пассажирские перевозки, моделирование общественного мнения, экономические эффекты.

*Информация об авторах:

Иванова Елена Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры экономики и управления на транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, suntown@bk.ru.

Флягина Татьяна Анатольевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и управления на транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, t_flyagina@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 14.09.2020, актуализирована 10.12.2020, принята к публикации 11.12.2020.

For the English text of the article please see p. 260.

ВВЕДЕНИЕ

Судьба проектов строительства высокоскоростных магистралей (ВСМ) на территории России остаётся предметом повышенного внимания общественности, бизнеса и научного сообщества. Основными проблемами являются высокая стоимость проектов и согласование источников инвестиций. В то же время в ряде стран мира на протяжении двух десятиков лет наблюдается постепенное развитие высокоскоростного пассажирского сообщения. За исключением отдельных случаев неудачного ввода подвижного состава в эксплуатацию, ни одна страна, приняв решение, не отказалась от высокоскоростного сообщения.

Метод

В основе исследования возможностей и эффектов от создания высокоскоростных магистралей в России лежат кабинетное исследование опыта их развития в странах мира, анализ вторичных статистических данных о работе пассажирского транспорта Российской Федерации, методы сравнения и индукции, а также социологический опрос, проведённый в социальных сетях.

Цели исследования

Целью исследования, представляемого в статье, является анализ имеющихся проблем и возможностей реализации проектов ВСМ, общественного мнения, а также эффектов, которые будут получены от ввода высокоскоростного сообщения на территории Российской Федерации.

Авторами выполнен анализ динамики перевозок скоростными поездами в России, проведено обобщение имеющегося международного опыта развития высокоскоростных перевозок, проектов строительства ВСМ и проблем их реализации;

получены эмпирические данные опроса о намерении жителей страны воспользоваться высокоскоростными поездами на ряде приоритетных направлений их предполагаемого ввода. Путём индуктивных рассуждений получены общие выводы о предпочтительном направлении развития ВСМ, необходимости моделирования положительного общественного мнения о них и об эффектах, которые возникнут при реализации соответствующего проекта.

ДИНАМИКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЕРЕВОЗОК В СТРАНАХ МИРА

Быстрый прирост протяжённости ВСМ в ряде стран мира в последние годы несколько замедлился. Что касается стран Европейского Союза (ЕС), несмотря на наличие порядка трех десятков проектов инфраструктурных объектов для развития высокоскоростного движения, как между странами, так и внутри их, реализация многих из них запаздывает на год и более. По данным Европейской аудиторской палаты выполненный в 2018 г. анализ движения поездов по высокоскоростным веткам протяжённостью более 5000 км в шести странах ЕС — Австрии, Германии, Франции, Италии, Португалии и Испании — показал, что реализуемые скорости движения составили лишь около 45 % от проектных. В отчёте говорится, что ВСМ на континенте приносят «добавленную стоимость ниже ожидаемой». Перечисленные страны получили 83,5 % всего финансирования из бюджета ЕС на развитие ВСМ [1].

Общая протяжённость высокоскоростных магистралей в странах мира превысила в 2020 г. 52,4 тыс. км, в процессе строи-



Рис. 1а. Протяжённость ВСМ в странах-лидерах, 2020 г., км [2].



Рис. 1б. Пассажирооборот по ВСМ в странах-лидерах, 2020 г., млрд пассажира/км [2].



тельства находятся еще около 12 тыс. км, общий пассажиропоток ВСМ в 2020 г. превысил 956 млрд пасс.-км, при этом безусловным лидером по перечисленным показателям является Китай (рис. 1) [2]. Кроме него, крупные проекты развития ВСМ, направленные на повышение транспортной подвижности населения, пропускной способности железных дорог, на снижение загрязнения окружающей среды вследствие привлечения пассажиропотоков на транспорт общего пользования, реализуются в настоящее время в Турции, Испании, Италии, Великобритании, Австрии и других странах [3]. Сообщается также о планах строительства ВСМ в Индии, Иране, Польше и многих других странах [4; 5].

Стоимость проектов создания ВСМ, особенно пилотных, весьма значительна, и без государственного субсидирования, а также заинтересованного инвестора их строительство возможно далеко не во всех странах и не на всех выбранных для реализации направлениях.

Сроки окупаемости проектов разные. В КНР для пяти наиболее загруженных линий удалось выйти на прибыль в первые три-пять лет. Так, ВСМ Пекин—Шанхай через три года эксплуатации (2015—2018 гг.) стала высокорентабельной и, по предварительным оценкам, окупится через 15 лет. Окупаемость ВСМ, связывающих города в периферийных районах Китая, ожидается в более дальней перспективе. Для эффективного управления доходностью перевозок на ВСМ Китая применяется динамическое ценообразование [6]. В то же время в Китае строительство линий ВСМ рассматривается в качестве меры стимулирования экономического роста, трансфера технологий и создания единого экономического пространства как внутри страны, так и с зарубежными странами.

С 2015 г. Китай и страны Юго-Восточной Азии (ЮВА) продвигают проект строительства Паназиатской магистрали ВСМ протяженностью более 3 тыс. км, связывающей Куньмин (Китай) и Сингапур и проходящей по территориям Лаоса, Вьетнама, Камбоджи, Таиланда, Малайзии, с ответвлениями на территорию Мьянмы. Стоимость проекта оценивается в более чем 75 млрд долларов, при этом значительная

доля приходится на китайские частные и бюджетные инвестиции [7].

Реализация столь крупного международного проекта сопряжена со множеством экономических и политических рисков, включая необходимость согласования позиций причастных стран, экономический климат в регионе, внешнее вмешательство и деятельность подрядчиков и др. [8]. Но, несмотря на высокую стоимость и проблемы с реализацией проекта, правительство Китая по мере ввода в эксплуатацию ВСМ Куньмин—Сингапур рассчитывает на значительные поступления доходов в государственный бюджет как от перевозок пассажиров, так и от развития бизнеса в приграничных районах Китая, прилегающих к магистрали, а также от активизации торговли со странами ЮВА.

В США развитию высокоскоростного железнодорожного сообщения на государственном уровне придаётся большое значение в связи с перегруженностью автомобильных магистралей и мощностей аэропортов, осуществляющих обслуживание внутренних маршрутов [9]. Уже эксплуатируются скоростные поезда в коридоре (так называемый Северо-восточный коридор (NEC)), связывающем Вашингтон, Нью-Йорк и Бостон. Также начато строительство ВСМ в Калифорнии (1300 км), однако сохраняются противодействие противников проекта и спорные экономические и правовые вопросы относительно данной магистрали. Реализация других проектов (во Флориде, на Среднем Западе страны и др.) сдерживается нерешёнными проблемами с поиском инвесторов и конфликтом интересов при согласовании проектов, для которых предполагается использовать частное финансирование [3]. Проблемы с привлечением инвесторов к строительству линий ВСМ характерны для многих стран. Во Франции имеются сложности с реализацией проекта инфраструктурного развития действующей линии от Парижа к аэропорту Шарль-де-Голль [10].

Для создания ВСМ в Российской Федерации рассматриваются разные варианты финансирования: прямое участие российского государства в инвестиционной деятельности, государственно-частное партнёрство, софинансирование проектов из бюджета нескольких государств (например,

Таблица 1

Динамика транспортных расходов населения России, %*

Показатель	Год	2005	2010	2016	2017	2018	2019
Доля расходов населения на оплату услуг пассажирского транспорта, %		2,9	3,1	2,4	2,3	2,3	2,3
Расходы населения на транспорт (включая личный и транспорт общего пользования) в среднем на члена домашнего хозяйства; рублей в месяц		516,3	1511,7	2135,8	2686,9	2894,6	3094,1

*Составлено авторами на основании данных Росстата [12].

Таблица 2

Основные показатели пассажирских перевозок по инфраструктуре ОАО «РЖД»*
(составлено авторами)

Показатель	2015	2016	2017	2018	2019
Пассажирооборот, млрд пасс.-км	120,6	124,6	122,9	129,4	133,5
Пригородное сообщение, млрд пасс.-км	31,1	31,1	31,3	33,1	34,2
Дальнее следование, млрд пасс.-км	89,6	93,5	91,0	96,3	99,2
В том числе скоростное и высокоскоростное сообщение			6,1	7,3	
Отправлено пассажиров, млн человек	1025	1040	1117,9	1157,2	1198,0
Пригородное сообщение, млн человек	967,2	922,5	1015,7	1046,9	1081,5
Дальнее следование, млн человек	103,1	97,8	102,2	110,3	116,5
В том числе скоростное и высокоскоростное сообщение			12,4	15,6	
В том числе скоростными поездами АО «ФПК»	3,4	3,9	7,0	9,4	

* Данные годовых отчетов ОАО «РЖД» и АО «ФПК».

обсуждалось участие Китая), предоставленные концессий российским и иностранным инвесторам по итогам торгов (аукционов и конкурсов) [11].

ДИНАМИКА ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ПРОЕКТЫ ВСМ

В Российской Федерации в 2019 г. около 9 % расходов населения приходились на транспорт, включая эксплуатацию и покупку личных транспортных средств – 6,7 %, расходы на услуги транспорта общего пользования – 2,3 % (табл. 1, [12]). Величина транспортных расходов в целом постепенно растет, расходы на услуги транспорта общего пользования являются относительно стабильными. В быстро развивающихся странах доля расходов на услуги общественного транспорта выше (порядка 4 % в Китае и Бразилии, около 7 % в Мексике). В развитых странах, наоборот, их доля ниже: в Германии – 2,5 %, во Франции – 2,6 %, в Австралии – 2,4 %, в США – 1,2 %, в Польше – 1,1 %. На покупку и содержание личного транспорта

жители США расходуют 9,3 % бюджета расходов, в Германии – 13,8 %, Франции – 14,2 %, Мексики – 18,4 %. Представленные показатели для зарубежных стран рассчитаны авторами на основе статистических данных OECD за 2019 г. [13].

Совокупные затраты жителей России на услуги городского общественного транспорта с января по сентябрь 2020 года независимо от пандемии выросли на 15 %. В 2020 г. по сравнению с 2019 г. наблюдается рост затрат на услуги такси, каршеринг и аренду электросамокатов, а затраты на поездки в метро, автобусах, троллейбусах и на аренду автомобилей снижаются (в 2020 г. по отношению к 2019 г. на 45 %). В общей структуре затрат на общественный транспорт расходы на городские автобусы, троллейбусы, метро составили в рассматриваемый период около 19 % [14].

Для обоснованного выбора направлений развития скоростного и высокоскоростного сообщения прежде всего логично отталкиваться от данных анализа динамики объемов перевозок пассажиров по действующей сети (табл. 2, рис. 2), динамики и источни-



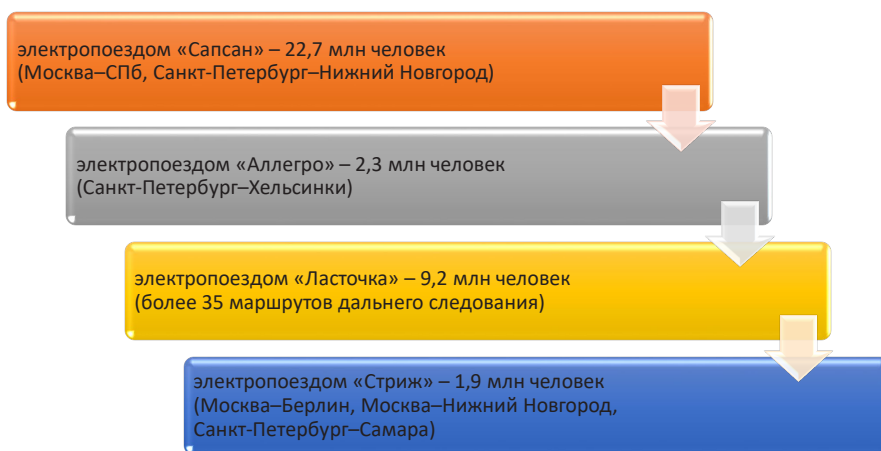


Рис. 2. Объём и маршруты пассажирских перевозок скоростными электropоездами по территории РФ*
(составлено авторами).
*Данные годовых отчётов ОАО «РЖД» и АО «ФПК».

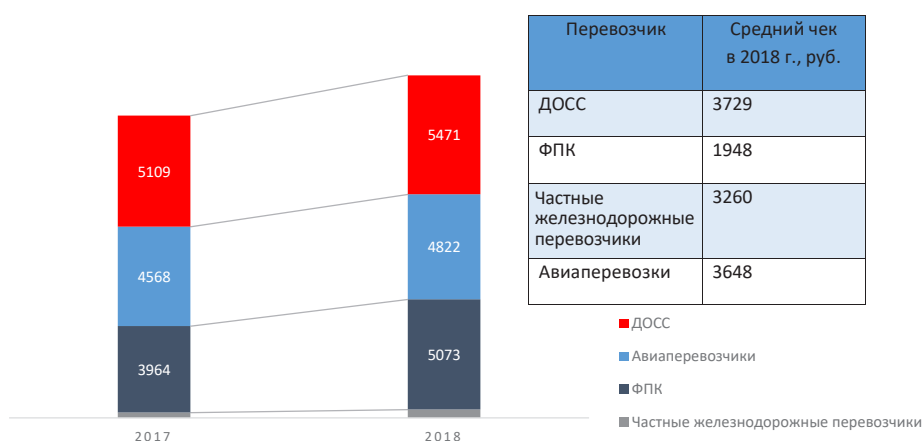


Рис. 3. Динамика отправленных пассажиров по перевозчикам в 2017–2018 гг., тыс. пасс.
(составлено авторами).
*Данные годовых отчётов ОАО «РЖД» и АО «ФПК».

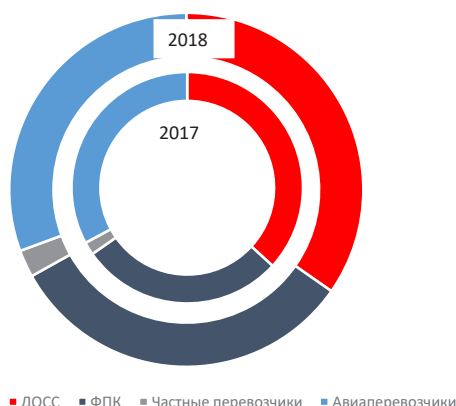


Рис. 4. Распределение долей перевозчиков по отправленным пассажирам в 2017–2018 гг., %*
(составлено авторами).
*Данные годовых отчётов ОАО «РЖД» и АО «ФПК».

ков возникающих доходов (рис. 3). Наибольший прирост объёмов перевозок за период с 2014 по 2018 гг. наблюдался на направлениях Москва–Санкт-Петербург (167,71 %), Москва–Нижегород (158,54 %). В тот же период отмечается значительный прирост числа перевезённых пассажиров на направлениях Москва–Брянск (139,80 %), Москва–Белгород (138,40 %), Москва–Саратов, (123,90 %), Москва–Курск (123,42 %), Москва–Воронеж (122,22 %), Москва–Казань (119,48 %) (Данные АС «Компас» ОАО «РЖД»).

Данные о перевозках пассажиров с начала эксплуатации скоростных электropоездов по состоянию на 1 января 2019 года приведены на рис. 2.

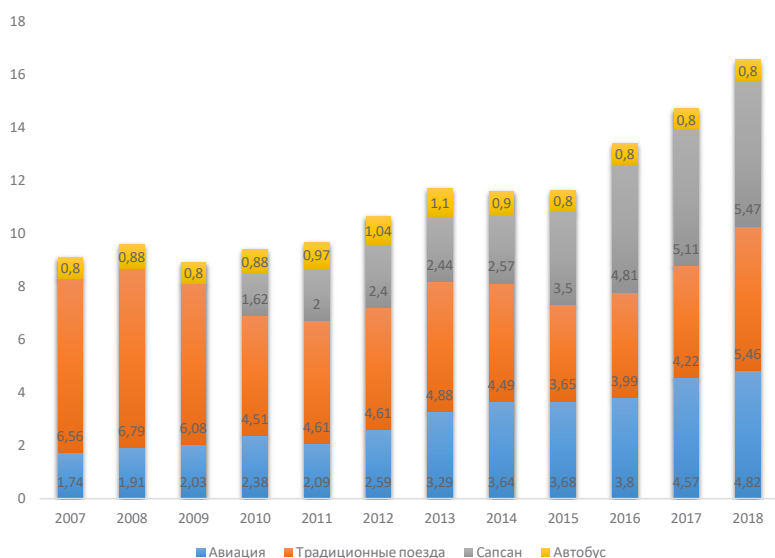


Рис. 5. Динамика пассажиропотока на всех видах транспорта между двумя столицами, тыс. человек (составлено авторами).
 *Данные годовых отчётов ОАО «РЖД», АО «ФПК» и Росавиации.

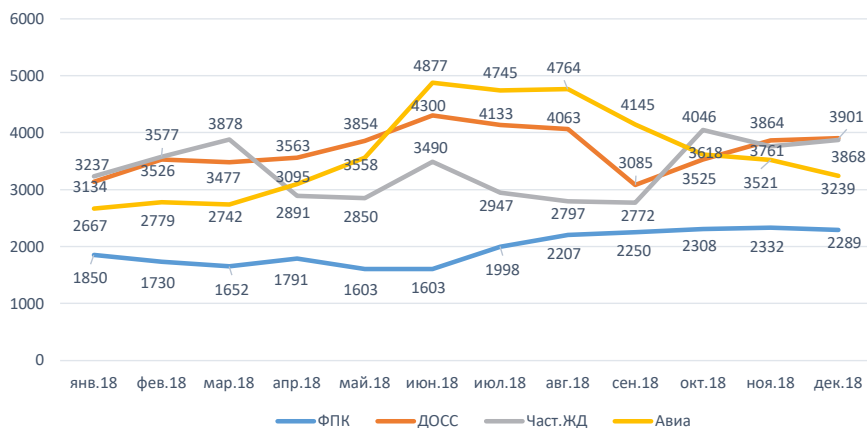


Рис. 6. Средняя стоимость билета на маршруте Москва–Санкт-Петербург по перевозчикам в 2018 году, руб. (составлено авторами).
 *Данные ОАО «РЖД» и интернет-сервисов по продаже авиабилетов.

Анализ рынка пассажирских перевозок на маршруте Москва–Санкт-Петербург показал, что общий объём перевозок в 2018 г., без учёта автомобильного транспорта, увеличился на 13,4 % (1,86 млн пасс.) по сравнению с 2017 г. и составил 15,75 млн пасс. При этом объём перевозок поездами «Сапсан» увеличился на 7 % (0,36 млн пасс.) и составил 5,47 млн пасс., при средней цене билета 3 729 руб. На рис. 3 и 4 представлен анализ рынка на маршруте Москва–Санкт-Петербург.

С момента запуска электропоездов «Сапсан» в 2009 году по маршруту Москва–Санкт-Петербург объём перевозок

вырос с 1,62 млн пасс. в 2010 г. до 5,47 млн пасс. в 2018 г. При этом доля электропоездов «Сапсан» в общем объёме перевозок всеми видами транспорта по состоянию на 2018 г. составляет 33,1 %. На рис. 5 представлена динамика пассажиропотока на всех видах транспорта между двумя столицами.

На рис. 6 представлены средние чеки на маршруте Москва–Санкт-Петербург по перевозчикам в 2018 году.

Провозная способность текущего графика электропоездов «Сапсан» – 5,94 млн пассажиров, при этом фактический объём перевозок в 2018 г. – 5,47 млн чел. Средняя



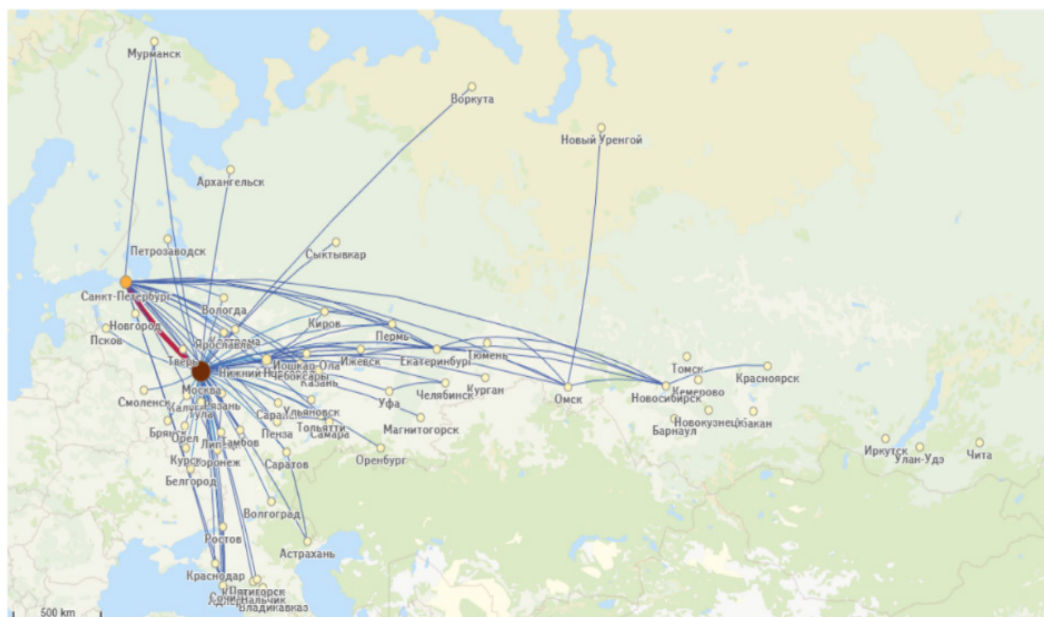


Рис. 7. ТОП-100 внутренних междугородних маршрутов по количеству перевезённых пассажиров железнодорожным транспортом в 2018 г. (составлено авторами).

**Данные для анализа предоставлены Дирекцией скоростного сообщения – структурным подразделением ОАО «РЖД» (ДОСС), анализ выполнен авторами с использованием программного обеспечения, разработанного в ИЭФ РУТ (МИИТ).*

населённость электропоездов за 2018 г. составила 92,1 %, при этом в пиковые периоды населённость поездов составляла более 110 %, что уже отражает дефицит предложения мест. Размер текущего парка электропоездов «Сапсан» в количестве 16 единиц не позволяет увеличить предложение мест, а, следовательно, руководству необходимо рассмотреть возможность приобретения дополнительной партии поездов «Сапсан» в целях удовлетворения растущего спроса на высокоскоростные железнодорожные перевозки. И такие решения уже приняты: в 2019 году холдингом заключён контракт на покупку в 2022–2023 гг. 13 поездов «Сапсан» на сумму 1,1 млрд евро.

На рис. 7 представлена схема междугородних маршрутов, выбранных по критерию максимального числа перевезённых пассажиров в 2018 г. Толщина линий отражает плотность пассажиропотоков. Как видно из рисунка, по значительным объемам пассажиропотока заметно выделяется, прежде всего, направление Москва–Санкт-Петербург, также достаточно востребованы направления Москва–Нижний Новгород, Москва–Сочи, Москва–Екатеринбург, Санкт-Петербург–Екатеринбург.

В структуре доходов от пассажирских перевозок в дальнейшем следовании преобладают доходы от перевозки пассажиров (в 2018 г. – 91,34 %). При этом отмечается тенденция возрастания дохода от продажи дополнительных услуг, это свидетельствует о важности для пассажиров качества, обеспечиваемого в поезде сервиса.

Рассмотрим динамику доходов в холдинге «РЖД» от перевозок пассажиров в разных категориях поездов (данные для расчётов взяты из АС «Компас» ОАО «РЖД»). За период с 2014 по 2018 гг. рост доходов от перевозок в фирменных поездах обеспечивался, в первую очередь, на направлениях Москва–Санкт-Петербург (в 1,79 раз), Москва–Казань (в 2 раза), Москва–Воронеж (в 1,34 раза) и Москва–Саратов (в 1,19 раз), в то время как доходы от перевозок в нефирменных поездах демонстрировали тенденцию роста на направлениях Москва–Нижний Новгород (в 4 раза), Москва–Брянск (в 3 раза) и Москва–Белгород (в 2,78 раз). Результаты анализа динамики пассажиропотоков по направлениям, с одной стороны, можно считать основанием для назначения разных категорий скоростных поездов на отмеченных направлениях (в направлениях Мо-

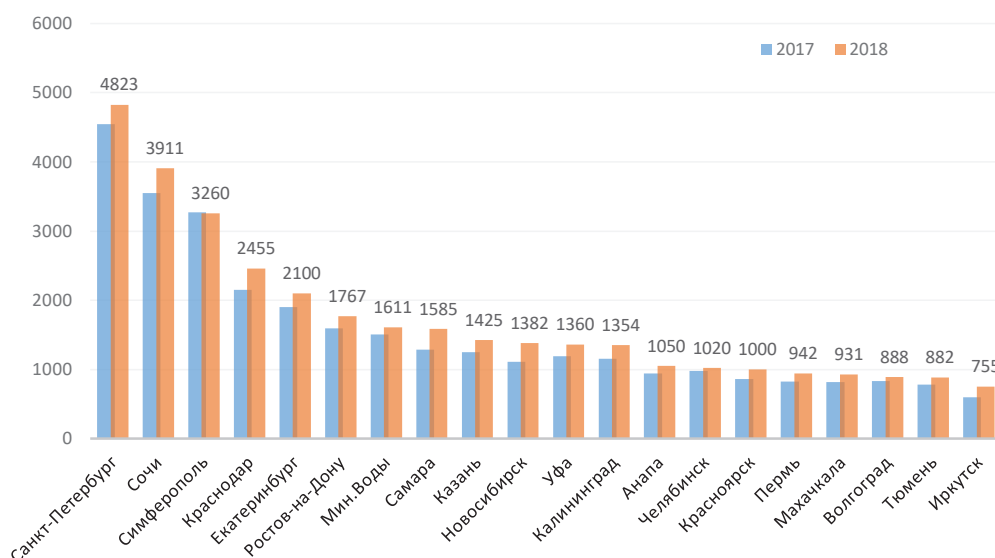


Рис. 8. Изменение объёмов перевозок на основных направлениях воздушного транспорта в 2017–2018 гг., тыс. человек [17].

сква—Санкт-Петербург, Москва—Казань, Москва—Воронеж и др. — поездов, включающих вагоны повышенного комфорта, в направлениях Москва—Нижегород, Москва—Брянск — вагоны эконом-класса). С другой стороны, в направлениях, где пассажиры предъявляют растущий спрос на перевозки в поездах с высоким уровнем обслуживания, логично изучать целесообразность организации высокоскоростных перевозок.

Как свидетельствуют приведенные данные, основными «претендентами» на строительство ВСМ остаются маршруты Москва—Санкт-Петербург (ОАО «РЖД» проводит инженерные изыскания и разработку проектной документации данной линии по поручению Президента РФ от 10 апреля 2019 г. № Пр-623, в декабре 2020 г. Научно-технический совет ОАО «РЖД» предложил вариант прохождения ВСМ Москва—Санкт-Петербург через Великий Новгород [2]), Москва—Казань (маршрут отмечен в Комплексном плане развития магистральной инфраструктуры 2018 г. [15]), а также в будущем представляется перспективным южный ход Москва—Воронеж—Ростов-на-Дону—Сочи [16], где в летние месяцы остаётся высоким спрос на пассажирские перевозки. Учитывая существующие объективные сложности рельефа для развития высокоскоростной железнодорожной

инфраструктуры на участке Ростов-на-Дону—Сочи, при выполнении социологического опроса авторы в последнем случае ставили вопрос только об участке Москва—Воронеж—Ростов-на-Дону.

В соответствии с данными Центра стратегических исследований «Платформа XXI» наиболее значительными направлениями пассажирских перевозок из столицы РФ воздушным транспортом в 2018 г. являлись (рис. 8): Москва—Санкт-Петербург (4,8 млн пассажиров), Москва—Сочи (3,9 млн пассажиров), Москва—Симферополь (3,3 млн пассажиров), Москва—Краснодар (2,5 млн пассажиров) [17].

Наибольший прирост по числу перевезённых пассажиров зафиксирован в рассматриваемый период на маршрутах Москва—Сочи (+362 тыс. человек или 10,2 %), Москва—Краснодар (+307 тыс. человек или 14,3 %), Москва—Самара (+299 тыс. человек или 23,3 %), Москва—Санкт-Петербург (+275 тыс. человек или 6,1 %) [17].

Опыт Китая показывает, что ввод ВСМ на направлении позволяет переключить на железнодорожный транспорт от 30 до 50 % пассажиропотока с параллельных авиационных маршрутов [7]. Кроме того, строительство выделенной ВСМ на направлении с имеющимися ограничениями пропускной способности в значительной степени способствует увеличению числа



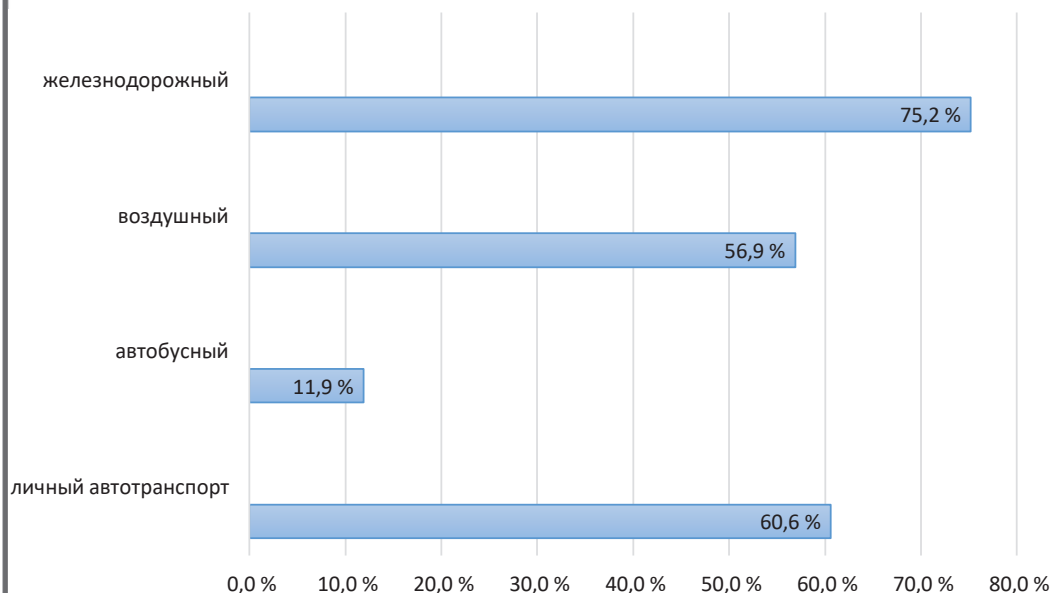


Рис. 9. Предпочитаемые участниками опроса виды транспорта для междугородних поездок, % отметивших данный вид транспорта (составлено авторами по результатам проведённого социологического опроса).

и средней скорости следования грузовых поездов.

Учитывая положительную динамику спроса на воздушные и железнодорожные перевозки фирменными поездами на направлениях Москва—Санкт-Петербург, Москва—Казань (в перспективе Екатеринбург), Москва—Воронеж—Ростов-на-Дону (в перспективе Краснодар, в дальнейшем Сочи), авторы сочли целесообразным изучить отношение россиян к развитию соответствующих проектов ВСМ в Российской Федерации.

ИЗУЧЕНИЕ МНЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ РОССИИ О ПРОЕКТАХ ВСМ НА ТЕРРИТОРИИ СТРАНЫ

С целью выяснения социальных приоритетов и отношения россиян к проектам развития ВСМ авторами инициативно выполнен социологический опрос в социальных сетях. Разработанная авторами анкета была размещена в июне—августе 2020 г. в популярной социальной сети ВКонтакте. В опросе приняли участие 545 человек, представляющих различные категории потребителей транспортных услуг, из них 56 % относятся к возрастной группе 18–25 лет, 23 % — 26–40 лет, 17,4 % — 41–65 лет. Данное соотношение возрастных групп позволяет понять от-

ношение к проектам ВСМ представителей, в том числе и того поколения, которое будет ими преимущественно пользоваться после запуска магистралей. Объём выборки респондентов позволяет рассматривать выполненное исследование как качественное. Оценка статистической погрешности измерений выполнена по методике расчета при использовании дихотомических переменных, при доверительной вероятности 95 % доверительный интервал составил 4,2 %.

Как видно из рис. 9, опрошенные жители России предпочитают для междугородних поездок преимущественно железнодорожный транспорт, вторым приоритетным видом транспорта для данной группы опрошенных является воздушный транспорт. При этом участники опроса продемонстрировали в целом положительное отношение к разрабатываемым проектам высокоскоростного транспорта. Из общего числа респондентов только 3,7 % человек ответили, что не намерены пользоваться ВСМ для междугородних поездок. При этом 63,3 % опрошенных намерены осуществлять поездки по ВСМ регулярно по мере возникновения необходимости (рис. 10).

Среди участников проведённого опроса наибольшим приоритетом пользуется на-

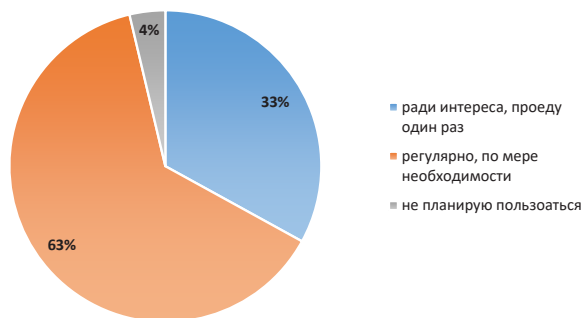


Рис. 10. Распределение ответов респондентов относительно предполагаемой частоты поездок по ВСМ, %. Составлено авторами по результатам проведённого социологического опроса.

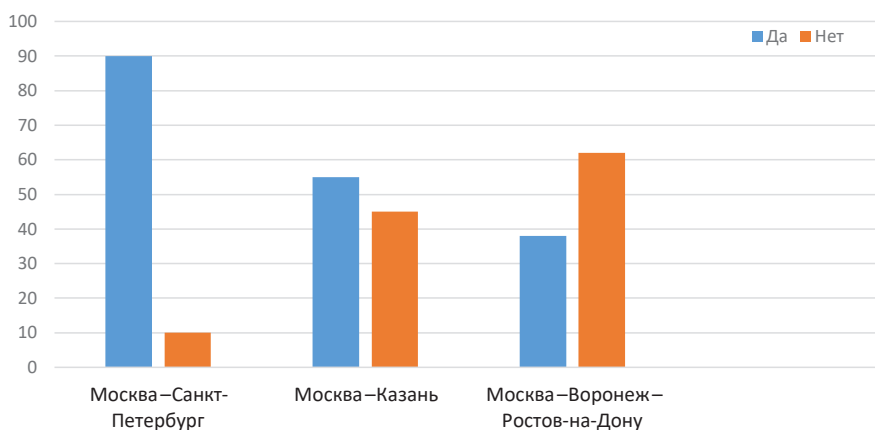


Рис. 11. Распределение ответов опрошенных россиян о намерении пользоваться ВСМ после их ввода на ряде направлений, % (составлено авторами по результатам проведённого социологического опроса).

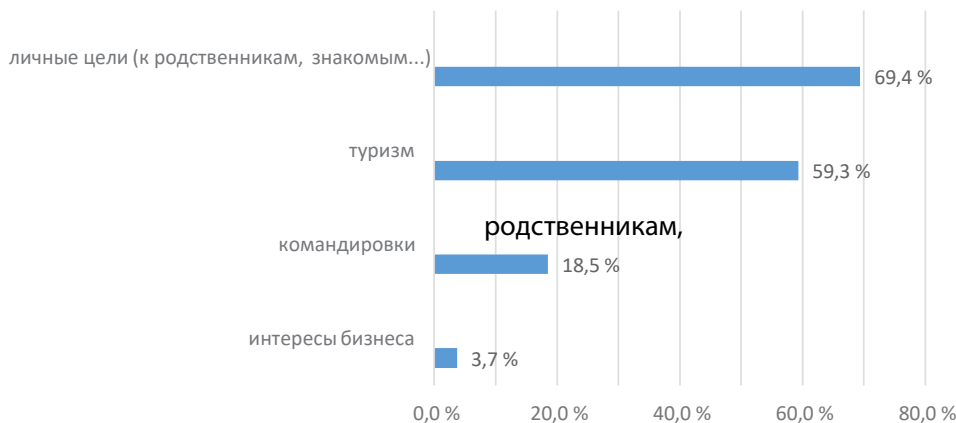


Рис. 12. Цели поездок в междугороднем сообщении, указанные участниками опроса, % отметивших данные цели (составлено авторами по результатам проведённого социологического опроса).

правление ВСМ Москва–Санкт-Петербург, вторым по привлекательности является направление Москва–Казань. Относительно направления Москва–Воронеж–Ростов-на Дону в опрошенной группе отрица-

тельных ответов о намерении пользоваться ВСМ больше, чем положительных (рис. 11). На направлении Москва–Санкт-Петербург более 90 % респондентов намерены совершать поездки высокоскорост-



ными поездками. При этом в качестве возможных целей поездки 69,4 % респондентов назвали личные, 59,3 % — туризм (рис. 12). Поскольку в выборку вошли преимущественно молодые представители общества, малый процент указавших деловые поездки не может являться показательным результатом исследования. Однако судя по ответам респондентов, они готовы совершать поездки высокоскоростными поездами даже в личных целях.

Результаты проведённого авторами социологического опроса позволяют сделать качественный вывод о положительном отношении опрошенных россиян к проектам развития ВСМ в России, а также о том, что наибольшим вниманием из трёх рассмотренных пользуется направление Москва—Санкт-Петербург, что соответствует представленным на рис. 2, 5, 7 данным о росте объёмов перевозок на данном направлении и позволяет сделать вывод о целесообразности рассмотрения данного направления как приоритетного для строительства ВСМ.

В то же время для получения максимальных экономических эффектов от запуска высокоскоростного движения на направлениях Москва—Казань, Москва—Ростов-на-Дону и других потребуется разработка программы моделирования положительного общественного мнения, преимущественно среди молодого поколения жителей страны. Тематика рекламы и мероприятий по развитию связей с общественностью в рамках такой программы должна быть основана на подчёркивании полезных эффектов и освещении ведущейся государством и транспортными компаниями работы по снижению рисков строительства высокоскоростных магистралей.

ВНЕШНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ВОЗМОЖНЫЕ РИСКИ СОЗДАНИЯ ВСМ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Среди внешних эффектов от создания ВСМ наиболее важными авторы считают:

- развитие экономики страны в целом и районов тяготения ВСМ путём увеличения транспортной доступности регионов;
- рост транспортной подвижности населения РФ;

- укрепление социально-территориальной целостности Российской Федерации;

- увеличение конкурентоспособности России на мировом рынке транспортных услуг;

- перераспределение плотности населения из трудоизбыточных районов страны в районы строительства и эксплуатации ВСМ;

- региональная конвергенция и выравнивание доходов населения [18];

- развитие туризма и культурных связей с районами, тяготеющими к ВСМ, вследствие роста транспортной доступности;

- появление дополнительных возможностей развития бизнеса и привлечения в регионы инвестиций, включая иностранные;

- инновационное развитие транспортной отрасли и внедрение цифровых технологий и сервисов на транспорте (блокчейн, Big Data, цифровые коммуникационные системы на основе FDTD метода и др.) [19; 20];

- интеграция регионов тяготения и расширение торгового обмена;

- рост пропускной способности железнодорожных магистралей в грузовом движении при строительстве выделенных линий ВСМ;

- снижение негативной нагрузки транспорта, прежде всего автомобильного, на экологию регионов [3].

Факторами риска при реализации проектов ВСМ, которые могут оказать существенное влияние на эффективность проектов, являются:

- высокая цена высокоскоростной перевозки для пассажира;

- требуемый объём инвестиций в создание инфраструктуры ВСМ;

- уровень использования вместимости (загрузка поездов) и объём текущих операционных затрат;

- техническая надёжность подвижного состава и инфраструктурных объектов ВСМ в сложных климатических условиях РФ;

- выполнение требований по уровню локализации производства подвижного состава для ВСМ, который согласно программным документам, должен составлять порядка 70–80 % [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие высокоскоростных перевозок имеет важное социально-экономическое значение для Российской Федерации. При средней по отношению к другим странам мира величине транспортных расходов жителей на ряде направлений имеется потенциал роста спроса на скоростные и высокоскоростные перевозки. Проведённый авторами анализ динамики объёмов и доходов от пассажирских перевозок в дальнейшем следовании и выполненный социологический опрос подтверждают, что в первую очередь к ним относится направление Москва—Санкт-Петербург. Как показывает обобщённый в статье опыт зарубежных стран, создание ВСМ создаёт целый ряд положительных эффектов для развития экономики регионов и страны в целом. Однако для формирования необходимого спроса на высокоскоростные перевозки по проектируемым магистралям необходимо моделирование положительного общественного мнения путём реализации программы работы с общественностью, основанной на популяризации экономических и иных эффектов от строительства ВСМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Slow trains: the EU's high-speed rail network dilemma. Railway Technology. 25 September 2018 (Last Updated February 6th, 2020) [Электронный ресурс]: <https://www.railway-technology.com/features/eu-high-speed-rail-network-dilemma/>. Доступ 01.10.2020.
2. Официальный сайт АО «Скоростные магистрали», дочерняя компания ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: <http://www.hsrail.ru/info/vsmm/>. Доступ 01.10.2020.
3. Barbosa, F. C. High-Speed Rail Technology – Increased Mobility with Efficient Capacity Allocation and Improved Environmental Performance. Proceedings of the ASME Joint Rail Conference. Pittsburgh, PA, APR 18–20, 2018.
4. Japanese Industrial Townships will come up in 4 states, says Modi. News portal The Hindu. September 14, 2017. [Электронный ресурс]: <http://www.thehindu.com/news/national/shinzo-abe-modi-inaugurate-high-speed-rail-project/article19681706.ece>. Доступ 01.10.2020.
5. Tehran–Esfahan line should be TSI-compliant, RAI tells Chinese contractors. Railway Gazette Group official site May 20, 2016. [Электронный ресурс]: <https://www.railwaygazette.com/news/high-speed/single-view/view/tehran-esfahan-line-should-be-tsi-compliant-rai-tells-chinese-contractors.html>. Доступ 1.10.2020.
6. Qin, J., Zeng, Y. J., Yang, X., He, Y. X., Wu, X. K., Qu, W. X. Time-Dependent Pricing for High-Speed Railway in China Based on Revenue Management. Sustainability, Vol. 11, Iss. 16, Article No. 4272, AUG 2019.
7. Zi, U. Railway transport of the PRC and its role in the socio-economic development of China. Ph.D.

(Economics) thesis [Zheleznodorozhnyi transport KNR i ego rol' v sotsialno-ekonomicheskom razvitii Kitaya. Dis... kand. ekonom. nauk]. Moscow, Institute of Far East, 2018, 205 p.

8. Chang, T., Deng, X., Hwang, B. G. Investigating Political Risk Paths in International High-Speed Railway Projects: The Case of Chinese International Contractors. Sustainability, Vol. 11, Iss. 15, Article No. 4157, AUG 2019.

9. Lane, B. W. On the utility and challenges of high-speed rail in the United States. Journal of Transport Geography, May 2012, Vol. 22, pp. 282–284.

10. Иванова Е. А., Шлейн В. А. Механизмы управления качеством транспортного обслуживания пассажиров: зарубежный опыт // Труды Международной научно-практ. конференции «Концептуальные проблемы экономики и управления на транспорте: взгляд в будущее». – М.: РУТ (МИИТ), 2019. – С. 134–137.

11. Корякин В. М. Применение инвестиционных и концессионных механизмов при строительстве высокоскоростной магистрали «Москва–Казань»: правовой аспект. // Транспортное право и безопасность, 2017. № 8 (20). – С. 6–13.

12. Россия в цифрах 2020. Краткий статистический сборник. // Росстат – М, 2020. – 550 с.

13. Organisation for Economic Co-operation and Development OECD. Official site [Электронный ресурс]: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=SNA_TABLE5. Доступ 01.10.2020.

14. Гайва, Е. На какой общественный транспорт россияне стали больше тратить в пандемию/ Российская газета, 11 октября 2020. [Электронный ресурс]: <https://rg.ru/2020/10/11/na-kakoj-obshchestvennyj-transport-rossiiane-stali-bolshe-tratit-v-pandemii.html>. Доступ 01.10.2020.

15. Комплексный план развития магистральной инфраструктуры (2018 г. [Электронный ресурс]: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>. Доступ 01.10.2020.

16. Цыденов А. С. Создание высокоскоростных магистралей – залог успеха страны в настоящем и будущем. // Транспорт Российской Федерации, 2016. № 5 (66). – С. 10–14.

17. Рынок авиаперевозок в Российской Федерации: 2018 год. Обзор Центра Стратегических Исследований «Платформа XXI». [Электронный ресурс]: <http://platformaxi.org/wp-content/uploads/2019/05/Aviation-Russian-Federation-2018.pdf>. Доступ 01.10.2020.

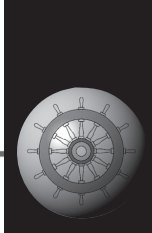
18. Yao, S., Zhang F., Wang, F. [et al]. Regional economic growth and the role of high-speed rail in China. Applied Economics, Jul 2019, Vol. 51, Iss. 32, pp. 3465–3479.

19. Каргина Л. А., Дмитриева Т. М. Применение блокчейн и умных контрактов в транспортных системах // Сб. научных трудов III международной научно-практ. конференции «Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике». – Ростов-на-Дону: РГУПС. – С. 142–145.

20. Sahrani, S., Kuroda, M. Numerical Technique for Wireless Communication System with High Speed Movement. 2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS). Espoo, Finland, Aug 2016, pp. 100–102.

21. Флягина Т. А., Ангелов А., Ан М. А. Локализация производства подвижного состава, как инструмент обеспечения экономической безопасности на транспорте // Труды II Международной научно-практ. конференции «Вклад транспорта в национальную экономическую безопасность». – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – С. 320–322.





HSR Development in Russia Considering the Dynamics of Passenger Traffic and Public Opinion



Elena A. IVANOVA



Tatyana A. FLYAGINA

Ivanova, Elena A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

*Flyagina, Tatyana A., Russian University of Transport, Moscow, Russia**

ABSTRACT

To study the problems and opportunities for implementation of high-speed railway (HSR) projects, as well as to confirm the potential demand for high-speed transportation services, the authors studied public opinion regarding three of the potential HSR lines as well as the experience of foreign countries in implementation of projected passenger traffic, financing of construction of high-speed main lines and assessing their impact on the general economic growth of regions.

When conducting the study, the authors used the methods of a questionnaire sociological survey, analysis, comparison, induction.

The main results of the study have shown that in development and implementation of expensive high-speed rail projects, it is of particular importance to identify the demand of passengers for high-speed transportation, the general attitude and readiness of the population of countries to use such main lines. The article has studied the dynamics of demand for passenger transportation by branded and non-branded trains on key directions, which made it possible to

identify several of them as the most promising for development of high-speed lines. The sociological research carried out by the authors, using the method of questioning in social networks, made it possible to reveal the attitude of the country's residents towards the most potentially promising for high-speed rail projects directions: Moscow–St. Petersburg, Moscow–Kazan and Moscow–Rostov-on-Don. According to the results of the survey, Russians have a positive attitude to development of high-speed railways in the country, most of the respondents intend to use them when it is necessary to make interurban trips, especially on Moscow–St. Petersburg route.

The authors present the external economic effects and risks of development of high-speed railways in Russia. The effects comprise the growth of the population's transport mobility. The potential risks of developing high-speed rail projects are associated with complexity of ensuring reliable operation of rolling stock and infrastructure of these main lines under difficult climatic conditions in Russia, as well as with high cost of travel for Russians, which negatively affects demand. To overcome the latter risk, it is important to form a positive image of projects by modelling public opinion.

Keywords: railway, high-speed main lines, passenger transportation, modelling of public opinion, economic effects.

*Information about the authors:

Ivanova, Elena A. – Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Transport Economics and Management of Russian University of Transport, Moscow, Russia, suntown@bk.ru.

Flyagina, Tatyana A. – Ph.D. (Economics), Associate Professor Department of Transport Economics and Management of Russian University of Transport, Moscow, Russia, t_flyagina@mail.ru

Article received 14.09.2020, revised 10.12.2020, accepted 11.12.2020.

For the original Russian text of the article please see p. 248.

Background.

The destiny of high-speed railways (HSR) construction projects in Russia remains the subject of increased attention of the public, business, and the scientific community. The main problems are associated with the high cost of projects and coordination of investment sources. At the same time, in several countries, for two decades, there has been a gradual development of high-speed passenger traffic. Except for few cases of unsuccessful commissioning of rolling stock, no country, having once decided to develop high-speed rail, has refused to it.

Methods

The study of the possibilities and effects of creating high-speed railways in Russia is based on a desk study of the experience of their development in other countries, on the analysis of secondary statistical data on operation of passenger transport in the Russian Federation, methods of comparison and induction, as well as on a sociological survey conducted in social networks.

Study objectives

The objective of the study presented in the article is to analyse the existing problems and opportunities for implementation of high-speed rail projects, public opinion, as well as the effects that will be obtained from implementation of high-speed transportation on the territory of the Russian Federation.

The authors have analysed the dynamics of transportation by express trains in the Russian Federation, generalised the existing international experience in development of high-speed transportation, studied projects for construction of high-speed trains in the Russian Federation and problems of their implementation. Empirical data from a survey on the intention of residents of the country to use high-speed trains on routes of their proposed commissioning were obtained. By means of inductive reasoning, general conclusions were obtained on the preferred direction of development of high-speed railways, on the need to model a positive public opinion about them and on the effects that will arise during implementation of the corresponding projects.

Dynamics of high-speed transportation in the world

The rapid increase in the length of HSR in several countries around the world has

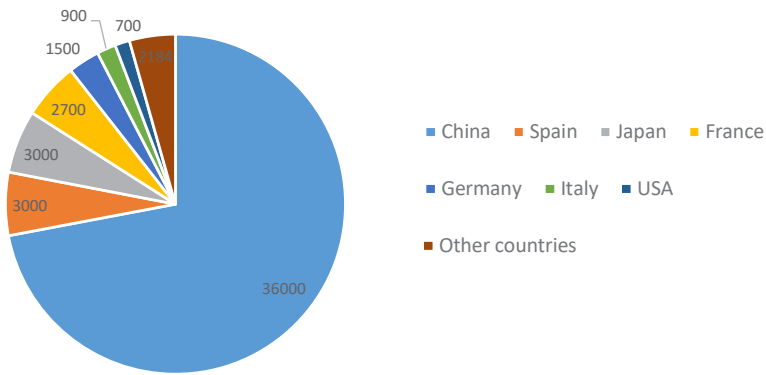
somewhat slowed down in recent years. As far as the countries of the European Union (EU) are concerned, despite 30 high-speed infrastructure projects between the countries and inside some EU countries, several of them have already been delayed by at least a year. According to data of European Court of Auditors the analysis, conducted in 2018 and covering more than 5,000 km of HSR across six EU countries – Austria, Germany, France, Italy, Portugal, and Spain – revealed that trains currently run at around 45 % of their potential velocity. The report says that high-speed railways on the continent are delivering «low-added value». The six aforementioned countries received 83.5 % of all EU funding for high-speed lines [1].

The total length of high-speed railways in the world has exceeded 52,4 thousand km by 2020, while about 12 thousand km were under construction, total passenger turnover exceeded in 2020 956 milliard passenger • km. China is the undisputed leader according to those indicators (Pic. 1) [2]. Besides China, large projects for development of high-speed rail, aimed at increasing transport mobility of the population, the transit capacity of railways, reducing environmental pollution thanks to attracting passenger flows to public transport, are currently being implemented in Turkey, Spain, Italy, Great Britain, Austria, and other countries [3]. It is also reported about the construction of HSR in India, Iran, Poland, and many other countries [4; 5].

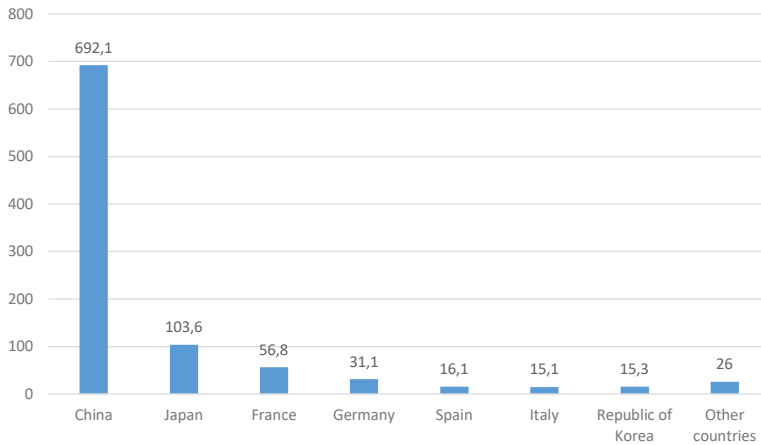
The cost of HSR projects, especially of pilot ones, is very significant, and without government subsidies, as well as without an interested investor, their construction is possible in some, but not all, countries, and not on all initially selected routes.

The payback periods of projects are different. In PRC, the five busiest lines managed to make a profit in the first three to five years. Thus, Beijing–Shanghai HSR after three years of operation (2015–2018) has become highly profitable and, according to preliminary estimates, will pay off in 15 years. The payback of HSR connecting cities in the peripheral regions of China is expected in the longer term. To effectively manage profitability of transportation on the Chinese HSR, dynamic pricing is used [6]. At the same time, in China, construction of HSR is viewed as a measure to stimulate economic growth,





Pic. 1 a. Length of HSR in the leading countries, 2020, km [2].



Pic. 1b. HSR passenger turnover in the leading countries, 2020, milliard passenger·km [2].

transfer of technology, and to create a single economic space both within the country and with foreign countries.

Since 2015, China and the countries of Southeast Asia have been promoting the construction of the Pan-Asian Kunming (China)–Singapore HSR with a length of more than three thousand km, passing through the territories of Laos, Vietnam, Cambodia, Thailand, Malaysia, with branches to the territory of Myanmar. The cost of the project is estimated at more than \$75 billion, with a significant share of Chinese private and budgetary investments [7].

The implementation of such a large international project is associated with many economic and political risks, including the need to reconcile the positions of the countries involved, to consider economic climate in the region, external interference, and activities of contractors, etc. [8]. But despite the high cost and some problems with implementation of the project, the

Government of China, as soon as Kunming–Singapore HSR is commissioned, expects significant revenues to the state budget from both passenger traffic and business development in China's border areas adjacent to the main line, and intensification of trade with the countries of Southeast Asia.

In the USA, development of high-speed rail is paid great importance at the federal level because of congestion of highways and the overloaded capacity of airports serving domestic routes [9]. Express trains are already operated in the corridor (called the Northeast Corridor (NEC)) linking Washington, New York, and Boston. The construction of HSR in California (1300 km) has also started, but opposition from opponents to the project and controversial legal and economic issues regarding this highway remain. The implementation of other projects (in Florida, in the Midwest of the country, etc.) is constrained by unresolved problems with finding investors and conflicts of interest in coordinating projects for which it is supposed

Table 1

Dynamics of transport expenses of the population of Russia, % *

Index	Year	2005	2010	2016	2017	2018	2019
Share of the expenses of the population spent to pay services provided by public transport, %		2,9	3,1	2,4	2,3	2,3	2,3
Transport expenses of population (including private and public transport) on average per a member of a household, roubles per month		516,3	1511,7	2135,8	2686,9	2894,6	3094,1

Compiled by the authors based on the data of Federal State Statistics Service [12].

to attract private funding [3]. Problems with attracting investors to construction of HSR lines are typical of many countries. In France, there were difficulties with implementation of construction of a line from Paris to Charles de Gaulle airport [10].

There are different variants of financing development of HSR in the Russian Federation which are being studied: direct participation of the state in investment activity, private-public partnership, co-financing of projects with budgetary funds of several states (e.g., participation of China had been discussed), granting of concessions to Russian and foreign investors upon the results of public auctions (auctions and competitions) [11].

Dynamics of passenger transportation in the Russian Federation and HSR projects

In the Russian Federation in 2019 about 9 % of population's expenses were linked to transport, including use and purchase of vehicles (6,7 %), payment for services provided by public transport (2,3 %) (Table 1, [12]). The value of transport expenses is gradually growing, while the expenses for travels with public transport are relatively stable. In rapidly developing countries, the share of expenses of households on public transport is higher (about 4 % in China and Brazil, about 7 % in Mexico). In the developed countries, on the contrary, its share is lower: 2,5 % in Germany, 2,6 % in France, 2,4 % in Australia, 1,2 % in the USA, 1,1 % in Poland. The inhabitants of the USA spend about 9,3 % of the household budget on purchase and maintenance of private vehicles, in Germany this figure is about 13,8 %, in France – 14,2 %, Mexico – 18,4 %. The data for foreign countries is calculated by the authors based on OECD 2019 statistics [13].

The total expenses of the inhabitants of Russia linked to public transport have increased

by 15 % during January to September period 2020 regardless the pandemic. The expenses have grown in 2020 as compared to 2019 regarding taxi services, car sharing, lease of electric scooters, while the expenses for metro, bus, trolleybus trips, as well as for car leasing are decreasing (by 45 % in 2020 as compared to 2019). The share of expenses for travelling in city buses, trolleybuses, metro constituted about 19 % of total expenditures linked to the use of public transport [14].

To reasonably choose directions for development of express and high-speed traffic, it is logical to start from the data of the analysis of the dynamics of passenger traffic volumes through the existing network (Table 2, Pic. 2), dynamics and sources of emerging income (Pic. 3). The largest increase in traffic volumes for the period from 2014 to 2018 was observed on the directions Moscow–St. Petersburg (167,71 %), Moscow–Nizhny Novgorod (158,54 %). In the same period, there has been a significant increase in the number of passengers carried on the routes Moscow–Bryansk (139,80 %), Moscow–Belgorod (138,40 %), Moscow–Saratov (123,90 %), Moscow–Kursk (123,42 %), Moscow–Voronezh (122,22 %), Moscow–Kazan (119,48 %) (data of Compass ACS of JSC Russian Railways).

The data on the passenger trips since the start of operation of express electric trains calculated as of January 1, 2019 are shown in Pic. 2.

The analysis of the passenger traffic market on Moscow–St. Petersburg route showed that the total volume of traffic in 2018, excluding road transport, increased by 13,4 % (1,86 mln pass.) compared to 2017 and amounted to 15,75 million pass. At the same time, the volume of transportation by Sapsan trains increased by



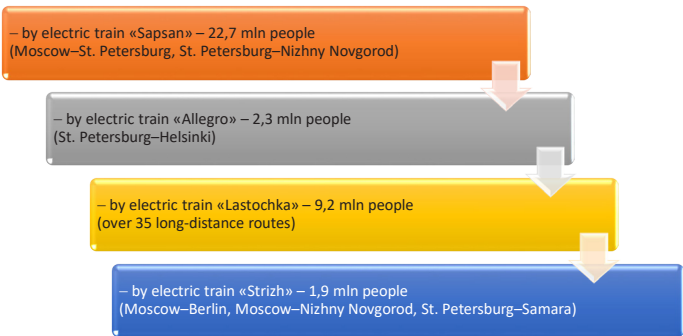
Table 2

Main indicators of passenger transportation using the infrastructure of JSC Russian Railways* (compiled by the authors)

Indicator	2015	2016	2017	2018	2019
Passenger turnover, bln pass.-km	120,6	124,6	122,9	129,4	133,5
Suburban traffic, bln pass.-km	31,1	31,1	31,3	33,1	34,2
Long-distance traffic, bln pass.-km	89,6	93,5	91,0	96,3	99,2
Including speed and high-speed traffic			6,1	7,3	
Passengers departed, mln people	1 025	1 040	1 117,9	1 157,2	1 198,0
Suburban traffic, mln people	967,2	922,5	1 015,7	1 046,9	1 081,5
Long-distance traffic, mln people	103,1	97,8	102,2	110,3	116,5
Including speed and high-speed traffic			12,4	15,6	
Including by high-speed trains of JSC FPC	3,4	3,9	7,0	9,4	

*Data of annual reports of JSC Russian Railways and JSC FPC.

**Pic. 2. Volume and routes of passenger transportation by express electric trains on the territory of the Russian Federation* (compiled by the authors).
*Data of annual reports of JSC Russian Railways and JSC FPC.**



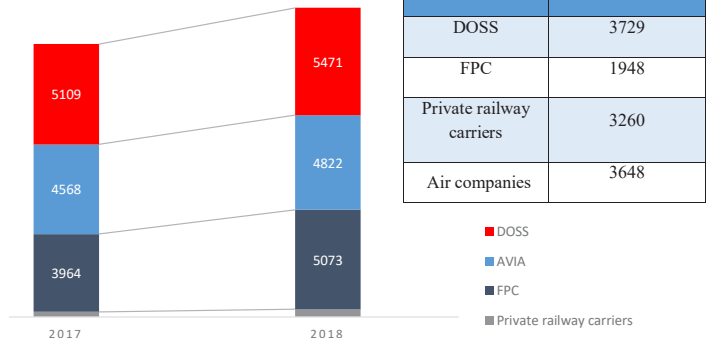
7 % (0,36 mln pass.) and amounted to 5,47 mln pass., with an average ticket price of 3 729 rub. Pics. 3 and 4 show the analysis of the market on Moscow–St. Petersburg route.

Since the launch of Sapsan electric trains in 2009 on Moscow–St. Petersburg route, the traffic volume has grown from 1,62 mln pass. in 2010 to 5,47 mln pass. in 2018. At the same time, the share of Sapsan electric trains in the total traffic by all modes of transport as of 2018 was of 33,1 %. Pic. 5 shows the dynamics of

passenger traffic on all types of transport between two capitals.

Pic. 6 shows average ticket prices on Moscow–St. Petersburg route as per carriers in 2018.

The transit capacity of the current schedule of Sapsan electric trains is 5,94 mln passengers, while the transportation volume in 2018 was of 5,47 mln people. The average population of electric trains in 2018 was 92,1 %, while during peak periods the population of trains exceeded

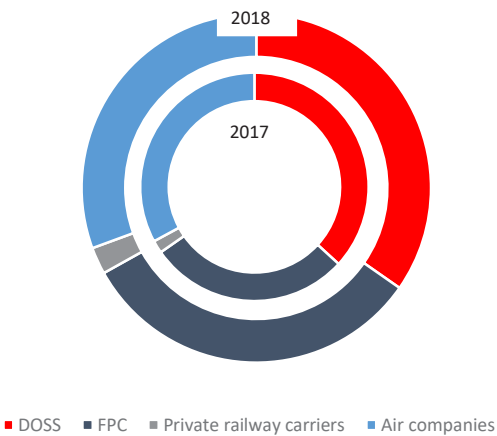


**Pic. 3. Dynamics of departed passengers as per carriers in 2017–2018, thous.pass.* (compiled by the authors).
*Data of annual reports of JSC Russian Railways and JSC FPC.**

110 %, which already reflects a shortage of seats. The size of the current Sapsan electric train fleet of 16 does not allow for an increase in the offer of seats, and, therefore, management should consider purchasing an additional batch of Sapsan trains to meet the growing demand for high-speed railway transportation. And such decisions have already been made: in 2019, the holding company signed a contract for purchase in 2022–2023 of 13 Sapsan trains for the price of 1,1 bln euros.

Pic. 7 shows a diagram of intercity routes selected according to the criterion of the maximum number of passengers carried in 2018. The thickness of the lines reflects the density of passenger traffic. As it can be seen in the Pic. 7 the most important passenger turnover is observed on Moscow–St. Petersburg route, the routes between Moscow and Nizhny Novgorod, Moscow and Sochi, Moscow and Ekaterinburg, St. Petersburg and Ekaterinburg are also sufficiently popular.

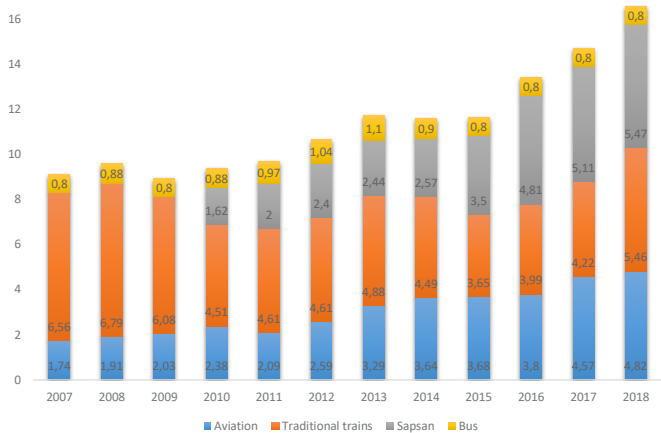
The share of direct income from passenger transportation prevailed in the structure of income from long-distance passenger transportation (91,34 %) in 2018. At the same time, there is a trend towards an increase in



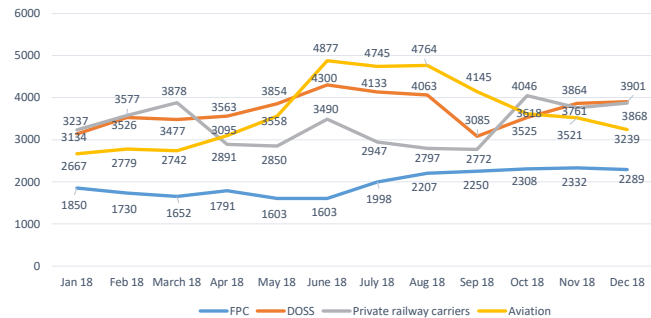
Pic. 4. Distribution of shares of carriers as per departed passengers in 2017–2018, %* (compiled by the authors).
*Data of annual reports of JSC Russian Railways and JSC FPC.

income from the sale of additional services, and that indicates the importance for passengers of quality of the service provided on the train.

Let us examine the dynamics of income collected by Russian Railways holding company from passenger transportation in different categories of trains (data from Compass ACS of Russian Railways) For the period from 2014 to 2018 the growth of income from

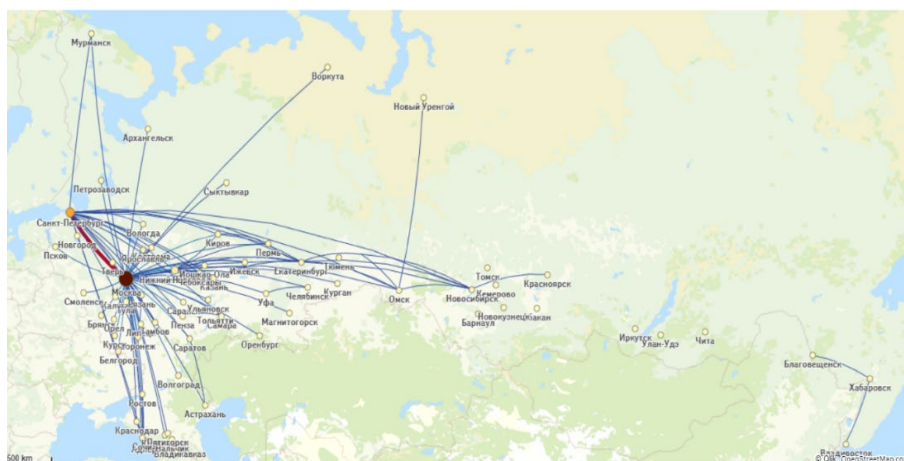


Pic. 5. Dynamics of passenger flow on all modes of transport between two capitals, thous. persons* (compiled by the authors). *Data of annual reports of JSC Russian Railways, JSC FPC and Federal Agency of Civil Aviation.



Pic. 6. Average cost of a ticket on the route Moscow–St. Petersburg as per carriers in 2018, roubles* (compiled by the authors). *Data of JSC Russian Railways and Internet services for air tickets sales.





Pic. 7. TOP-100 of domestic intercity routes as per the number of passengers transported by railway transport in 2018* (compiled by the authors).

**Data for analysis were provided by the High-Speed Transportation Directorate, branch of JSC Russian Railways, the analysis was carried out by the authors using software, developed in the Institute of Economics and Finance of Russian University of Transport.*

transportation in branded trains was ensured, first of all, on the routes Moscow–St. Petersburg (grown by 1,79 times), Moscow–Kazan (2 times), Moscow–Voronezh (1,34 times) and Moscow–Saratov (1,19 times), while revenues from transportation in non-branded trains showed a growth trend on the routes Moscow–Nizhny Novgorod (4 times), Moscow–Bryansk (3 times) and Moscow–Belgorod (2,78 times). The results of the analysis of the dynamics of passenger traffic on the routes, on the one hand, can be considered as the basis for placing different categories of express trains on the marked routes (trains including cars of increased comfort for routes Moscow–St. Petersburg, Moscow–Kazan, Moscow–Voronezh, etc, economy class cars for Moscow–Nizhny Novgorod, Moscow–Bryansk routes). On the other hand, on routes where passengers manifest a growing demand for transportation in trains with a high level of service, it is logical to study feasibility of organising high-speed transportation.

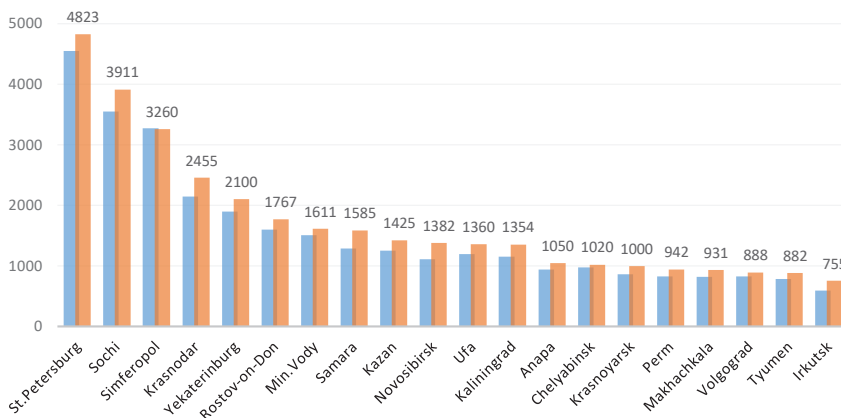
According to statistics, the main «contenders» for construction of HSR remain the routes Moscow–St. Petersburg (JSC Russian Railways conducts engineering surveys and development of project documentation of the route based on the instruction of the President of the Russian Federation of April 2019 No Pr-623; in December 2020 scientific and engineering council of JSC Russian Railways suggested that the Moscow–St. Petersburg HSR passes through Veliky Novgorod [2];

Moscow–Kazan (the route is mentioned in the Comprehensive plan for development and expansion of trunk infrastructure of 2018 [15]); the southern route Moscow–Voronezh–Rostov-on-Don–Sochi [16] seems also to be promising since in the summer months there is a high demand for passenger transportation. Considering the existing objective difficulties due to surface topography for development of high-speed railway infrastructure on Rostov-on-Don–Sochi section, while conducting the survey the authors in the latter case asked question about Moscow–Voronezh–Rostov-on-Don section only.

According to the data of the Centre for Strategic Research «Platform XXI», the most significant directions of passenger transportation from the capital of the Russian Federation by air in 2018 were (Pic. 8): Moscow–St. Petersburg (4,8 mln pass.), Moscow–Sochi (3,9 mln pass.), Moscow–Simferopol (3,3 mln pass.), Moscow–Krasnodar (2,5 mln pass.) [17].

The largest increase in the number of passengers carried was recorded in the period under review on the routes Moscow–Sochi (+362 thousand people or 10,2 %), Moscow–Krasnodar (+307 thousand people or 14,3 %), Moscow–Samara (+299 thousand people or 23,3 %), Moscow–St. Petersburg (+275 thousand people or 6,1 %) [17].

The experience of China shows that introduction of HSR on a route allows switching to railway transport from 30 to 50 % of



Pic. 8. Change in the volume of transportation on the main routes of air transport in 2017–2018, thous. people [17].

passenger traffic from parallel air routes [7]. In addition, construction of a dedicated HSR on a route with the existing capacity limitations contributes significantly to an increase in the number and average speed of freight trains.

Considering the positive dynamics of demand for air and railway transportation by branded trains on the routes Moscow–St. Petersburg, Moscow–Kazan (in the future Yekaterinburg), Moscow–Voronezh–Rostov-on-Don (in the future Krasnodar and then Sochi), the authors found it advisable to study the attitude of inhabitants of the country towards development of relevant HSR projects in the Russian Federation.

Studying the opinion of Russian residents about HSR projects in the country

To clarify social priorities and attitude of Russians to the projects for development of HSR, the authors proactively carried out a sociological survey in social networks. The questionnaire developed by the authors was posted in June–August 2020 in the popular social network VKontakte. The survey involved 545 people representing various categories of consumers of transport services, of which 56 % belong to the age group of 18–25 years, 23 % to 26–40 years old age group, 17,4 % to 41–65 years old people. This ratio of age groups allows us also to better understand the attitude to HSR projects of representatives of the generation, which will mainly use them after the launch of the main lines. The size of the sample of respondents allows us to consider the completed research as qualitative. The evaluation of statistical error was executed following the

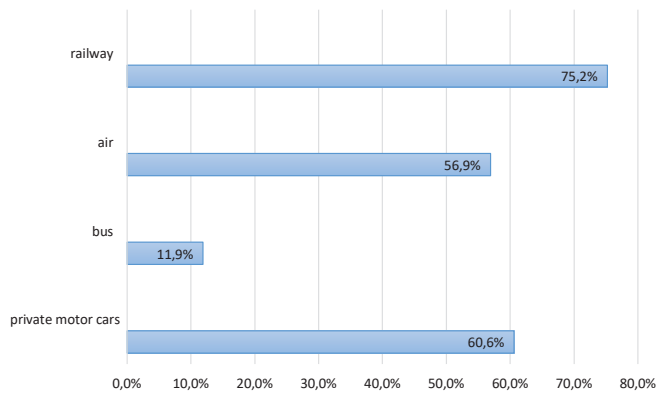
method of calculation of dichotomous variables: with confident probability of 95 % the confident interval was of 4,2 %.

As can be seen from Pic. 9, the surveyed residents of Russia prefer railway transport for intercity travel, the second priority mode of transport for this group of respondents is air transport. At the same time, on the whole, the survey participants demonstrated a generally positive attitude towards the high-speed transport projects being developed. Of the total number of respondents, only 3,7 % of people answered that they did not intend to use HSR for intercity travel. At the same time, 63,3 % of the respondents intend to travel on HSR regularly as far as they have a relevant need (Pic. 10).

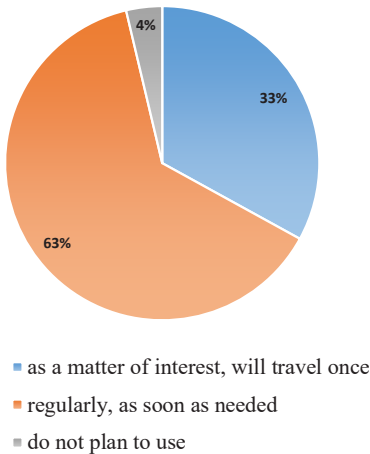
Among the survey participants, the highest priority is given to Moscow–St. Petersburg HSR, the second most attractive is Moscow–Kazan route. Regarding the direction Moscow–Voronezh–Rostov-on-Don, in the surveyed group there are more negative answers about the intention to use that HSR than positive ones (Pic. 11).

About 95 % of respondents intend to travel by high-speed trains on Moscow–St. Petersburg route. At the same time, 69,4 % of the respondents named personal goals as possible goals of the trip, and 59,3 % touristic ones (Pic. 12). Since the sample consisted mainly of young representatives of society, the small percentage of those who indicated business trips cannot be an indicative result of the study. However, judging by the answers of the respondents, they are ready to travel by high-speed trains, even for personal purposes.





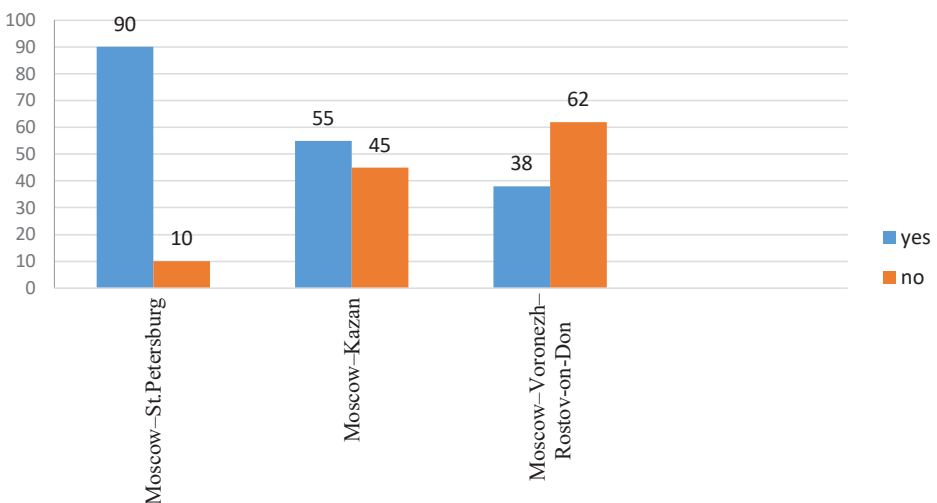
Pic. 9. Modes of transport preferred by survey participants for intercity trips, % of those who noted this mode of transport (compiled by the authors based on the results of a sociological survey).



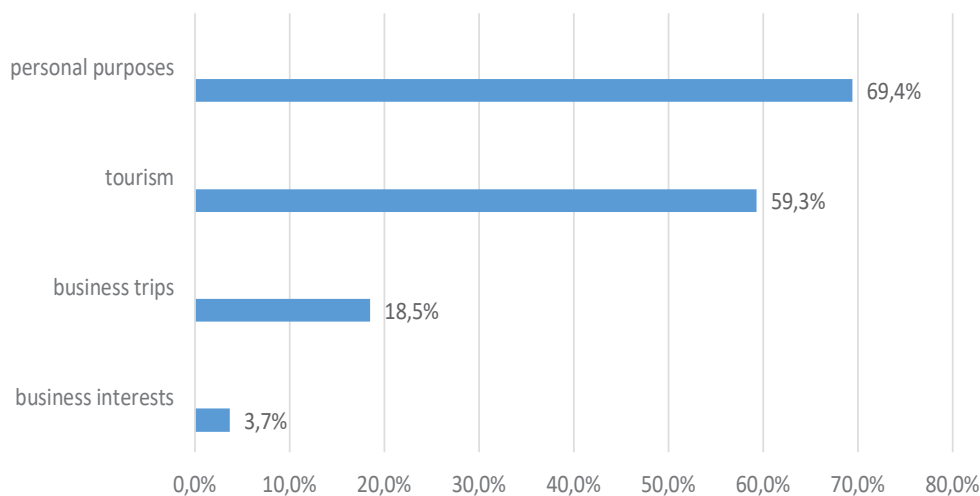
Pic. 10. Distribution of respondents' answers regarding the expected frequency of trips on HSR, %. Compiled by the authors based on the results of the sociological survey conducted.

The results of the sociological survey carried out by the authors allow us to make a qualitative conclusion about the positive attitude of the respondents to the projects for development of HSR in Russia, as well as the fact that the Moscow–St. Petersburg route attracted the most attention among three options. That corresponds to the statistics on growth of traffic on that route presented in Pics. 2, 5, 7 and allows us to conclude that it is advisable to consider this direction as a priority for construction of HSR.

At the same time, to obtain the maximum economic effects from the launch of high-speed traffic on Moscow–Kazan, Moscow–Rostov-on-Don and other routes, it will be necessary to develop a program for modelling a positive public opinion, mainly among the younger generation



Pic. 11. Distribution of answers of respondents about the intention to use HSR after its launch (option to mention a single or more directions), % (compiled by the authors based on the results of the sociological survey conducted).



Pic. 12. Purposes of trips in intercity traffic, indicated by the survey participants, % of those who noted these purposes (compiled by the authors based on the results of the sociological survey conducted).

of the country's residents. The advertised topics and public relations activities under such a program should be based on highlighting the benefits and the work being done by the government and transport companies to reduce the risks of construction of high-speed lines.

External economic effects and possible risks of development of HSR in the Russian Federation

Among the external effects from creation of HSR, the most important are, according to the authors:

- Development of the country's economy as a whole and of HSR gravity regions by increasing transport accessibility of regions.
- Growth of transport mobility of the population of the Russian Federation.
- Strengthening the social and territorial integrity of the Russian Federation.
- Increasing the competitiveness of Russia in the world market of transport services.
- Redistribution of population density from labour-surplus regions of the country to the regions of construction and operation of HSR.
- Regional convergence and levelling of incomes of the population [18].
- Development of tourism and cultural ties with areas gravitating towards HSR, due to the growth of transport accessibility.
- The emergence of additional opportunities for business development and attracting investments to the regions, including foreign ones.
- Innovative development of the transport industry and introduction of digital technologies

and services in transport (blockchain, Big Data, digital communication systems based on the FDTD method, etc.) [19; 20].

- Integration of regions of gravity and expansion of trade exchange.

- Increase in capacity of railways to transport cargo after the construction of dedicated HSR.

- Reducing the negative impact of transport, primarily motor one, on the ecology of the regions [3].

The risk factors for implementation of HSR projects that can have a significant impact on the efficiency of projects are:

- High cost of high-speed transportation for the passenger.
- The required volume of investments in creation of HSR infrastructure.
- The level of capacity utilization (train population) and the volume of current operating costs.
- Technical reliability of rolling stock and infrastructure facilities of HSR under difficult climatic conditions of the Russian Federation.
- Meeting the localisation rate requirements regarding production of rolling stock for HSR, which, according to program documents, should be about 70–80 % [21].

Conclusion.

The development of high-speed transportation is of great social and economic importance for the Russian Federation.



While the amount of transport expenditures of residents in relation to other countries is average, several routes have a potential for growth in demand for express and high-speed transportation. The analysis of the dynamics of volumes and incomes from long-distance passenger transportation and the sociological survey carried out by the authors confirm the potential of Moscow–St. Petersburg route. As the experience of foreign countries summarised in the article shows, development of HSR creates several positive effects on the development of the economy of the regions and of the country. However, to generate the necessary demand for high-speed transportation along the projected mainlines, it is necessary to model a positive public opinion through implementation of a public relations program based on popularisation of economic and other effects arising from construction of HSR.

REFERENCES

1. Slow trains: the EU's high-speed rail network dilemma. *Railway Technology*. 25 September 2018 (Last Updated February 6th, 2020) [Electronic resource]: <https://www.railway-technology.com/features/eu-high-speed-rail-network-dilemma/>. Last accessed 01.10.2020.
2. Official website of JSC Skorstnye magistrali, affiliate company of JSC Russian Railways [Electronic resource]: <http://www.hsrail.ru/info/vsmm/>. Last accessed 01.10.2020.
3. Barbosa, F. C. High-Speed Rail Technology – Increased Mobility with Efficient Capacity Allocation and Improved Environmental Performance. *Proceedings of the ASME Joint Rail Conference*. Pittsburgh, PA, APR 18–20, 2018.
4. Japanese Industrial Townships will come up in 4 states, says Modi. *News portal The Hindu*. September 14, 2017. [Electronic resource]: <http://www.thehindu.com/news/national/shinzo-abe-modi-inaugurate-high-speed-rail-project/article19681706.ece>. Last accessed 01.10.2020.
5. Tehran–Esfahan line should be TSI-compliant, RAI tells Chinese contractors. *Railway Gazette Group official site*, May 20, 2016. [Electronic resource]: <https://www.railwaygazette.com/news/high-speed/single-view/view/tehran-esfahan-line-should-be-tsi-compliant-rai-tells-chinese-contractors.html>. Last accessed 01.10.2020.
6. Qin, J., Zeng, Y. J., Yang, X., He, Y. X., Wu, X. K., Qu, W. X. Time-Dependent Pricing for High-Speed Railway in China Based on Revenue Management. *Sustainability*, Vol. 11, Iss. 16, Article No. 4272, AUG 2019.
7. Zi, U. Railway transport of the PRC and its role in the socio-economic development of China. Ph.D. (Economics) thesis [*Zheleznodorozhniy transport KNR i ego rol' v sotsialno-ekonomicheskoy razvitiy Kitaya. Dis... kand. ekonom. nauk*]. Moscow, Institute of Far East, 2018, 205 p.
8. Chang, T., Deng, X., Hwang, B. G. Investigating Political Risk Paths in International High-Speed Railway Projects: The Case of Chinese International Contractors. *Sustainability*, Vol. 11, Iss. 15, Article No. 4157, AUG 2019.
9. Lane, B. W. On the utility and challenges of high-speed rail in the United States. *Journal of Transport Geography*, May 2012, Vol. 22, pp. 282–284.
10. Ivanova, E. A., Shlein, V. A. Mechanisms for managing quality of transport services for passengers: foreign experience [*Mekhanizmy upravleniya kachestvom transportnogo obsluzhivaniya passazhirov: zarubezhniy opyt*]. *Proceedings of the International scientific and practical conference «Conceptual problems of economics and transport management: a look into the future»*. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2019, pp. 134–137.
11. Koriakin, V. M. Applying invest and concession mechanisms for construction of Moscow–Kazan HSR: legal aspect [*Primenenie investitsionnykh i kotsessionnykh mekhanizmov pri stroitelstve vysokoskorostnoy magistrali Moskva–Kazan: pravovoy aspekt*]. *Transportnoe pravo i bezopasnost'*, 2017, Iss. 8 (20), pp. 6–13.
12. Russia in figures 2020. Short statistical collection. Moscow, Rosstat, 2020, 550 p.
13. Organisation for Economic Co-operation and Development OECD. Official site. [Electronic resource]: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=SNA_TABLE5. Last accessed 01.10.2020.
14. Gaiva, E. Which public transport have the Russian citizens started to spend more during the pandemic for? [*Na kakoi obschestvennyi transport rossijane stali bolshe tratit' v pandemiiu?*]. *Rossiyskaya gazeta*, October 11, 2020. [Electronic resource]: <https://rg.ru/2020/10/11/na-kakoj-obschestvennyj-transport-rossijane-stali-bolshe-tratit-v-pandemiiu.html>. Last accessed 01.10.2020.
15. Comprehensive plan for development and expansion of trunk infrastructure [*Kompleksny plan razvitiya i rasshireniya magistralnoy infrastruktury*] (2018). [Electronic resource]: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>. Last accessed 01.10.2020.
16. Tsydenov, A. S. Development of HSR – guarantee of the success of the country now and in the future [*Sozdanie vysokoskorostnykh magistraley – zalog uspekha strany v nastoyaschem i buduschem*]. *Transport of the Russian Federation*, 2016, Iss. 5 (66), pp. 10–14.
17. Air transportation market in the Russian Federation: 2018. Overview of the Centre for Strategic Research «Platform XXI». [Electronic resource]: <http://platformaxi.org/wp-content/uploads/2019/05/Aviation-Russian-Federation-2018.pdf>. Last accessed 01.10.2020.
18. Yao, S., Zhang F., Wang, F. [et al]. Regional economic growth and the role of high-speed rail in China. *Applied Economics*, Jul 2019, Vol. 51, Iss. 32, pp. 3465–3479.
19. Kargina, L. A., Dmitrieva, T. M. Application of blockchain and smart contracts in transport systems [*Primenenie blokchein i umnykh kontraktov transportnykh sistemakh*]. *Collection of scientific works of 3rd International scientific and practical conference «Transport and logistics: strategic priorities, technology platforms and solutions in the globalized digital economy»*. Rostov-on-Don, RGUPS publ., pp. 142–145.
20. Sahrani, S., Kuroda, M. Numerical Technique for Wireless Communication System with High Speed Movement. 2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS). Espoo, Finland, Aug 2016, pp. 100–102.
21. Flyagina, T. A., Angelov, A., An, M. A. Localization of rolling stock production as a toolkit for ensuring economic security in transport [*Lokalizatsiya proizvodstva podvizhnogo sostava, kak instrumentarii obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti na transporte*]. *Proceedings of 2nd International scientific and practical conference «The contribution of transport to national economic security»*. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2017, pp. 320–322. ●



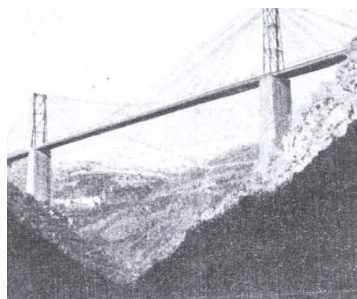
**ИСТОРИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ
ДОРОГ:
СООРУЖЕНИЯ,
СТРЕМЯЩИЕСЯ
ВВЫСЬ 272**

Перу: Центральная Андская железная дорога. Почти 150-летняя история одной из самых высокогорных дорог.



ПРЕСС-АРХИВ 304, 308

Железная дорога во Французских Пиренеях.



Фадский виадук на Орлеанской железной дороге (Франция).

КОЛЕСО ИСТОРИИ • HISTORY WHEEL



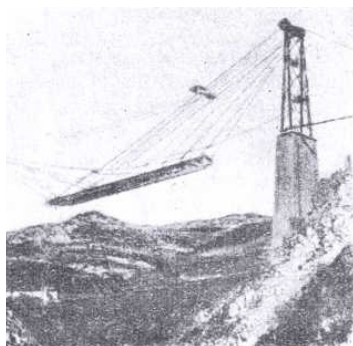
**HISTORY
OF RAILWAYS:
STRIVING
UPWARD 289**

Peru: Ferrocarril Central Andino. Almost 150 years long history of one of the highest mountain railways.



**NEWS FROM
THE ARCHIVES 309, 312**

Railway in the French Pyrenees.



Fade Viaduct on the Orleans Railway (France).



Центральная Андская железная дорога в Перу



Мареk ГРАФФ

Мареk Графф — член редакционных советов журналов «Технологии железнодорожного транспорта» и «Мир железных дорог», Варшава, Польша.*

Построенная в конце XIX столетия Центральная Андская железная дорога в Перу была создана за счёт привлечения иностранного капитала и иностранной инженерной идеи. Масштабные планы по эксплуатации богатейших месторождений меди, серебра и золота легли в основу строительства этой железнодорожной линии. Применённые в этом проекте инженерные решения даже сегодня впечатляют специалистов. В частности, так называемые зигзаги, которые позволили проложить трассу вдоль неприступных горных массивов Анд. Как сказал когда-то главный инвестор проекта, американский предприниматель

Генри Мейггс: «Куда доберётся лама, туда сможет доехать и поезд».

Главным инженером, автором проекта, ведущим надзор за строительством Центральной Андской железной дороги, являлся Эрнест Малиновский, польский специалист, почётный гражданин Перу.

«Проект инженера Эрнеста Малиновского предусматривает прокладку железнодорожной линии на высоте почти 5000 м над уровнем моря, а это невозможно. Реализация спроектированных им мостов и виадуков представляется рискованной», – так оценивали проект польского инженера его современники.

Ключевые слова: железная дорога, высокогорная железная дорога, история железных дорог, зигзаг/реверс, железнодорожные мосты, железнодорожные тоннели, подвижной состав, большая нагрузка на ось, Центральная Андская железная дорога.

*Информация об авторе:

Мареk Графф – Ph.D., член редакционных советов журналов «Технологии железнодорожного транспорта» и «Мир железных дорог» (Technika transportu szynowego; Świat Kolei), Варшава, Польша, marekff77@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 02.11.2020, принята к публикации 21.12.2020.

For the English text of the article please see p. 289.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Перуанская Центральная Андская железная дорога начинается от побережья Тихого Океана и заканчивается в районе медных шахт, расположенных высоко в Андах. Поезда начинают свой путь в Кальяо в границах агломерации столичной Лимы, то есть от порта до станции Ла-Оройя, где дорога делится на два направления, из которых одно ведёт на север до станции Серро де Паско, а другое — на юг до станции Уанкайо. Протяжённость дороги составляет 490 км, в том числе участок Кальяо—Уанкайо — 346 км. Самыми впечатляющими фактами о Центральной Андской железной дороге являются высота её расположения над уровнем моря, которая достигает максимального значения 4782 м (станция Галера на 173-м км трассы), а также наличие 69 тоннелей общей протяжённостью 10,8 км, 58 мостов длиной 1,8 км и шести двойных смен направления движения (знаменитые зигзаги/реверсы), которые были построены с целью обеспечить максимально допустимый уклон пути 29–37 ‰ на протяжении 100 км между станциями Сан Бартоломе на 76-м км дороги на высоте 1513 м над уровнем моря (м н.у.м.) и Тиклио на 171-м км, на высоте 4758 м н.у.м., где поезд преодолевает разницу высот в 3245 м (табл. 1). Максимальный уклон составляет 96,5 ‰ между станциями Тамбо и Хауха (это единичный случай, и на данном участке нет изменения направления движения).

Центральная Андская железная дорога — однопутная, не электрифицированная линия. Ширина колеи составляет 1435 мм. Автор проекта — польский инженер Эрнест Малиновский, главный инвестор — предприниматель из США Генри Мейггс. Трасса на участках с самым большим уклоном проложена на скальных полках. Многочисленные мосты и тоннели знаменитой дороги — это сооружения, размер которых не превышает 200 м (в большинстве их длина составляет от 50 до 100 м). Много раз встречается смена направления движения, а самым эффектным моментом является смена направления движения в тоннеле Бальта. В большинстве случаев стрелки переводятся вручную персоналом поезда. Сложные топографические усло-

вия являются причиной того, что средняя скорость движения на перегонах не превышает 40 км/ч. Следует добавить, что до момента завершения строительства Транс-Тибетской магистрали в Китае в 2007 г. Центральная Андская железная дорога Перу оставалась самой «высокой» железной дорогой в мире^{1, 2}.

Строительство железной дороги в Андах было связано с планами эксплуатации богатых месторождений медной руды, а также сопровождающих эти руды месторождений серебра и золота (в настоящее время Перу и Чили являются главными экспортёрами этих металлов в мире). Медь до сих пор пользуется большим спросом. Более 60 % меди используется для производства электропроводов. Среди металлов более высокой проводимостью отличается только серебро.

На фоне других южноамериканских железнодорожных сетей Центральная Андская железная дорога Перу отличается (помимо высоты) стандартной шириной колеи [4; 17]. В других латиноамериканских странах (Чили, Аргентина, Бразилия) распространены ширины колеи 1000 мм, 1600 мм или 1676 мм, в то время как стандартная ширина колеи 1435 мм встречается крайне редко.

Самая высокая точка дороги расположена в Ла Кима (La Cima) на высоте 4835 м н.у.м. на участке Тиклио—Морокоча вблизи местной шахты. Пути проходят вдоль реки Римака и её притоков мимо станции Чинчан, расположенной в семи км от станции Касапалька (на 153-м км, 4154 м н.у.м.) в западной части Анд. Эта станция служила перегрузочной станцией для добытой руды.

Дальше железная дорога ведёт через тоннель Галера, самый длинный и самый «высокий» (4781 м н.у.м.) тоннель дороги. Потом средняя высота н.у.м. уменьшается, менее крутыми становятся и уклоны.

¹ В настоящее время станция Тангула (Tanggula, 5072 м н.у.р.) на Транс-Тибетской магистрали (Цинхай-Тибетская железная дорога / Qinghai–Tibet railway / Qingzang railway) является самой высоко расположенной железнодорожной станцией в мире.

² Другой железнодорожной линией, расположенной на значительной высоте, в Южной Америке является железная дорога Атофагаста в Чили с самой высокой точкой на высоте 4818 м н.у.м., она также используется для перевозки медной руды.



У станции Яули (на 193-м км, 4192 м н.у.м.) дорога идёт вдоль реки с таким же названием. Потом дорога «встречается» с рекой Мантаро, которую пересекает и доходит до станции Тамбо (на 299-м км, 3359 м н.у.м.), далее пересекает населенные пункты, в том числе Хауха (на 301-м км, 3552 м н.у.м.), Матауаси (на 321-м км, 3265 м н.у.м.), Консепсьон (на 324-м км, 3252 м н.у.м.) и в самом конце пути приводит в г. Уанкайо (на 346-м км, 3261 м н.у.м.).

Сегодня в Ла-Оройя или Уанкайо уже проложено автомобильное шоссе. Для автомобильных дорог допускаются более крутые уклоны и меньшие радиусы кривизны, а также наличествуют другие технологии, разработанные во второй половине XX века. Однако для перевозки тяжёлых грузов в первую очередь традиционно выбирается железнодорожный транспорт.

В настоящее время управление Центральной Андской железной дорогой Перу осуществляется компанией Ferrocarril Central Andino (FCCA), которая принадлежит частному предпринимателю Хуану Олаэча (Juan Olaechea) и группе RDC, которые получили концессию на 30 лет, после того как железная дорога была приватизирована в середине 1999 года. Другими пайщиками компании FCCA являются Ferrovías e Infraestructura (группа Olaechea), Minas Buenaventura, ADR Inversiones UNACEM (лидирующий производитель цемента в Перу) [6; 8]. Для перевозки медной руды и чистой меди используются 36 локомотивов и 881 вагон [15]. Следует особо подчеркнуть, что практически все железные дороги в Перу строились для перевозки грузов, а не пассажиров и что многие из них в настоящее время остаются закрытыми для эксплуатации. Основными видами транспорта в Перу является автобусное сообщение и авиационный транспорт³.

³ Большая площадь Перу (1,29 млн кв. км.), рельеф местности (горные цепи Анд с самым высоким пиком Уаскаран 6768 м н.у.м.) и экваториальный климат (обильные осадки) в восточной части страны являются причиной того, что содержание сухопутной инфраструктуры (автомобильные дороги) трудоёмко и накладно. Поэтому в случае путешествий на дальние расстояния в Перу предпочтительнее авиатранспорт.

ИСТОРИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АНДСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПЕРУ

Эта железная дорога была спроектирована и построена Эрнестом Малиновским, семья которого добровольно по политическим мотивам покинула Польшу. Э. Малиновский учился в Высшей школе мостов и дорог в Париже, которую закончил с дипломом инженера [5]. После приезда в Перу в 1851 году польскому инженеру было поручено разработать проект удлинения железной дороги Лима—Кальяо вдоль долины Хауха в направлении горной цепи Анд. Перуанское правительство создало техническую комиссию, в состав которой вошли Ф. Барреда, М. Ф. Солдан, М. Пардо (Felipe Barreda, Mariano Felipe Paz Soldán и Manuel Pardo), которым было поручено собрать информацию о местном рельефе, геологических и климатических условиях. Информация была необходима для разработки предварительного проекта, который и был поручен Э. Малиновскому. Парламент Перу (Конгресс) принял законы о железной дороге, предложенные Правительством, и гарантировал выплату шести банковских процентов от капиталовложений в строительство. Также была создана комиссия для изучения четырёх возможных (альтернативных) трасс, которые тоже начинались бы в Лиме и вели через:

- 1) Ущелье реки Римака и населённые пункты Матукана, Сан-Матео и Тарма.
- 2) Ущелье реки Чилон и населённые пункты Кабаллеро, Янгас, Обрахильо, Кесачака и Кархуаканча.
- 3) Ущелье реки Чанкай и населённые пункты Чанкай, Макас, Хуатамантага, Уальяй и Серро де Паско.
- 4) Ущелье реки Луруин и населённые пункты Сисикая, Тупикоча, Сан-Дамиан, Туктукоча, Пумакоча, Оройя, Тарма и Хауха.

Согласно подготовленному отчёту, строительство через ущелье реки Римака было сложным, но возможным. В качестве почти невозможного было оценено строительство железной дороги через ущелья рек Чилон и Чанкай, в то время как очень простым было признано строительство через ущелье реки Луруин. Выбор был сделан в пользу четвёртого варианта, подробное изучение которого и разработка проекта были поручены инженеру Герриту Бакусу. Он считался одним из лучших

Таблица 1

Технические параметры участка Кальяо—Лима—Уанкайо
Центральной Андской железной дороги Перу

Станция	км	Высота, м н.у.м.	Наклон, ‰	Примечания
Patio y factoría / Гваделупа	1	3,0	0,6	
Patio central / Кальяо	2	3,6	13,3	
Монсеррат	13	150,0	0,0	
Десампарадос	14	150,0	16,9	
Витарте	26	353,0	16,7	
Санта Клара	29	403,0	18,3	
Чосика	54	860,0	29,7	
Торнамеса	74			Зигзаг
Сан Бартоломе	76	1513,0	33,7	
Матукана	102	2390,0	34,3	
Бисо / Viso	111			Зигзаг вниз / Зигзаг вверх
Тамбораке	120	3008,0	35,6	
Какрей (Cascay)				Зигзаг
Какрей (Cascay)				Смена направления движения
Рио Бланко	134	3506,0	32,6	
Чиелайо	141	3733,9	35,0	Смена направления движения
Салтакуна				Смена направления движения
Касапалка	153	4154,0	29,4	
Бакус				Смена направления движения
Джонстон				Смена направления движения
Чан-Чан	160	4360,0	36,2	
Тиклио	171	4758,0	11,5	Ответвление в направлении Морокоча, 14 км (4538,0 м н.у.м.)
Галера	173	4781,0	29,5	
Румичака				Зигзаг (юг) / зигзаг (север)
Яули	193	4192,0	33,4	
Арапа	198	4025,0	0,0	
Тоннель Мар / Mañr Túnel	196	4025,0	7,1	
Обходная дорога	206	3954,0	14,3	
Ла Оройя	222	3726,0	4,9	
Пачакайо	262	3529,0	4,9	
Ллоклапампа	275	3465,0	4,4	
Тамбо	299	3359,0	96,5	
Хауха	301	3552,0	14,4	
Матауаси	321	3265,0	4,3	
Консепсьон	324	3252,0	1,2	
Сан Иеронимо	330	3245,0	1,0	
Уанкайо	346	3261,0		

специалистов в области строительства железных дорог. Бакус подготовил проект, однако в марте 1866 года работы были приостановлены из-за войны с Испанией. Два года спустя член правительства Д. Масиаш (Diego Masias) связался с Генри Мейггсом, предпринимателем из США, который находился в Чили (он там работал по контракту). «Дерзкий американец» в сентябре 1868 года представил правительству Перу идею строительства дороги Лима—Хауха.

Очевидцы тогда говорили, что он убедил центральные власти Перу аргументом «Проложу пути там, где бегают ламы». План работ и бюджет строительства в размере 27 млн песо были утверждены. Было принято предложение Г. Мейггса и определён обязательный срок завершения строительства в течение шести лет в обмен на правительственные облигации с выплатой 6 % годовых и амортизационные облигации со ставкой 2 % с десятилетним сро-



ком реализации. Договор был заключён между правительством Перу и господином Г. Мейггсом в декабре 1869 года в виде публичного акта, в первой статье которого содержалась запись:

«Генри Мейггс, его наследники, исполнители или законные представители обязуются построить участок... железной дороги между Кальяо и Лимой—Ла-Оройя; согласно плану и техническим чертежам, разработанным главным инженером Эрнестом Малиновским при участии инженера П. Марцо (Pedro Marzo), назначенного правительством, которые были одобрены и переданы на хранение в правительственную канцелярию» [18].

Работы начались 1 января 1870 г. шумным мероприятием, во время которого был заложен первый камень в месте, где сейчас находится станция Монсеррат в Лиме, под руководством начальника технического корпуса, инженера Эрнеста Малиновского. С целью облегчения строительства главная линия Лима—Ла-Оройя (222 км) была разделена на участки:

1. Лима—Кальяо—Кокачакра.
2. Кокачакра—Сан Бартоломе—Сан-Иеронимо-де-Сурко.
3. Сан-Херонимо-де-Сурко—Матукана.
4. Матукана—Парак (Сан Хозе де Парак).
5. Парак—Сан-Матео—Рио-Бланко.
6. Рио-Бланко—Галера.
7. Галера—Ла Оройя.

Однако жизнь внесла свои коррективы, — господину Мейггсу удалось построить железную дорогу только до города Чикла (3733,9 м н.у.м.) в 141 километре от Кальяо. Мейггс столкнулся с серьёзными затруднениями по выплате зарплат нанятым специалистам, рабочим и управленцам. Правительство приостановило строительство дороги. Были завершены только отдельные участки:

- Кокачакра — в феврале 1871 г.;
- Сан Бартоломе — в сентябре 1871 г.;
- Чикла — в мае 1878 г.

В 1879 г. умер Генри Мейггс. В результате конфликта между инвесторами и Правительством Перу строительство было парализовано до 1890 года, когда держатели облигаций приняли на себя права и обязанности Мейггса и организовали Перуанскую корпорацию, которая стала правопреемницей. 12 июля 1892 г. дорога достигла

Касапальки и в январе 1893 года — Ла-Оройи. Это были последние станции Центральной железной дороги.

Строительство участка между Ла-Оройей и Уанкайо было начато в 1905 г., но следующий договор между правительством и Перуанской корпорацией был заключён только в 1907 г. (за этот промежуток времени часть дороги была построена государством), поэтому работы завершились в сентябре 1908 г. В общем итоге строительство Центральной Андской железной дороги Перу продолжалось 38 лет.

Самыми выдающимися инженерными сооружениями этой дороги являются виадук Веррига (Verrugas) или мост Каррион (Carrión) длиной в 175 м и высотой в 80 м и тоннель Галера протяжённостью в 1177 м. Внимания заслуживает также тоннель Бальга (на 94-м км), который отличается спиральной формой и протяжённостью в 1375 м. Этот тоннель преодолевается поездом за 4—5 минут. Самыми впечатляющими участками или станциями железной дороги являются:

- участок зигзаг Каркай—станция Рио Бланко;
- участок Касапалька—Чинчан—Тиклио—Галера;
- участок недалеко станции Чикла;
- участок вблизи станции Сан Бартоломе;
- участок вблизи тоннеля Бальга;
- станция Ла Оройя.

Центральная Андская железная дорога начинает свой путь на железнодорожном вокзале в Лиме на станции Десампарадос, которая находится в центре столицы Перу, здание спроектировано архитектором Рафаэлем Маркуином (Rafael Marquin) в 1912 г.

ПЕРУАНСКАЯ КОРПОРАЦИЯ

В счёт займа, который перуанское государство взяло для финансирования строительства, согласно статьи 26 договора от 20 марта 1890 г. была создана компания, которая взяла под своё управление также 160 км построенной железнодорожной линии.

Из-за громадных долгов, образовавшихся у перуанского правительства во время строительства Центральной железной дороги, в соответствии с Законом об акцио-

нерных обществах 20 марта 1890 была организована Перуанская Корпорация (The Peruvian Corporation Ltd). Компания была создана для того, чтобы выплатить внешний долг и погасить государственные кредиты, которые были взяты держателями облигаций для финансирования строительства Центральной железной дороги Перу. Основная цель корпорации заключалась в передаче прав и обязательств держателей облигаций.

Две недели спустя акции компании были запущены в оборот на Лондонской фондовой бирже. Эта сделка была завершена, наследники Г. Мейггса (Ж. Г. Мейггс, Н. Г. Мейггс и Алехандро Р. Робертсон (Alejandro R. Robertson)) продали Перуанской Корпорации свои доли в Центральной железной дороге и доли в серебряных рудниках Серро де Паско.

В 1891 г. Перуанская Корпорация решила взять под управление все железные дороги страны и превратить их в дочерние компании, разделив акции между собой. Возникло семь компаний, пять из которых находились под контролем дочерних компаний. А две были оформлены через третьих лиц, потому что ещё действовали контракты с государством и другими частными лицами.

Как и следовало ожидать, учитывая экономический кризис, в котором оказалась страна после войны с Чили, возникли проблемы с выполнением контракта. В 1893 г. начались перебои с платежами, и парламент попытался приостановить ежегодные выплаты кредиторам. Перуанская Корпорация не сумела добиться финансирования строительства следующих участков. До 1899 г. стороны так и не пришли к каким-либо договорённостям, и следующий раунд переговоров начался только в 1904 г., а в июне 1907 г. был подписан новый контракт о том, что:

1) Перуанская Корпорация профинансирует строительство всех новых запланированных дорог общей протяжённостью около 300 км.

2) Железнодорожная компания возместит государству все расходы, понесённые при частичном строительстве указанных дорог.

3) Право на эксплуатацию железной дороги компанией будет продлено ещё на

17 лет, при условии, что государственная казна начнёт выплачивать 80 тыс. британских фунтов, которые будут получены из налога на сахар.

Перуанская Корпорация эксплуатировала Центральную железную дорогу непрерывно до 1927 г., а временно — до марта 1973 г.

НАЦИОНАЛЬНАЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ КОМПАНИЯ ENAFER PERU

После государственного переворота и правления военной хунты в 1968–1975 гг. было принято решение о национализации многих предприятий, которые управлялись зарубежными компаниями. Французской фирме Sofresrail было предложено провести анализ окупаемости частных отечественных железнодорожных перевозчиков, исследование рентабельности железных дорог страны, после чего в апреле 1971 г. было принято решение об их национализации. Это коснулось также и дорог, принадлежащих Перуанской Корпорации, штаб-квартира которой находилась в Канаде. Официальным предложением для этого стали недостаточные капиталовложения в компанию. 1 декабря 1972 г. была создана Национальная железнодорожная компания, более известная как ENAFER Peru, в которой были объединены все железные дороги страны, кроме участка Ла-Оройя—Серро де Паско, поскольку тот был очень прибыльным и принадлежал североамериканской компании. С января 1973 г. компания ENAFER Peru управляла линиями:

- Кальяо—Лима—Ла-Оройя—Уанкайо;
- Уанкайо—Уанкавелика;
- Мольендо—Арекипа—Пуно;
- Хульяка—Куско—Матарани—Ла-Хойя;
- Куско—Кильябамба.
- Арика—Такна.

В июле 1973 г. был получен банковский кредит для приобретения подвижного состава и элементов инфраструктуры:

- запасных частей для эксплуатируемого подвижного состава на сумму 12,6 млн долларов США;
- 300 грузовых вагонов и 32 пассажирских вагонов в Румынии;
- 12,7 тыс. тонн рельсов в Канаде;



• 25 дизельных локомотивов, 36 вагонов для перевозки руды из шахт и 40 вагонов-цистерн из Японии.

Компания ENAFER Peru прошла повторную реструктуризацию в 1976 г., а Конгресс утвердил займы на модернизацию в 1979 г. В это время протяжённость железнодорожной сети в Перу составляла 1691 км. Начиная с 1880-х и до начала 1890-х годов уменьшались объёмы перевозок по причине интенсивной эксплуатации линий и недостаточного финансирования их содержания. Реальной проблемой стала также деятельность политических экстремистов из группировки «Сияющий путь», которые действовали в основном в горных районах Перу. По этой причине в 1991 г. было принято решение о повторной приватизации компании. Годом ранее было заявлено о прекращении пассажирских перевозок. Но грузовые перевозки тоже систематически сокращались, а деятельность железной дороги ежегодно приносила только убытки. В 1998 г. были выполнены последние ремонтные работы для 12 локомотивов и 100 вагонов, а также 41 км путей, и в середине июля 1999 г. компания была закрыта. Паи были переданы новым владельцам. Перевозчик FVCA (Ferroviás Central Andina SA) находится под управлением частного лица Хуана ди Диоса Олаэчеа (Juan de Dios Olaechea), которому была выдана концессия на осуществление перевозок в течение ближайших 30 лет. Пайщиками компании FVCA являются: Mitsui, Buenaventura, RDC, Inversiones Andina и CDC. За компанией ENAFER была оставлена эксплуатация участка Арика—Такна.

Первоначально компания FVCA управляла следующими железными дорогами:

1) Главная дорога Кальяо—Ла-Оройя, 222 км.

2) Дорога Ла-Оройя—Уанкайо, 124 км.

3) Ветка Лима—Анкон, 37,3 км, окончательно заброшена и демонтирована в 1965 г. Она являлась частью старой северо-западной железной дороги, в состав которой входила дорога Лима—Анкон—Чанкай, эксплуатация которой началась в декабре 1870 г. Во время войны с Чили участок Анкон—Чанкай был разрушен чилийцами и никогда не восстанавливался.

4) Дорога к горнорудному филиалу Тиклио—Морокоча длиной 14,3 км работала

согласно концессии, предоставленной в 1899 г. и была в эксплуатации с 1903 г.

5) Дорога к горнодобывающему филиалу Морокоча длиной 18,6 км была построена в 1921 г. в качестве ответвления от линии Ла-Оройя—Уанкайо (на 205-м км) вблизи местности Пачачака (Pachachaca). Благодаря этому маршруту на несколько километров было уменьшено расстояние перевозки руды из Морокочи на металлургический завод в Ла-Оройя, что ощутимо сокращало расходы.

6) Конечный пункт назначения Эспинар—Кузко (Espinar—Cuzco).

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

Первые паровозы на железнодорожной сети Перу появились в 1870 г. Они прибыли из США и были выпущены фирмами Rogers и Danforth, а после 1890 г. появились также паровозы, выпущенные фирмами Baldwin и Alco. В 1908 г. эксплуатировались паровозы типа NBL производства Великобритании. Большая часть всех локомотивов — это «сильно» поддержанные единицы подвижного состава, приобретённые в большинстве случаев у железнодорожных компаний США.

Отличительной чертой железных дорог Южной Америки всегда было применение большой нагрузки на ось — 30—35 т, за счёт чего обеспечивается большая сила тяги. Это позволяет при применении удвоенной тяги и автоматической сцепки типа AAR формировать очень тяжёлые поезда, что имеет значение для грузового сообщения. Дизельные локомотивы⁴, используемые в настоящее время перуанскими перевозчиками, в большинстве выпущены фирмами США и Канады — General Electric, подразделением Electro-Motive Diesel General Motors (соответственно, GE и GM EMD), а также Montreal Locomotive Works (MLW). Мощность дизельных двигателей локомотивов, работающих на перегонах, колеблется в пределах 2000—3000 кВт, что

⁴ Электрическая тяга в Южной и Северной Америке используется в ограниченном масштабе — это прежде всего пригородные железные дороги или система наземного метро вокруг крупных городов таких как Монреаль, Буэнос-Айрес или Сан-Паулу, на постоянном токе из контактной сети (например, 1,5 kV DC) или контактного рельса (600—750 V DC). исключением является магистральный путь NEC в США, линия используемая для высокоскоростных поездов и Acela Express перевозчика Amtrak, с питанием тремя видами переменного тока.

вместе с упомянутой большой нагрузкой на ось и системой осей Со'Со' (например, для серии С30М-3—32 т) является абсолютно достаточным, чтобы два локомотива вели тяжёлый грузовой поезд. Локомотивы, как и большинство единиц подвижного состава в обеих Америках, имеют только одну кабину машиниста. Локомотивы и моторные единицы подвижного состава, используемые на перуанских железных дорогах, перечислены в табл. 2 (список может быть неполным).

ЛА-ОРОЙЯ – ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ УЗЕЛ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

Местом переработки медной руды является Ла-Оройя, город в центре Перу, образованный ещё в 1533 году испанцами, которые начали в этом районе крупномасштабную добычу цветных металлов. Однако проблемы с вывозом тормозили рост добычи. Во время войны за независимость Перу стратегическое расположение города привело к тому, что он стал центром партизанской деятельности и местом одного из решающих сражений войны (Чакамарка, Хунин). Настоящее название существует с 1893 г., а в 1942 г. местность Ла-Оройя была наделена правами городского поселения (с 1925 г. является столицей провинции Яули). Крупномасштабная добыча медной руды началась в 1893 г. вместе с завершением строительства железной дороги из Лимы.

В 1922 г. был построен металлургический завод, инвестором выступила американская корпорация Серро де Паско, которая управляла предприятием до 1974 г., т.е. до национализации государством. Тогда завод был включён в состав компании Empresa Minera del Centro del Peru SA, известной также под названием Centromin [11]. Однако уже в 1993 г. было принято решение о приватизации металлургического завода фирмой Doe Run Peru (Дой Ран Перу), дочерней компанией Группы Renco, за 247 млн долл. США. Покупатель потратил 120,5 млн долл. США на приобретение завода и 126,5 млн долл. США на инвестиции в завод. Плюс к этому новый владелец купил медный рудник Cobriza (Кобриза) за 7,5 млн дол. США для обеспечения завода медной рудой. Металлургический завод

в Ла-Оройя — главный работодатель для местных жителей. Наряду с металлургическим заводом, в городе работают также заводы, перерабатывающие свинцовую (с 1928 г.) и цинковую (с 1952 г.) руду, которые производят 70 тыс. тонн меди, 122 тыс. тонн свинца и 45 тыс. тонн цинка. Однако расположение заводов на значительной высоте — 3726 м н.у.м. в условиях разреженного воздуха (меньше кислорода, более низкое давление), вызывает определённые ограничения для производства. Медная руда в Ла-Оройя добывается с большим количеством вредных примесей, которые невозможно удалить в процессе флотации. Однако технологам удалось разработать новые методы разделения и извлечения металлов в виде побочных продуктов. Для этой цели местные плавильные заводы вынуждены были активно интегрироваться между собой. Ла-Оройя — одно из немногих мест в мире, имеющих такую возможность. В результате здесь производят золото и серебро, сурьму, триоксид мышьяка, висмут, кадмий, индий, селен, теллур, серную кислоту и олеум. Это способствует уменьшению выбросов вредных и токсичных металлов. Но эти три металлургических завода достались новым владельцам «сильно потрёпанными». Предыдущий хозяин не придавал значения модернизации. В результате работа этих заводов в настоящее время нарушает многие экологические нормы, что приводит к превышению уровня ПДК (предельно допустимая концентрация) в воздухе мышьяка в 85 раз, кадмия — в 41 раз и свинца — в 13 раз⁵. Высокая концентрация свинца была обнаружена и в крови местных жителей, и в питьевой воде. Как следствие, жители Ла-Оройя довольно часто страдают хроническими болезнями дыхательной системы [16].

МЕДНАЯ РУДА: ДОБЫЧА, ОБОГАЩЕНИЕ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ЭКОНОМИКИ

Человек использует медь более десяти тысяч лет, и она играет особую роль в развитии цивилизаций (например, эпоха

⁵ Перечисленные химические элементы вызывают хронические отравления, и отличаются канцерогенным эффектом. Особо токсичными являются мышьяк и его соединения, например, белый мышьяк.



Локомотивы и моторные единицы подвижного состава, используемые перуанскими железными дорогами

Производитель	Серия	Годы производства	Схема осей	Вес ед. пол. состава, т	Макс. скорость, км/ч	Мощность диз. двигателя, kW	Мощность диз. двигателя, kW	Кол. единиц	Примечания
GM-EMD	GR12	1953–1968	Bo'Bo'	72	100	1310	977	2	Модифицированные кабины машиниста
MLW	DL532B	1961–1962	Bo'Bo'	нд	нд	1035	772	3	Маневровые локомотивы, только 1 локомотив в исправном состоянии. Второй ждёт ремонта
MLW	ALCO-DL560	1962–1998	Co'Co'	113	120	2600	1940	1	Приобретённые как новые от производителя
EMD	GM C22CW	1969–1974	Co'Co'	92	120	1500	1119	2	1 единица снята с эксплуатации
EMD	SD40-2 SD-40	1972–1989	Co'Co'	167	105	3000	2238	2 1	Один локомотив SD-40 имеет модифицированную систему охлаждения диз. двигателя
GE	C30 7PA	1976–1985	Co'Co'	191	113	3000	2238	4	Модифицированный по причине превышения габарита при прохождении через тоннели Матукана и Галера
GE	C30M-3	1976–1985	Co'Co'	191	113	3000	2238	2	Подвергались доработке на заводе Locomotoras San Luis в Мексике
GE	C30M-3 C36-7p C39-08	1976–1985 1978–1989 1984–1987	Co'Co'	191 191 нд	113 113 113	3000 3600 3900	2238 2686 2909	3 1 1	Локомотивы, приобретённые после 2000 г., и снятые с эксплуатации
GE	B39-E8	1983–1994	Bo'Bo'	нд	нд	3900	2909	2	
GE	C39-08	1984–1987	Co'Co'	нд	113	3900	2909	8	
GE	C39-8P	1984–1987	Co'Co'	нд	113	3900	2909	8	Приобретённые у компании Conrail из США, модифицированные из-за превышения габарита при прохождении через туннели Матукана и Галера
EMD	JT26CW-2B	1985–1995	Co'Co'	126	120	3000	2238	3	Запущены в эксплуатацию в июне 2020 г.
GE	C-40CW	1989–1994	Co'Co'	нд	113	4000	2984	2	Получены от перевозчика CSX из США в мае 2020 г.
EMD	GT42AC	1999–2005	Co'Co'	120	100	3300	2460	нд	
Beyer–Peacock	нд	нд	1'D	нд	нд	нд	нд	1	Паровоз британского производства; снят с эксплуатации
DUEWAG AG	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	3	Моторные вагоны для будущей трамвайной линии в Лима–Чосика (Chosica)

* Величины получены в результате пересчёта миль/ч в км/ч (например, 113 км/ч соответствуют 70 миль/ч). Bo'Bo' означает локомотив с двумя двухосными тележками, каждая ось - ведущая. Co'Co' означает локомотив с тремя ведущими колёсными парами.

бронзы — это сплав меди и свинца). 95 % меди, которая находится в употреблении в настоящее время, были добыты после 1900 г. Латинское наименование меди *cuprum* происходит от Кипра, где её первоначально добывали. Наряду с производством электропроводов данный металл используется ещё для покрытия крыш и изготовления водосточных труб (20 %) и промышленных станков (15 %). Стоит подчеркнуть, что 35 % меди от 22,1 млн тонн (2009 г.) всего мирового производства получается в процессе рециклинга [14].

Легко заметить, что около половины всей добываемой в мире меди было получено в Перу и Чили — около девяти млн тонн (табл. 3). Разработка залежей меди окупается, если её содержание в руде составляет 0,5 %, очень выгодно начинать добычу руды при содержании меди в руде более 2 %. Несмотря на то, что медь до сих пор нередко появляется в самородках, чаще всего она встречается в виде сульфидов и окислов:

- куприт Cu_2O (89 %);
- халькозин Cu_2S (80 %);
- борнит Cu_5FeS_4 (63 %);
- малахит $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ (57 %);
- азурит $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ (53 %);
- халькопирит CuFeS_2 (35 %),

которые отличаются высоким содержанием меди (за исключением халькопирита — 35 %).

Одной из причин такого обилия залежей меди в Перу и Чили является весьма «юный» возраст Анд, где до сих пор есть действующие вулканы. В том числе Льюльяльяко (Llullaillaco), расположенный на границе Чили и Аргентины, один из самых высоких вулканов на Земле (6739 м н.у.м.). Там часты землетрясения, что свидетельствует о том, что процесс формирования гор ещё далёк от завершения. А вулканические процессы, как известно, способствуют перемещению пород из нижних слоёв земной коры в верхние. Медь — элемент с большей плотностью, чем например, кремний или алюминий. Соответственно, окиси этих элементов находятся в нижних слоях земной коры.

Доля металлов — в виде руды или в чистом виде — в экспорте Перу остаётся большой и колеблется в пределах 50 %

(табл. 4). Добыча медной руды осуществляется:

- в глубинных шахтах за счёт строительства глубоких вертикальных стволов и долбления горизонтальных штреков;
- в карьерных шахтах, для залежей на небольших глубинах, где руда добывается после устранения слоёв безрудных скал; в настоящее время около 90 % медной руды добывается именно в карьерных шахтах.

Руда перевозится крупнотоннажными грузовиками (карьерными самосвалами), зачастую без водителя, с использованием навигационной спутниковой системы GPS. В медной руде иногда встречаются самородки серебра и золота, которые добываются как в Перу, так и в Чили в значительном количестве (табл. 5, 6).

Производство меди из руды является многоэтапным процессом (табл. 7), который сопровождается выделением токсического оксида серы, который может быть использован, например, для производства серной кислоты. Для этого процесса необходимо много энергии для создания высокой температуры (1200 °C).

Несмотря на то, что медь является элементом, жизненно необходимым человеку (дневная норма 2–3 мг, максимально 10 мг), в большем количестве она становится ядом (например, летальная доза сульфата меди составляет всего 30 г).

Серебро и золото, которые часто «сопровождают» медную руду, не токсичны⁶ для человека. Но в процессе их добычи и очистки в значительных объёмах применяются, в том числе, ртуть и растворы цианистого калия или натрия, которые являются очень сильными ядами (летальная доза составляет 50–100 мг KCN или NaCN для взрослого человека). По этой причине добыча перечисленных трёх металлов требует строгого соблюдения безопасности и гигиены труда.

Энергетика в Перу отличается широким использованием гидроэнергии (26 %) и энергии из природного газа (25 %) (табл. 8). На заводах, перерабатывающих руду, используется электроэнергия, вырабатываемая гидроэлектростанциями, что кажется самым простым решением.

⁶ Соединения серебра являются токсическими для микроорганизмов.



Таблица 3

Производство меди [2]

Место в рейтинге	Государство/Регион	2017 г.	2018 г.	запасы
		млн тонн		
	Мир	20,00	20,67	830
1	Чили	5,50	5,80	170
2	Перу	2,45	2,40	83
3	Китай	1,71	1,60	26
4	США	1,26	1,20	48
5	Конго	1,09	1,20	20
6	Австралия	0,86	0,95	88
7	Замбия	0,79	0,87	19
8	Мексика	0,74	0,76	50
9	Россия	0,71	0,71	61
10	Индонезия	0,62	0,78	51
11	Остальные страны	4,25	4,40	210

Таблица 4

Доля металлов в экспорте Перу (2018 г.) [13]

Общая стоимость экспорта	млрд долл. США	%
	53,5	100,00
Руды меди	11,2	20,93
Золото	6,86	12,82
Рафинированная медь, сплавы меди и медные провода	2,16	4,04
Руды цинка	0,81	1,51
Руды свинца	0,85	1,59
Сырой цинк	1,984	3,71
Руды железа	0,744	1,39
Цветные металлы, сырье	0,697	1,30
Руды молибдена	0,631	1,18
Сырое олово	0,256	0,48
Серебро	0,355	0,66
Итого	26,55	49,62

Таблица 5

Производство серебра [2]

Место в рейтинге	Государство/Регион	2017 г.	2018 г.	запасы
		тыс. тонн		
	Мир	26,8	27	560
1	Мексика	6,11	6,1	37
2	Перу	4,30	4,3	110
3	Китай	3,50	3,6	41
4	Польша	1,29	1,3	110
5	Чили	1,26	1,3	26
6	Боливия	1,24	1,2	22
7	Австралия	1,20	1,2	89
8	Россия	1,12	1,2	45
9	США	1,03	0,9	25
10	Аргентина	1,02	1,1	bd.
11	Остальные страны	4,77	4,8	57

Таблица 6

Производство золота [2]

Место в рейтинге	Государство/Регион	2017 г.	2018 г.	запасы
		тонн		
	Мир	3181	3261	54 100
1	Китай	426	400	2 000
2	Австралия	301	310	9 800
3	Россия	270	295	5 300
4	США	237	210	3 000
5	Канада	164	185	2 000
6	Перу	151	145	2 600
7	ЮАР	137	120	6 000
8	Гана	128	130	1 000
9	Мексика	126	125	1 400
10	Узбекистан	104	105	1 800
11	Остальные страны	1137	1236	19 200

Электроэнергия используется, прежде всего, в процессе электролитического рафинирования меди. Содержание меди в руде, даже после обогащения, составляет только 2 % (табл. 7), поэтому выгоднее перерабатывать руду на местах её добычи, чем транспортировать её поездом на заводы, которые находятся в долинах, например, в Лиме, где концентрируется почти половина промышленного производства Перу. Как было сказано выше, плотность меди высокая, больше чем у железных руд, поэтому вагоны нужно наполнять не полностью, дабы не превысить допустимую нагрузку на ось.

ЭРНЕСТ МАЛИНОВСКИЙ И ГЕНРИ МЕЙГГС – ВЫДАЮЩИЕСЯ ЛИЧНОСТИ

Две личности, без которых Центральная железная дорога Перу не была бы построена, это – польский инженер Эрнест Малиновский и американский предприниматель Генри Мейггс. Их знания, смелость, иногда даже дерзость, умение располагать к себе людей сделали возможным строительство этой уникальной железной дороги. Применённые технические решения, несмотря на сложные рельефные и климатические условия, вызывают восхищение до сих пор. Тем более, что все строительные работы выполнялись обыкновенными лопатами, кирками, одноколёсными тачками, а сам проект был разработан на чертёжной доске с использованием карандаша, чертёжного треугольника и лекала.

Таблица 7

Переработка медной руды

Этап	Процесс	Описание процесса	Химическая реакция	Примечания
1	Дробление и измельчение	Дробление руды в крупных шаровых мельницах	—	Содержание меди в порошке составляет ~2 %
2	Пенная флотация	Смешивание руды с парафиновым маслом с целью получения гидрофобной поверхности минерала и водяная ванна с пенообразователем. За счёт закачивания воздуха пена собирает частицы минерала на поверхности воды, в то время как безрудные остатки падают на днище резервуара	—	Содержание меди в получаемой массе составляет ~25 %
3	Обжигание	Обжигание концентрата руды, извлечённого в процесс пенной флотации, т.е. преобразование обогащённой руды меди в смесь сульфидов меди при температуре 500–700°C	$2\text{CuFeS}_2 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO} + 2\text{CuS} + 2\text{SO}_2$	Токсичный SO ₂ может быть использован для производства H ₂ SO ₄
4	Плавка с вводом флюсов	Кальцинат подогревается до температуры > 1200°C с флюсами, например, SiO ₂ , или CaCO ₃ , в результате образуется шлак, который легко отобрать, и медный штейн, т.е. сульфид железа и сульфид меди	$\text{FeO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 \text{ (шлак)}$ $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{SO}_2$	
5	Переработка конвертерного штейна в конвертерную медь	Окисление медного штейна в шахтной печи	$2\text{FeS} + 3\text{O}_2 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{SO}_2$ $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{SO}_2$	Для получения меди применяется блистер
6	Разливка меди	Процесс разливки осуществляется в карусельной машине. Поверхность анода составляет около 1 м ²	—	Чистота полученной меди составляет 99 %
7	Электролитическое рафинирование	Процесс осуществляется в электролитическом очистном резервуаре в растворе CuSO ₄ + H ₂ SO ₄ (200 А, 1,3 В) и заключается в электролитическом растворении анода и одновременном осаждении катодной меди на днище резервуара; нерастворимый шлам содержит Au, Ag, Pt и Sn (для использования)	anod: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ katod: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	Чистота полученной меди составляет 99,99 %

Источник: разработано автором статьи.

Эрнест Малиновский (1818–1899) родился в богатой дворянской семье на Волыни (его дед со стороны матери был Подольским воеводой) [1; 7]. Семье Малиновских принадлежало поместье в Рожичной на Подоле, которое было конфисковано царским правительством после ноябрьского восстания. У Эрнеста были два брата и сестра – старшие сестра Леонтина (умерла до 1831 г.) и брат Рудольф, а также младший брат Зигмунд. В 1827–1831 гг. юный Эрнест учился в Кшеменецком лицее. После ноябрьского восстания 1831 года,

в котором участвовали брат Рудольф (вступил в повстанческую армию) и отец Якуб (был послом повстанческого сейма), братья Эрнест и Зигмунт с мамой (Анной Малиновской) уехали в Галицию. После подавления восстания Анна вместе с младшим сыном Зигмундом вернулась на Волынь, в то время как отец с двумя сыновьями (Эрнестом и Рудольфом) уехали в Дрезден, а потом в Париж. Во Франции Эрнест продолжил учёбу в «Лицее Людовика Великого» (Lycée Louis-le-Grand) в Париже, а потом в знаменитой «Политехнической



Таблица 8

Баланс первичной энергии в странах Южной и Центральной Америки (2019 г.)

		Нефть	Газ	Каменный уголь	Атомные электростанции	Водные электростанции	ВИЭ
Аргентина	%	34,3	49,4	0,7	2,2	9,5	4,0
Бразилия		38,1	10,4	5,3	1,2	28,7	16,3
Чили		45,8	14,1	17,1	—	11,2	11,6
Эквадор		66,8	3,1	—	—	29,7	1,0
Колумбия		36,5	25,2	13,4	—	23,9	1,1
Перу		43,7	25,8	1,9	—	24,3	4,6
Тринидад и Тобаго		11,6	88,9	—	—	—	0,0
Венесуэла		31,7	42,7	0,1	—	25,3	0,1
Остальные		62,2	7,7	5,5	—	17,8	6,7
Всего		41,4	20,8	5,2	0,8	22,3	9,5

Источник: BP Statistical Review of World Energy, 2019.



Эрнест Малиновский

школе» (École Polytechnique) и в «Национальной школе мостов и дорог» (École nationale des ponts et chaussées). Получив диплом инженера, Малиновский начал работать на строительстве железной дороги «Париж—Гавр» в 1838 г., а в 1839 г. участвовал в строительстве дорог и порта в Алжире. Принимал участие в работах на реке Маас возле границы с Бельгией, а также в работах по улучшению судоходных условий на реке Шер. Южноамериканский период жизни

Малиновского начался в 1852 г., когда он заключил семилетний договор о «трудоустройстве в качестве правительственного инженера» в Перу, для [10]:

- разработки проектов дорог и мостов;
- надзора над выполнением строительно-мелиорационных инвестиций;
- составления топографических карт;
- обучения местных технических кадров.

В Перу Малиновский отправился на корабле, вместе с двумя французскими инженерами — Эмилем Шевалье и Шарлем Фрагеттом. На месте он организовал первую техническую школу — Escuela Central de Ingenieros Civiles и организацию, объединяющую инженеров — Comisión Central de Ingenieros Civiles. Первыми работами, в которых принял участие Малиновский, были проекты мощения улиц и площадей в Арекипе и модернизация каменного моста Идзакучака (Izacuchaca). Договор был продлён Малиновским ещё на три года в 1858 г. Первыми железными дорогами, которые проектировал Эрнест Малиновский были [3]:

- Писко—Ика (74 км) в 1859 г., вместе с Марио Аллеоном и Герритом Бакусом;
- Чимботе—Уараз (277 км; было построено лишь 136 км по причине финансовых затруднений) в 1864 г., совместно со Стивеном Кросби и Д. Н. Паддисоном. Разница уровней на этой дороге составляет >3000 м. Э. Малиновский выполнял также надзор за работами.

Во время войны за независимость Перу с Испанией в 1866 г. Малиновский был

назначен главным инженером в порту Кальяо, где вместе с Фелиппе Арансибой и Хосе Корнелио Борда подготовил проект укрепления порта. Он участвовал и в обороне порта, сражаясь на валах форта Санта-Роза. При защите порта Малиновский применил множество новаторских инженерных решений. Он использовал крупнокалиберные пушки, которые остались ещё после Гражданской войны в США. Их оснастили броней и разместили на железнодорожных платформах, чтобы пушки могли легко менять своё положение. Это значительно увеличило подвижность артиллерии и создавало у противника впечатление, что у обороны больше орудий, чем на самом деле. В знак признания заслуг Эрнеста Малиновского перед народом Перу, он получил диплом, медаль и почётное гражданство.

Самым большим делом жизни инженера Малиновского было участие в проектировании и строительстве Центральной железной дороги Перу. В 1868 г. он начал сотрудничество с Генри Мейггсом, предпринимателем из США, который получил заказ на разработку технико-экономического обоснования железной дороги и поручил эту задачу Э. Малиновскому. После набора команды и восьми месяцев работы в апреле 1869 г. Малиновский передал Г. Мейггсу подробный отчёт. И уже в декабре 1869 г. был заключён (говорят, что без взяток не обошлось) договор между компанией Г. Мейггса и правительством Перу о строительстве Центральной железной дороги, которую должны были построить в течение шести лет за 27,6 млн песо (~ 22 млн долларов США). Э. Малиновскому как главному инженеру был поручен надзор над строительством линии. Точно было прописано, что:

- стоимость строительства дороги профинансирует перуанское правительство, а расчёт с исполнителями будет производиться путём передачи купонов с годовыми процентами;
- выплата вознаграждений инженерам и рабочим осуществляется Г. Мейггсом из его фондов;
- компания Г. Мейггса выкупит у частных владельцев земельные участки, расположенные на трассе будущей железной дороги;
- правительство передаст безвозмездно государственные земельные участки.



Генри Мейггс.

Работы начались в январе 1870 г., и на первом этапе при строительстве участка дороги через долину реки Римака всё шло без затруднений. Сложности начались на 54-м км на высоте 860 м н.у.м. на станции Чосика (Chosica), где начинался горный рельеф. Среди нанятых рабочих в основном были перуанские индейцы, чилийцы, китайские кули, итальянские эмигранты и афроамериканцы, в общем итоге около десяти тысяч человек. Э. Малиновский лично выполнял надзор за работами, вёл бухгалтерию, напрямую устанавливал связи с поставщиками подвижного состава и строительных материалов, а также наблюдал за обеспечением соответствующих условий труда и своевременной выплатой вознаграждений нанятым людям.

Порой он лично поднимался на крутые горные склоны, чтобы обеспечить техническое решение того или иного вопроса, или спускался по канату в пропасть, дабы обследовать прочность почвы в местах установки мостовых быков. Он считал себя частью команды — работал, ел и спал вместе со всеми, вместе со всеми страдал от сложного перуанского климата: днём — жара, а ночью — морозы.

В 1874 г. правительство приостановило финансирование строительства. Тогда Г. Мейггс и Э. Малиновский стали финансировать дорогу из собственных фондов.

Инновационным техническим решением на этой дороге являлись так называемые зигзаги и реверсы, т.е. двойная смена на-





Локомотивы серии GE C30-7 № 1008 + 1009 на стальном мосту между Рио Бланко (134-й км, 3506 м н.у.м.) и Сан-Матео (14.07.2013 г.). Фотография Kabelleger / D. Gubler.

правления движения, которые позволяли сохранить максимальный уклон 40 ‰ для железнодорожной линии. Это был впечатляющий успех, после которого Эрнест Малиновский был признан выдающимся инженером, о чём писали технические журналы в Перу и по всему миру. Первый участок Центральной железной дороги протяжённостью в 141 км между Кальяо и Чикла (Chicla) был открыт для эксплуатации в мае 1878 г. Малиновский тем временем уехал в соседний Эквадор, где участвовал в строительстве железнодорожной линии Гуаякиль—Кито, в том числе участков Чимбо и Сибамбе (Sibambe), расположенных в горных частях Западных Кордильер. В 1879—1881 гг. в Перу шла война с Чили, по этой причине строительство железной дороги было приостановлено. В Перу Малиновский вернулся в 1886 г., чтобы вместе с другими польскими эмигрантами В. Фалькерским и К. Вакульским участвовать в строительстве железнодорожной линии Тарма—Ла-Мерсед. В 1890 г. Малиновский стал пайщиком Перуанской Корпорации, образованной, в том числе, с целью завершения строительства Центральной Андской железной дороги: в 1893 г. был построен ещё один (очень важный) участок до станции Ла-Оройя.

Эрнест Малиновский был не только выдающимся инженером, он был очень талантливым организатором. Инженер

Малиновский часто бывал среди элиты общества Перу, богатых и влиятельных людей. Жил в элегантной гостинице в Лиме, вёл открытый дом, в котором принимал много гостей, нанимал французского повара. Часто приглашался в дома высших слоёв общества. Малиновский занимался филантропической деятельностью. Был автором двух книг: «Деньги Перу», Лима, 1856 г. и «Центральная Андская железная дорога Перу», Лима, 1869 г.» (La moneda en el Perú и Ferrocarril Central-Transandino), а также нескольких статей для институтского «Шахтёрского бюллетеня» (Boletín de Minas). Малиновский был большим ценителем классической и современной литературы.

Стоит отметить, что Эрнест Малиновский всегда старался помогать польским эмигрантам. Он устроил на работу инженеров: А. Бабинского, В. Фолькерского, Э. Хабихова, В. Клюгерова, А. Мечниковского и К. Вакульского. Помогал биологам К. Иельскому и И. Семирадзскому.

Умер Эрнест Малиновский в 1899 г. от инфаркта, был похоронен с почестями как национальный герой на кладбище «Пастор Матиас Маэстро» (Presbítero Maestro) в Лиме. В 1999 г. вблизи станции Тиклио был открыт памятник Эрнесту Малиновскому. Автором памятника стал известный польский скульптор Густав Казимеж Земла (автор знаменитых «Крыльев», установлен-



Паровоз с колёсной парой ширины 914 мм производства фирмы Baldwin из США на станции Уанкайо (20.03.2010 г.). Фотография N. Öberg.

ных в Катовицах). Памятник был сделан из гранита в Польше. На нём написано на испанском и польском языках: *Эрнест Малиновский, 1818–1899. Польский инженер, перуанский патриот, герой обороны Кальяо 1866, строитель Центральной железной дороги.*

Генри Мейггс (1811–1877) родился в Катскилле (Catskill), в штате Нью-Йорк в США, был третьим из девяти детей Илайи и Фенни Мейггсов [9; 12]. Отец управлял верфью, в которой начинал работать и молодой Генри. Но став самостоятельным, Генри решил заняться торговлей древесиной. Успеха не добился, два раза обанкротился. Когда появилась информация о залежах золота в Калифорнии («золотая лихорадка») в начале 1850-х, Мейггс отправился в другой конец страны в Сан-Франциско на корабле, гружённом древесиной. Тогда ещё не было железной дороги вокруг, также как и Панамского канала⁷. Мейггс правильно рассчитал, что для строительства нового города древесина потребуется сразу и в больших количествах. Его расчёты оправдались (прибыль от реализации древесины была почти двадцатикратная). На заработанные деньги, на набережной North Beach, Мейггс построил склад, лесопильный завод, и верфь, чтобы

завозить и обрабатывать лес и предоставлять портовые услуги. Высокий спрос на древесину сохранялся, так как город продолжал развиваться, поэтому компания Генри Мейггса чувствовала себя хорошо. Но Генри Мейггс прославился ещё и как знаменитый оратор и талантливый организатор, поэтому он решил стать городским депутатом. В 1853 г. Мейггс решил построить пирс, уходящий в море на 650 м. Инвестиция оказалось провальной по причине сильных морских течений. Ко всему «золотая лихорадка» постепенно начала затухать, а количество жителей — уменьшаться. Рынок недвижимости погрузился в очередной кризис. Генри Мейггс к тому времени набрал кредитов и расплатился по ним деньгами из городских фондов. По этой «криминальной» причине он очень быстро собрался и покинул США вместе с семьёй, забрав всё своё имущество на корабль. После трёх месяцев путешествий Генри прибыл в Чили и направил свою активность на проекты строительства железных дорог. Первый заказ он получил в 1857 г. и до 1867 г. построил более 300 км железных дорог. Наряду с предпринимательской деятельностью он активно участвовал в общественной жизни и благотворительных акциях. В 1868 г. перебрался в Перу, где построил более 1100 км железных дорог, в том числе Центральную железную дорогу в сотрудничестве с Эрнестом Малинов-

⁷ Построен в 1904–1914 гг., а официально открыт в 1920 г.





Железнодорожная станция Chosica (54-й км, 860 м н. у. м.) (21.03.2010 г.). Фотография N. Öberg.

ским. Это позволило ему накопить значительный капитал и рассчитаться с долгами на родине, куда он всё-таки планировал когда-нибудь вернуться. К 1873 г. Мейггс выплатил все долги с процентами. Но в США, в конечном счёте, так и не вернулся и до конца жизни оставался в Перу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Центральная Андская железная дорога Перу, построенная на переломе XIX–XX вв. была грандиозным проектом. Несмотря на очень скромный бюджет, при отсутствии каких бы то ни было технологий строительства железных дорог, он был всё-таки осуществлён. Проект и строительство дороги были выполнены в основном иностранцами, в том числе американским бизнесменом Г. Мейггсом и польским инженером Э. Малиновским. В настоящее время, половину от перуанского экспорта составляют металлы, в том числе медь и золото, которые добывают в Андах, поэтому Центральная железная дорога всё так же активно эксплуатируется, генерируя значительную прибыль для государства. Наряду с огромным значением Центральной Андской дороги для экономики Перу, проезд по всему маршруту можно смело называть «путешествием за незабываемыми впечатлениями», которое свидетельствует о стремлении человека покорить и обустроить новые территории, что без вклада железной дороги было бы невозможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bartkowiak, D. Ernest Malinowski, konstruktor kolei transandyjskiej, Poznań 1996.
2. Bernhardt, D., Reilly, J. F. II Mineral commodity summaries 2019. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 28 February 2019.

3. Bielicki, Z. Wyżej niż kondory Poznaj Świat R. XXVIII, nr. 9 (334), wrzesień 1980.

4. Binns, D. The Central Railway of Peru and the Cerro de Pasco Railway. Skipton: Trackside Publications, 1996.

5. Camacho, S. Los Ferrocarriles del Perú, Colección de leyes, decretos, contratos y demás documentos relativos a los ferrocarriles, del Perú, hecha de orden de D. Enrique Meiggs. Tomo I, Lima, Imprenta del Estado, calle de la Rifa N° 58. 1876.

6. Fawcett, B. Railways of the Andes (2nd ed.). East Harling: Plateway Press 1997.

7. Inżynierowi Ernestowi Malinowskiemu w setną rocznicę śmierci *Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie*, t. 4, Kraków 1999.

8. Marshall, J. The Guinness Railway Book. *Enfield: Guinness Books* 1989.

9. Myers, E. P. South America's Yankee Genius, Henry Meiggs. *New York Messner*, 1969.

10. Raczkó, D. Ernest Malinowski – koleją między chmurami. *National Geographic* 12/1999.

11. Securities and Exchange Commission Washington, D.C. 20549 Form S-4 Registration Statement Under The Securities Act Of 1933 The Doe Run Resources Corporation. As Filed with the Securities and Exchange Commission on May 11, 1998. [Электронный ресурс]: <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1061112/0001047469-98-018990.txt>.

12. Stewart, W., Henry Meiggs, Yankee Pizarro, Durham, N.C., *Duke University Press*, 1946.

13. The Atlas of Economic Complexity. Harvard Growth Lab's research and data visualization tool used to understand the economic dynamics and new growth opportunities for every country worldwide. [Электронный ресурс]: <https://atlas.cid.harvard.edu/explore?country=173&product=undefined&year=2018&productClass=HS&target=Product&partner=undefined&startYear=1995>.

14. The World Copper Factbook 2010. International Copper Study Group.

15. Thomson I. The dieselization of the Central Railway of Peru. *Diesels & Electrics*. 1: 54–9, 2003.

16. United States Securities And Exchange Commission Washington, DC 20549 Form 10-Q/A (Amendment No. 1) Quarterly Report Pursuant To Section 13 OR 15(d) Of The Securities Exchange Act Of 1934 For the quarterly period ended April 30, 2006. [Электронный ресурс]: <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1061112/000101124006000058/doerun10qa2dqr 1019 06.html>.

17. Whetham, R. D. Railways of Peru. Vol. 2. The Central and Southern Lines. Bristol: Trackside Publications 2008.

18. Camacho, Simón. Los Ferrocarriles del Perú. Volume I, 1876. Government Printing Office, Calle de la Rifa N°. 58, Lima, pp. 115–116. ●



Central Andean Railway in Peru



Marek Graff, Ph.D., Member of the Editorial Boards of the Journals Rail Transport Technology and the World of Railways (Technika transportu szynowego and Świat Kolei).*

Marek GRAFF

ABSTRACT

Built in the late 19th century, the Central Andean Railway in Peru was created through attracting foreign capital and foreign engineering ideas. Large-scale plans for exploitation of the richest deposits of copper, silver and gold formed the basis for construction of this railway line. The engineering solutions used in this project impress specialists even today. In particular, the so-called zigzags, which made it possible to lay a route along the inaccessible mountain ranges of the Andes. As the main investor of the project, American entrepreneur Henry Meiggs,

once once said that the train will arrive there where llama can get.

The chief engineer, author of the project, overseeing construction of the Central Railway, was Ernest Malinowski, a Polish specialist, honorary citizen of Peru.

«The project of engineer Ernest Malinowski provides for construction of a railway line at an altitude of almost 5000 meters above sea level, which is impossible. The implementation of the bridges and viaducts designed by him seems to be risky», – this is how his contemporaries evaluated the project of the Polish engineer.

Keywords: *railway, mountain railway, history of railways, zig zag/reverse, railway bridges, railway tunnel, rolling stock, heavy axle load, Central Andean railway.*

*Information about the author:

Marek Graff, Ph.D., Member of the Editorial Boards of the Journals Rail Transport Technology and the World of Railways (Technika transportu szynowego and Świat Kolei), Warsaw, Poland, marekff77@gmail.com.

Article received 02.11.2020, accepted 21.12.2020.

For the Russian text of the article please see p. 272.

Technical parameters

The Peruvian Ferrocarril Central Andino (FCCA) starts off the Pacific coast and ends in the area of copper mines high in the Andes. The train begins its journey in Callao within the metropolitan area of Lima, that is, from the port to La Oroya station, where the railway is divided into two directions, one of which leads north to Cerro de Pasco station, and the other south to Huancayo station. The length of the railway is 490 km, including Callao–Huancayo section of 346 km. The most impressive facts about the Central Railway are the height of its location above sea level, which reaches a maximum value of 4782 m (Galera station on the 173rd km of the route), as well as the presence of 69 tunnels with a total length of 10,8 km, 58 bridges with a length of 1,8 km and also of six double changes of direction of movement (the famous zig zag or switchback track), which were built in order to ensure the maximum allowable gradient of the track of 29–37 ‰ per 100 km, between the stations of San Bartolomé at km 76 situated 1513 m above sea level (masl) and Ticlio at km 171, 4758 masl, where the train overcomes the difference in altitude of 3245 m (Table 1). The maximum gradient is 96,5 ‰ between Tambo and Jauja stations (this is an isolated case, and there is no reverse movement in this section).

The Central Andean Railway is a single-track, non-electrified line. The track width is 1435 mm. The author of the project is Polish engineer Ernest Malinowski, the main investor is Henry Meiggs, a businessman from the

United States. The track in the sections with the greatest gradient is laid on rocky ledges. Numerous bridges and tunnels of the famous road are structures, the size of which does not exceed 200 m (most of them are 50 to 100 m long). There are many switchback sections, and the most spectacular moment is a change in direction of movement in Balta Tunnel. In most cases, the switches are manually transferred by train crew. Difficult topographic conditions are the reason for the average speed on tracks to not exceed 40 km/h. It should be added that until completion of construction of the Trans-Tibetan Railway in China in 2007, the Central Andean Railway of Peru remained the «highest» railway in the world^{1,2}.

The construction of the railway in the Andes was associated with plans to exploit the rich deposits of copper ore in Peru, as well as the accompanying silver and gold ores deposits (currently Peru and Chile are the main exporters of these metals in the world). Copper is still in great demand. More than 60 % of copper is used for production of electrical wires. Among metals, only silver has a higher conductivity.

Compared to other South American railway networks, the Central Andean Railway differs (in addition to its height) by a standard gauge

¹ Currently Tanggula station (5072 m above sea level) on Trans-Tibet railway (Qinghai–Tibet railway / Qingzang railway) is the highest railway station in the world.

² Another high railway line in South America is Atofagasta line in Chile, with its highest point at 4818 meters above sea level, and it is also used to transport copper ore.



Chosica railway station (54th km, 860 m above sea level) (21.03.2010). Photo: N. Öberg.

Table 1

Technical parameters of Callao–Lima–Huancayo section of the Central Andean Railway

Station	km	Height, m asl	Gradient, ‰	Remarks
Patio y factoria Guadalupe	1	3,0	0,6	
Patio central / Callao	2	3,6	13,3	
Monserate	13	150,0	0,0	
Desamparados	14	150,0	16,9	
Vitarte	26	353,0	16,7	
Santa Clara	29	403,0	18,3	
Chosica	54	860,0	29,7	
Tornamesa	74			Zig zag
San Bartolomé	76	1513,0	33,7	
Matucana	102	2390,0	34,3	
Viso	111			Zig zag bottom/Zig zag top
Tamboraque	120	3008,0	35,6	
Cacray				Zig zag
Cacray				Direction of travel is reversed
Rio Blanco	134	3506,0	32,6	
Chicla	141	3733,9	35,0	Direction of travel is reversed
Saltacuna				Direction of travel is reversed
Casapalca	153	4154,0	29,4	
Backus				Direction of travel is reversed
Johnston				Direction of travel is reversed
Chinchan	160	4360,0	36,2	
Ticlio	171	4758,0	11,5	Branch in the direction of Morococha, 14 km (4538,0 m asl)
Galera	173	4781,0	29,5	
Rumichaca				Zig zag (south) / zig zag (north)
Yauli	193	4192,0	33,4	
Arapa	198	4025,0	0,0	
Mahr Tunnel	196	4025,0	7,1	
Cut-Off	206	3954,0	14,3	
La Oroya	222	3726,0	4,9	
Pachacayo	262	3529,0	4,9	
Llocllapampa	275	3465,0	4,4	
Tambo	299	3359,0	96,5	
Jauja	301	3552,0	14,4	
Matahuasi	321	3265,0	4,3	
Concepcion	324	3252,0	1,2	
San Jeronimo	330	3245,0	1,0	
Huancayo	346	3261,0		

[4; 17]. In other Latin American countries (Chile, Argentina, Brazil), track gauges of 1000 mm, 1600 mm or 1676 mm are common, while the standard track gauge of 1435 mm is extremely rare.

The highest point of the railway is located in La Cima at 4835 m above sea level on Ticlio–Morococha section near the local mine. The tracks run along the Rimac River and its tributaries past Chinchan station, located seven kilometers from Casapalca station (at the 153^d

km, 4154 meters above sea level) in the western Andes. This station served as a transfer station for the mined ore.

Further, the railway leads through Galera tunnel, the longest and the highest (4781 m above sea level) tunnel of the railway. Then the average height above sea level decreases, gradients become less steep. At Yauli station (at the 193^d km, 4192 masl) the railway runs along the river with the same name. Then the railway «meets» the Mantaro River, which it



crosses and reaches Tambo station (at the 299th km, 3359 masl). Then it crosses beautiful localities such as Jauja (301st km, 3552 masl), Matahuasi (321st km, 3265 masl), Concepcion (324th km, 3252 masl) and at the very end of the track leads to Huancayo (346th km, 3261 masl).

Today, a highway has already been laid both in La Oroya and Huancayo. For highways, steeper gradients and smaller radii of curves are allowed, as well as there are other technologies developed in the second half of 20th century. However, railway transport is traditionally chosen for transportation of heavy goods.

The Peruvian Central Andean Railway is currently operated by Ferrocarril Central Andino (FCCA), which is owned by private entrepreneur Juan Olaechea and RDC group, who received a 30-year concession after the Central Railway had been privatised in mid-1999. Other shareholders of FCCA are Ferrovías e Infraestructura (Olaechea group), Minas Buenaventura, ADR Inversiones UNACEM (leading cement manufacturer in Peru) [6; 8]. Copper ore and pure copper are transported by 36 locomotives and 881 wagons [15]. It should be emphasised that almost all railways in Peru were built to transport goods, not passengers, and that many of them currently remain closed for operation. The main modes of transport in Peru are buses and air transport³.

History of the Central Andean Railway

The Central Andean Railway was designed and built by Ernest Malinowski, whose family voluntarily left their country for political reasons. E. Malinowski studied at École nationale des Ponts et Chaussées in Paris, which he graduated with an engineering degree [5]. Upon arriving in Peru in 1851 the Polish engineer was tasked with developing a project to extend Lima–Callao railway along Jauja valley towards the Andes mountain range. The Peruvian government created a technical commission composed of Felipe Barreda, Mariano Felipe Paz Soldán and Manuel Pardo, which was tasked with collecting information on local topography, geological and climatic conditions. The

³ The large area of Peru (1,29 million sq. km.), the terrain (mountain ranges of the Andes, with the highest peak Huascarán 6768 m above sea level), and the equatorial climate (heavy rainfall) in the eastern part of the country make maintenance of land infrastructure (highways) laborious and costly. Therefore, in the case of long-distance travel in Peru, air transport is preferable.

information was necessary for development of a preliminary project, which was entrusted to E. Malinowski. Peru's Parliament (Congress) passed the railway laws proposed by the Government and guaranteed payment of six percent rate on the construction investment. A commission was also created to study four possible (alternative) routes, which would also start in Lima and lead through:

- 1) Rimac River Gorge and the localities of Matucana, San Mateo and Tarma.
- 2) Gorge of the Chillón River, and the localities of Caballero, Yangas, Obrajillo, Casachanca and Carhuacancha.
- 3) The Chancay River Gorge and the localities of Chancay, Macas, Huatamantaga, Huailay and Cerro de Pasco.
- 4) The gorge of the Lurin River and the localities of Sisicaya, Tupicocha, San Damian, Tuctucocha, Pumacocha, Oroya, Tarma and Jauja.

According to the prepared report, construction across the Rimac River Gorge was difficult, but possible. The construction of a railway through the gorges of the Chillón and Chancay rivers was assessed as almost impossible, while construction across the gorge of the Lurin river was considered very simple. The choice was made in favour of the fourth option, the detailed study of which and development of the project were entrusted to the engineer Gerrit Backus. He was considered one of the best specialists in the field of railway construction. Backus prepared a project, but in March 1866 work was suspended due to the war with Spain. Two years later, government member Don Diego Masias contacted Henry Meiggs, a US businessman based in Chile (he worked there under a contract). The American in September 1868 presented to the government of Peru the idea of building Lima–Jauja railway. Eyewitnesses then said that he convinced the central authorities of Peru with the argument «*I will build the railway track where the llamas run*». A work plan and construction budget of 27 million pesos were approved. H. Meiggs' proposal was accepted and the mandatory completion date was determined within six years in exchange for government bonds with six percent per annum and 2% amortised bonds, with a ten-year implementation period. The contract was concluded between the government of Peru and Mr. H. Meiggs in December 1869 in the form of a public act. The first article there-of read:

«Henry Meiggs, his heirs, executors or legal representatives undertake to build a section of the Central Andean Railway (Spanish: Ferrocarril Central Transandino), between Callao and Lima-La Oroya; according to the plan and technical drawings developed by the chief engineer Ernest Malinowski with participation of the engineer Pedro Marzo, appointed by the government, which were approved and deposited with the government office» [18].

The work began on January 1, 1870 with a loud event, during which the first stone was laid at the site of what is now Monserrate station in Lima, under the direction of the head of the technical corps, engineer Ernest Malinowski. In order to facilitate construction, the main line Lima—La Oroya (222 km) was divided into sections:

1. Lima—Callao—Cocachacra.
2. Cocachacra—San Bartolomé—San Jerónimo de Surco.
3. San Jerónimo de Surco—Matucana.
4. Matukana—Parac (San José de Parac).
5. Parac—San Mateo—Rio Blanco.
6. Rio Blanco—Galera.
7. Galera—La Oroya.

However, life made its own adjustments — Mr. Meiggs managed to build a railway only to the city of Chicla (3733,9 masl), 141 kilometers from Callao. Meiggs faced serious difficulties in paying salaries to hired engineers, workers and managers. The government has suspended construction of the railway. Only selected sections were completed:

- Cocachacra — in February 1871;
- San Bartolomé — in September 1871;
- Chicla — in May 1878.

Henry Meiggs died in 1879. As a result of a conflict between investors and the Government of Peru, construction was paralysed until 1890, when the bondholders assumed the rights and responsibilities of Meiggs and organised the Peruvian Corporation, which became the legal successor. On July 12, 1892, the railway reached Casapalca and in January 1893 — La Oroya. These were the last stations of the Central Railway.

The construction of the section between La Oroya and Huancayo began in 1905, but the next agreement between the government and the Peruvian Corporation was concluded only in 1907 (during this period of time, part of the work was carried out by the state), so the work was completed in September 1908. In total,

construction of the Central Andean Railway took 38 years.

The most outstanding engineering structures of this railway are Verrugas or Carrión viaducts 175 m long and 80 m high and Galera tunnel with a length of 1177 m. Also noteworthy is Balta spiral tunnel (at the 94th km) long of 1375 m. This tunnel is overcome by a train in 4–5 minutes. The most impressive sections and stations of the Central Andean Railway are:

- zig zag section Carcay—Rio Blanco station;
- section Casapalca—Chinchán—Ticlio—Galera;
- section near station Chicla;
- section near station San Bartolomé;
- section near Balta tunnel;
- station La Oroya.

The Central Andean Railway begins its journey at the railway station in Lima at Desamparados Station, which is in the centre of the capital of Peru, a building designed by the architect Rafael Marquin in 1912.

Peruvian Corporation

Based on the loan, which the Peruvian state took to finance the construction, in accordance with article 26 of the agreement of March 20, 1890, a company was created, which accepted to manage the 160 km of the constructed railway line.

Due to the enormous debts cumulated by the Peruvian government during construction of the Central Railway, The Peruvian Corporation Ltd was formed under the Joint Stock Companies Act on March 20, 1890. The company was created in order to pay off external debt and repay government loans that were taken out by bondholders to finance construction of the Peru Central Railway. The main purpose of the corporation was to transfer rights and obligations of bondholders.

Two weeks later, the company's shares were listed on London Stock Exchange. This deal was completed, the heirs of H. Meiggs (his sons J. G. Meiggs, H. G. Meiggs, and also Alejandro R. Robertson) sold to the Peruvian Corporation their shares in the Central Railway and their shares in Cerro de Pasco silver mines.

In 1891, the Peruvian Corporation decided to take over the management of all the railways of the country and turn them into subsidiaries, dividing the shares among themselves. Seven companies emerged, five of which were controlled by subsidiaries. The two others were



established through third parties, because there were still valid contracts with the state and other private individuals.

Predictably, given the economic crisis the country faced after the war with Chile, there were problems with fulfillment of the contract. In 1893, payment interruptions began and Parliament tried to suspend annual payments to creditors. The Peruvian Corporation was unable to secure funding for construction of the following sections. Until 1899, the parties did not come to any agreements and the next round of negotiations began only in 1904, and in June 1907 a new contract was signed stating that:

1) The Peruvian Corporation will finance construction of all new planned railways with a total length of about 300 km.

2) The railway company will reimburse the state for all costs incurred in partial construction of these roads.

3) The right to operate the railway by the company will be extended for another 17 years, provided that the state treasury begins to pay 80 thousand British pounds, which will be obtained from the sugar tax.

The Peruvian corporation operated the Central Andean Railway continuously until 1927, and temporarily until March 1973.

National railway company: ENAFER

After the coup d'état and the rule of the military junta in 1968–1975 it was decided to nationalise many enterprises that were managed by foreign companies. The French firm Sofresrail was asked to conduct an analysis of the payback of private domestic railway carriers and a study on profitability of the country's railways, after that in April 1971 a decision was made to nationalise them. This also affected roads belonging to the Peruvian Corporation, headquartered in Canada. The official pretext for this referred to insufficient investment in the company. On December 1, 1972, the National Railroad Company, better known as ENAFER Peru, was created, which united all the railways of the country, except for La Oroya–Cerro de Pasco section, since it was very profitable and belonged to a North American company. Since January 1973, ENAFER Peru has operated lines:

- Callao–Lima–La Oroya–Huancayo;
- Huancayo–Huancavelica;
- Mollendo–Arequipa–Puno;

- Juliaca–Cusco–Matarani–La Joya;
- Cusco–Quillabamba.
- Arica–Tacna.

In July 1973, a bank loan was obtained for purchase of rolling stock and infrastructure elements:

- spare parts for rolling stock in operation in the amount of 12,6 mln US dollars;
- 300 freight wagons and 32 passenger cars in Romania;
- 12,7 thousand tons of rails in Canada.
- 25 diesel locomotives, 36 wagons for transporting ore from mines and 40 tank cars from Japan.

ENAFER Peru was restructured in 1976 and Congress approved loans for modernisation in 1979. At this time, Peru's railway network was of 1691 km. From the 1980s to the early 1990s, the volume of transportation decreased due to intensive operation of lines and insufficient funding for their maintenance. A real problem was also the activities of political extremists from the Sendero Luminoso group, who operated mainly in the mountainous regions of Peru. For this reason, in 1991 a decision was made to re-privatise the company. A year earlier, termination of passenger transportation was announced. But cargo transportation was also systematically reduced, and railway operation brought only losses every year. In 1998, the last repairs were carried out for 12 locomotives and 100 cars, as well as for 41 km of tracks, and in mid-July 1999 the company was closed. The shares were transferred to new owners. The carrier FVCA (Ferroviás Central Andina SA) is operated by Juana de Dios Olaechea, a private individual who has been granted a concession to operate the transport for the next 30 years. FVCA's shareholders are Mitsui, Buenaventura, RDC, Inversiones Andina and CDC. ENAFER retained the operation of Arica–Tacna section.

FVCA originally operated the following railways:

- 1) Main railway Callao–La Oroya, 222 km.
- 2) Railway La Oroya–Huancayo, 124 km.
- 3) Lima–Ancon line, 37,3 km, was finally abandoned and dismantled in 1965. It was part of the old northwestern railway, which included Lima–Ancon–Chancay line, which started operation in December 1870. During the war with Chile, Ancon–Chancay section was destroyed by the Chileans and was never rebuilt.

Table 2

Locomotives and rolling stock motor units, used by Peruvian Railways

Manufacturer	Series	Years of production	Axle scheme	Weight of rolling stock unit, t	Max. speed, km/h	Power of diesel engine, kW	Power of diesel engine, kW	Number of units	Remarks
GM-EMD	GR12	1953–1968	Bo'Bo'	72	100	1310	977	2	Modified driver's cabs
MLW	DL532B	1961–1962	Bo'Bo'	ND	ND	1035	772	3	Shunting locomotives, only 1 locomotive in operable state. The second is waiting for repairs
MLW	ALCO-DL560	1962–1998	Co'Co'	113	120	2600	1940	1	Purchased as new ones from the manufacturer
EMD	GM C22CW	1969–1974	Co'Co'	92	120	1500	1119	2	1 unit removed from operation
EMD	SD40-2 SD-40	1972–1989	Co'Co'	167	105	3000	2238	2 1	One locomotive SD-40 has a modified diesel engine cooling system
GE	C30 7PA	1976–1985	Co'Co'	191	113	3000	2238	4	Modified due to oversizing when passing through Matukana and Galera tunnels
GE	C30M-3	1976–1985	Co'Co'	191	113	3000	2238	2	Modernised at the plant Locomotoras San Luis in Mexico
GE	C30M-3 C36-7p C39-08	1976–1985 1978–1989 1984–1987	Co'Co'	191 191 ND	113 113 113	3000 3600 3900	2238 2686 2909	3 1 1	Locomotives purchased after 2000, and removed from operation
GE	B39-E8	1983–1994	Bo'Bo'	ND	ND	3900	2909	2	
GE	C39-08	1984–1987	Co'Co'	ND	113	3900	2909	8	
GE	C39-8P	1984–1987	Co'Co'	ND	113	3900	2909	8	Purchased from Conrail from the USA, modified due to oversizing when passing through Matukana and Galera tunnels
EMD	JT26CW-2B	1985–1995	Co'Co'	126	120	3000	2238	3	Commissioned in June 2020
GE	C-40CW	1989–1994	Co'Co'	ND	113	4000	2984	2	Obtained from the carrier CSX from USA in May 2020
EMD	GT42AC	1999–2005	Co'Co'	120	100	3300	2460	ND	
Beyer–Peacock	ND	ND	1'D	ND	ND	ND	ND	1	British-made steam locomotive; decommissioned
DUEWAG AG	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3	Motor cars from the future tram line in Lima–Chosica

* Values obtained from converting mile/h to km/h (e.g., value of 113 km/h corresponds to 70 mile/h).
Bo'Bo' means a loco with two bogies each of them having two separately powered axles. Co'Co' means three driving wheels sets.



4) The railway to Ticlio-Morococha mining branch, 14,3 km, operated under a concession granted in 1899 and has been in operation since 1903.

5) The railway to Morococha mining branch, 18,6 km, was built in 1921 as a branch of La Oroya–Huancayo line (at the 205th km) near Pachachaca. This route has reduced the distance of transporting ore from Morococha to the La Oroya metallurgical plant by several kilometers, significantly reducing costs.

6) Final destination Espinar–Cusco.

Rolling stock

The first steam locomotives on the Peruvian railway network appeared in 1870. They came from the United States and were produced by Rogers and Danforth, and after 1890 also by Baldwin and Alco. In 1908, steam locomotives of NBL type, made in Great Britain, were in operation. Most of all locomotives are «heavily» used rolling stock units, purchased in most cases from US railway companies.

A distinctive feature of the South American railways has always been the use of a large axle load – 30–35 tons, due to which a large traction force is provided. This makes it possible, when using double traction and an automatic coupling of AAR type, to form very heavy trains, which is important for freight traffic. Diesel locomotives⁴ currently used by Peruvian carriers are mostly manufactured by companies in the United States and Canada: General Electric, Electro-Motive Diesel of General Motors (respectively GE and GM EMD) and Montreal Locomotive Works (MLW). The power of diesel engines of locomotives operating on hauls ranges from 2000 to 3000 kw, which, together with the aforementioned high axle load and Co'Co' axle system (for example, 32 t for the C30M-3 series), is absolutely sufficient for two locomotives to haul a heavy freight train. Locomotives, like most rolling stock in the Americas, have only one driver's cab. Locomotives and motor rolling stock units used

on Peruvian railways are listed in Table 2 (the list may be unexhaustive).

La Oroya – railway hub and metallurgical centre

The place where copper ore is processed is La Oroya, a city in the centre of Peru, founded in 1533 by the Spaniards, who began to mine non-ferrous metals on a large scale in the area. However, export problems slowed down production growth. During the Peruvian War of Independence, the strategic location of the city made it a centre of guerrilla activity and the site of one of decisive battles of the Chacamarca (Junin) war. The present name has existed since 1893, and in 1942 the area of La Oroya was endowed with the rights of an urban settlement (since 1925 it is the capital of the province of Yauli). Large-scale mining of copper ore began in 1893 with completion of the railway from Lima.

In 1922, a metallurgical plant was built, the investor was the American corporation Cerro de Pasco, which operated the enterprise until 1974, i.e. before nationalisation by the state. Then the plant was incorporated into the company Empresa Minera del Centro del Peru SA, also known as Centromin [11]. However, already in 1993, it was decided to privatise the metallurgical plant by Doe Run Peru, a subsidiary of the Renco Group, for 247 mln US dollars. The buyer spent 120,5 mln US dollars on purchase of the plant and 126,5 mln US dollars on investment in the plant. Plus, the new owner bought the Cobriza copper mine for 7,5 mln US dollars to supply the plant with copper ore. The metallurgical plant in La Oroya is the main employer for local residents. Along with the metallurgical plant, the city also has factories that process lead ore (since 1928) and zinc ore (since 1952), producing 70 thousand tons of copper, 122 thousand tons of lead and 45 thousand tons of zinc. However, the location of the factories is at a considerable height of 3726 masl and under the conditions of rarefied air (less oxygen, lower pressure), and this imposed several constraints regarding production process. Copper ore in La Oroya is mined with a large amount of harmful impurities that cannot be removed during the flotation process. However, technologists have succeeded in developing new methods for separating and recovering metals in the form of by-products. For this purpose, local

⁴ Electric traction in South and North America is used to a limited extent, primarily by suburban railways or the surface metro system around major cities such as Montreal, Buenos Aires or São Paulo, using direct current from an overhead contact network (e.g. 1.5 kV DC) or catenary rail (600–750 V DC). The exception is the NEC mainline in the USA, a line used for express trains and Amtrak's Acela Express, powered by 3 types of AC.

smelteries were forced to actively integrate with each other. La Oroya is one of the few locations in the world that have that capability. As a result, gold and silver, antimony, arsenic trioxide, bismuth, cadmium, indium, selenium, tellurium, sulfuric acid and oleum are produced here. This helps to reduce emissions of harmful and toxic metals. But these three metallurgical plants went to the new owners «badly shabby». The previous owner did not attach importance to modernisation. As a result, the work of these plants currently violates many environmental standards, which leads to an excess of MPC (maximum permissible concentration) in the air of arsenic by 85 times, cadmium by 41 times and lead by 13 times⁵. High concentrations of lead have been found both in the blood of local residents and in drinking water. As a result, the inhabitants of La Oroya quite often suffer from chronic diseases of the respiratory system [16].

Copper ore: mining, processing and economic significance

Man has been using copper for more than ten thousand years and it plays a special role in development of civilisation (for example, the Bronze Age is associated with an alloy of copper and lead). 95 % of copper that is currently in use was mined after 1900. The Latin name for copper, *cuprum*, comes from Cyprus, where it was originally mined. Along with production of electrical wires, this metal is also used for roofing and manufacture of drainpipes (20 %), and industrial machines (15 %). It is worth emphasising that 35 % of copper from 22,1 million tons (2009) of the total world production is obtained in the recycling process [14].

It is easy to see that about half of all copper mined in the world was obtained in Peru and Chile – about nine million tons (Table 3). The development of copper deposits pays off if its content in the ore is 0,5 %, it is very profitable to start mining ore with a copper content of more than 2 %. Despite the fact that copper still often appears in nuggets, it is most often found in the form of sulfides and oxides:

- cuprite Cu₂O (89 %);

⁵ The listed chemical elements cause chronic poisoning and have a carcinogenic effect. Arsenic and its compounds, for example, white arsenic, are especially toxic.

Table 3

Copper production [2]

Place in the ranking	Country/ Region	2017	2018	reserves
		mln tons		
	World	20,00	20,67	830
1	Chile	5,50	5,80	170
2	Peru	2,45	2,40	83
3	China	1,71	1,60	26
4	USA	1,26	1,20	48
5	DRC	1,09	1,20	20
6	Australia	0,86	0,95	88
7	Zambia	0,79	0,87	19
8	Mexico	0,74	0,76	50
9	Russia	0,71	0,71	61
10	Indonesia	0,62	0,78	51
11	Other countries	4,25	4,40	210

Table 4

Share of metals in export of Peru (2018) [13]

Total export value	bln US dollars	%
	53,5	100,00
Copper ores	11,2	20,93
Gold	6,86	12,82
Refined copper, copper alloy and copper wires	2,16	4,04
Zinc ores	0,81	1,51
Lead ores	0,85	1,59
Crude zinc	1,984	3,71
Iron ores	0,744	1,39
Non-ferrous metals, raw materials	0,697	1,30
Molybdenum ores	0,631	1,18
Raw tin	0,256	0,48
Silver	0,355	0,66
Total	26,55	49,62

Table 5

Silver production [2]

Place in the ranking	Country/ Region	2017	2018	reserves
		thousand tons		
	World	26,8	27	560
1	Mexico	6,11	6,1	37
2	Peru	4,30	4,3	110
3	China	3,50	3,6	41
4	Poland	1,29	1,3	110
5	Chile	1,26	1,3	26
6	Bolivia	1,24	1,2	22
7	Australia	1,20	1,2	89
8	Russia	1,12	1,2	45
9	USA	1,03	0,9	25
10	Argentina	1,02	1,1	bd.
11	Other countries	4,77	4,8	57



Gold production [2]

Place in the ranking	Country/Region	2017	2018	reserves
		tons		
	World	3181	3261	54 100
1	China	426	400	2 000
2	Australia	301	310	9 800
3	Russia	270	295	5 300
4	USA	237	210	3 000
5	Canada	164	185	2 000
6	Peru	151	145	2 600
7	RSA	137	120	6 000
8	Ghana	128	130	1 000
9	Mexico	126	125	1 400
10	Uzbekistan	104	105	1 800
11	Other countries	1137	1236	19 200

• chalcocite Cu_2S (80 %);
• bornite Cu_5FeS_4 (63 %);
• malachite $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ (57 %);
• azurite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ (53 %);
• chalcopyrite CuFeS_2 (35 %),
which are characterised by a high copper content (with the exception of chalcopyrite – 35 %).

One of the reasons for such an abundance of copper deposits in Peru and Chile is the

Table 6

very «young» age of the Andes, where there are still active volcanoes, including Lulllaillaco, located on the border of Chile and Argentina, one of the highest volcanoes on Earth (6739 masl). There are frequent earthquakes, which indicates that the process of mountain formation is still far from complete. And volcanic processes, as you know, promote movement of rocks from lower layers of the earth's crust to the upper ones. Copper is an element with a higher density than, for example, silicon or aluminum. Accordingly, the oxides of these elements are found in the lower layers of the earth's crust.

The share of metals – in the form of ore or in pure form – in Peru's export remains large and fluctuates within 50 % (Table 4). Copper ore is mined:

- in deep mines due to construction of deep vertical shafts and chiselling of horizontal drifts;
- in open-pit mines, for deposits at shallow depths, where ore is mined after removal of layers of barren rocks; at present, about 90 % of copper ore is mined in open-pit mines.

Ore is transported by large trucks (mining dump trucks), often without a driver, using a GPS navigation satellite system. Copper ore



Locomotive series GE C30–7 № 1008 + 1009 on a steel bridge between Rio Blanco (134th km, 3506 m above sea level) and San Mateo (14.07.2013). Photo: Kabelleger / D. Gubler.

Table 7

Copper ore processing

Stage	Process	Process description	Chemical reaction	Remarks
1	Crushing and grinding	Crushing of ore into powder in large cylindrical ball mills	—	The content of copper in the powder is ~2 %
2	Froth flotation	Mixing ore with paraffin oil to obtain a hydrophobic mineral surface and water bath with a foaming agent. By pumping in air, the foam collects mineral particles on the surface of water, while barren residues fall on the bottom of the tank	—	Copper content in the resulting mass is ~25 %
3	Roasting	Roasting of ore concentrate recovered in froth flotation process, i.e. conversion of beneficiated copper ore into a mixture of copper sulphides at temperature 500–700°C	$2 \text{ CuFeS}_2 + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ FeO} + 2 \text{ CuS} + 2 \text{ SO}_2$	Toxic SO ₂ can be used for production of H ₂ SO ₄
4	Melting with introduction of fluxes	Calcinates are heated to a temperature > 1200°C with fluxes, for example, SiO ₂ , or CaCO ₃ , as a result, slag is formed, which is easy to remove and copper matte, i.e. iron sulfide and copper sulfide	$\text{FeO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 \text{ (slag)}$ $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ Cu} + \text{SO}_2$	
5	Converting converter matte into converter copper	Oxidation of copper matte in a shaft furnace	$2 \text{ FeS} + 3 \text{ O}_2 + 2 \text{ SiO}_2 \rightarrow 2 \text{ FeO} \cdot \text{SiO}_2 + 2 \text{ SO}_2$ $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ Cu} + \text{SO}_2$	A blister is used to obtain copper
6	Casting of copper	The casting process is carried out in a carousel car. The surface of the anode is about 1 m ²	—	The purity of the obtained copper is 99 %
7	Electrolytic refining	The process is carried out in an electrolytic purification tank in CuSO ₄ + H ₂ SO ₄ (200 A, 1,3 V) solution. And it consists in the electrolytic dissolution of the anode and the simultaneous deposition of cathode copper on the bottom of the tank; insoluble sludge contains Au, Ag, Pt and Sn (for use)	anod: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{ e}^-$ katod: $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{ e}^- \rightarrow \text{Cu}$	The purity of the obtained copper is 99,99 %

Source: compiled by the author of the article.

sometimes contains nuggets of silver and gold, which are mined both in Peru and Chile in significant quantities (Tables 5, 6).

The production of copper from ore is a multi-stage process (Table 7), which is accompanied by release of toxic sulfur oxide, which can be used, for example, for production of sulfuric acid. This process requires a lot of energy to create a high temperature (1200°C).

Despite the fact that copper is an element of vital importance to humans (the daily norm is 2–3 mg, maximum 10 mg), it becomes poisonous in large quantities (for example, the lethal dose of copper sulfate is only 30 g).

Silver and gold, which often «accompany» copper ore, are not toxic⁶ to humans. But in

the process of their extraction and purification, among others, mercury and solutions of potassium or sodium cyanide, which are very strong poisons, are used in significant volumes (a lethal dose is 50–100 mg of KCN or NaCN for an adult). For this reason, mining of these three metals requires strict adherence to occupational safety and health requirements.

The power industry in Peru is characterized by the widespread use of hydropower (26 %) and energy from natural gas (25 %) (Table 8). Ore processing plants use electricity generated by hydroelectric power plants, which seems like the easiest solution. Electricity is used primarily in the electrolytic refining of copper. The copper content in the ore, even after beneficiation, is only 2 % (Table 7), therefore it is more profitable to process ore at the places of its extraction than to transport it by train to



⁶ Silver compounds are toxic to microorganisms.

Table 8

Primary energy balance in South and Central America (2019)

		Oil	Gas	Coal	Nuclear power plants	Water power plants	RES
Argentina	%	34,3	49,4	0,7	2,2	9,5	4,0
Brazil		38,1	10,4	5,3	1,2	28,7	16,3
Chile		45,8	14,1	17,1	—	11,2	11,6
Ecuador		66,8	3,1	—	—	29,7	1,0
Columbia		36,5	25,2	13,4	—	23,9	1,1
Peru		43,7	25,8	1,9	—	24,3	4,6
Trinidad and Tobago		11,6	88,9	—	—	—	0,0
Venezuela		31,7	42,7	0,1	—	25,3	0,1
Others		62,2	7,7	5,5	—	17,8	6,7
Total		41,4	20,8	5,2	0,8	22,3	9,5

Source: BP Statistical Review of World Energy, 2019.



Ernest Malinowski

factories located in valleys, for example, to Lima, where almost half of Peru's industrial production is concentrated. As mentioned above, density of copper is high, more than that of iron ores, so the cars should be loaded incompletely so as not to exceed the permissible axle load.

Ernest Malinowski and Henry Meiggs – outstanding personalities

Two persons, without whom Central Railway of Peru would not have been built, are Polish engineer Ernest Malinowski and American businessman Henry Meiggs. Their

knowledge, courage, sometimes even audacity, ability to win over people made it possible to build this unique railway. The applied technical solutions, despite the difficult relief and climatic conditions, are still admired. Moreover, all construction work was carried out with ordinary shovels, pickaxes, and one-wheeled wheelbarrows, and the project itself was developed on a drawing board using a pencil, a drawing triangle and a mold.

Ernest Malinowski (1818–1899) was born into a wealthy noble family in Volhynia (his maternal grandfather was Podolsk voivode) [1; 7]. Malinowski family owned an estate in Rozhichnaya in Podol, which was confiscated by the tsarist government after November uprising. Ernest had two brothers and a sister – an older sister Leontina (died before 1831) and a brother Rudolf, as well as a younger brother Sigmund. In 1827–1831 young Ernest studied at Kshemenets Lyceum. After November uprising of 1831, in which brother Rudolph (joined the rebel army) and father Jakub (was the ambassador of the rebel diet) participated, brothers Ernest and Sigmund with their mother (Anna Malinowskaya) left for Galicia. After suppression of the uprising, Anna, together with her youngest son Sigmund, returned to Volhynia, while her father and two sons (Ernest and Rudolf) left for Dresden, and then for Paris. In France, Ernest continued his studies at the Lycée Louis-le-Grand in Paris, and then at the famous École Polytechnique and at the National School of Bridges and Roads (École nationale des ponts et chaussées). Having received an engineering degree, Malinowski began working on construction of Paris–Le Havre railway in 1838, and in 1839 he

participated in construction of roads and a port in Algeria. He took part in works on the Meuse river near the border with Belgium, as well as in works to improve navigation conditions on the Cher river. Malinowski's South American period began in 1852, when he entered into a seven-year contract for «employment as a government engineer» in Peru, for [10]:

- development of projects for roads and bridges;
- supervision over implementation of construction and reclamation investments;
- drawing up topographic maps;
- training of local technical staff.

Malinowski went to Peru by ship, together with two French engineers – Emile Chevalier and Charles Fraguette. On the spot, he founded the first technical school – Escuela Central de Ingenieros Civiles and an organization uniting engineers – Comisión Central de Ingenieros Civiles. The first works in which Malinowski took part were the projects of paving streets and squares in Arequipa and modernisation of the stone bridge of Izacuchaca. The contract was extended by Malinowski for another three years in 1858. The first railways designed by Ernest Malinowski were [3]:

- Pisco–Ica (74 km) in 1859, together with Mario Alléon and Gerrit Backus;
- Chimbote–Huaraz (277 km; only 136 km were built due to financial constraints) in 1864, with Stephen Crosby and D. N. Paddison. The level difference on this road was > 3000 m. E. Malinowski also supervised the work.

During the War of Independence between Peru and Spain in 1866, Malinowski was appointed chief engineer at the port of Callao, where, together with Felipe Aranciba and José Cornelio Borda, he prepared a project for fortifying the port. He also participated in the defense of the port, fighting on the ramparts of Fort Santa Rosa. Malinowski used many innovative engineering solutions to protect the port. He used large-caliber cannons that remained after the American Civil War. They were armoured and placed on railway platforms so that the guns could easily change their position. This significantly increased the mobility of the artillery and gave the enemy the impression that the defense had more guns than it actually did. In recognition of the merits of Ernest Malinowski to the people of Peru, he received a diploma, medal and honorary citizenship.



Henry Meiggs

Engineer Malinowski's greatest endeavor in his life was participating in design and construction of the Peruvian Central Railway. In 1868, he began cooperation with Henry Meiggs, a businessman from the United States, who received an order to develop a feasibility study for a railway and entrusted this task to E. Malinowski. After recruiting the team and eight months of work, in April 1869 Malinowski handed over to H. Meiggs a detailed report. And already in December 1869, an agreement was signed (they say that bribes could not be avoided) between the company of H. Meiggs and the government of Peru on construction of Central Railway, which was to be built within six years for 27,6 million pesos (~ 22 mln US dollars). E. Malinowski, as chief engineer, was entrusted with the supervision of the construction of the line. It was precisely written that:

- the cost of construction of the railway will be financed by the Peruvian government, and the settlement with contractors will be made through the transfer of coupons with annual interest;
- payment of remuneration to engineers and workers is carried out by H. Meiggs from his funds;
- H. Meiggs' company will buy out land plots from private owners located on the route of the future railway;
- the government will donate state land plots.

Work began in January 1870, and at the first stage, during construction of a section of the road



through the Rimac River valley, everything went smoothly. Difficulties began at the 54th km at an altitude of 860 masl at Chosica station, where the mountainous relief began. The hired workers were mainly Peruvian Indians, Chileans, Chinese coolies, Italian emigrants and African Americans, with a total of about ten thousand people. E. Malinowski personally supervised the work, kept the accounting department, established contacts directly with suppliers of rolling stock and construction materials, and also oversaw the provision of appropriate working conditions and timely payment of remuneration to hired people.

Sometimes he personally climbed steep mountain slopes in order to provide a technical solution to a particular issue, or descended a rope into an abyss in order to examine the strength of the soil in the places where the bridge piers were installed. He considered himself a part of the team — he worked, ate and slept together with employees, together with everyone he suffered from the difficult Peruvian climate — heat during the day and frost at night.

In 1874 the Government suspended funding for construction. Then H. Meiggs and E. Malinowski began to finance the railway from their own funds.

The innovative technical solution on this railway was the so-called zig zag, switchback, and reversed travel direction, i.e. double change of direction of travel, which allowed maintaining a maximum gradient of 40 ‰ for the railway line. It was an impressive success, after which Ernest Malinowski was recognised as an outstanding engineer, as it was published in technical magazines in Peru and around the world. The first section of Central Railway, 141 km long between Callao and Chicla, was opened for operation in May 1878. Malinowski, meanwhile, left for neighbouring Ecuador, where he participated in construction of Guayaquil–Quito railway line, including Chimbo and Sibambe sections located in the mountainous parts of the Western Cordilleras. In 1879–1881 in Peru there was a war with Chile, for this reason construction of the railway was suspended. Malinowski returned to Peru in 1886 to participate in construction of Tarma–La Merced railway line with other Polish emigrants V. Falkersky and K. Vakulsky. In 1890 Malinowski became a shareholder of the Peruvian Corporation, which was formed, among other things, with the aim of completing construction of the Central Andean Railway: in 1893, another (very important) section was built to La Oroya station.

Ernest Malinowski was not only an outstanding engineer, he was a very talented manager. Engineer Malinowski often visited the elite of Peruvian society, rich and influential people. He lived in an elegant hotel in Lima, ran an open house in which he received many guests, and hired a French chef. He was often invited to the houses of the upper strata of society. Malinowski was engaged in philanthropic activities. He was the author of two books: «Money of Peru», Lima, 1856 (*La moneda en el Perú*, Lima 1856) and «Central Andean Railway of Peru», Lima, 1869 (*Ferrocarril Central-Transandino*, Lima 1869), as well as for several articles for the institute's «Miners' Bulletin» (*Boletín de Minas*). Malinowski was a great connoisseur of classical and modern literature.

It should be noted that Ernest Malinowski always tried to help Polish emigrants. He hired engineers: A. Babinsky, V. Volkensky, E. Khabikhov, V. Klugorov, A. Mechnikovsky and K. Vakulsky. He helped biologists K. Yelsky and I. Semiradzsky.

Ernest Malinowski died in 1899 from a heart attack, was buried with honours as a national hero in the cemetery «Pastor Matias Maestro» (*Presbitero Maestro*) in Lima. In 1999, a monument to Ernest Malinowski was unveiled near Ticlio station. The author of the monument was the famous Polish sculptor Gustav Kazimierz Zemla (the author of the famous «Wings» installed in Katowice). The monument was made from granite in Poland. It is written in Spanish and Polish: *Ernest Malinowski, 1818–1899. Polish engineer, Peruvian patriot, hero of the defense of Callao in 1866, builder of Central Railway.*

Henry Meiggs (1811–1877) was born in Catskill, New York State in the USA, was the third of nine children of Elijah and Fenny Meiggs [9; 12]. His father ran the shipyard, in which young Henry also began to work. But having become independent, Henry decided to go into the lumber trade. He didn't succeed, went bankrupt twice. When information about the gold deposits in California («gold rush») emerged in the early 1850, Meiggs traveled across the country to San Francisco on a ship loaded with lumber. Then there was still no railway around, neither the Panama Canal⁷. Meiggs correctly calculated that lumber would

⁷ Built in 1904–1914, officially opened in 1920.

be needed immediately and in large quantities to build a new city. His calculations were justified (the profit from sale of lumber was almost twenty times more than expenditures). With the money he earned, on North Beach waterfront, Meiggs built a warehouse, a sawmill, and a yard to bring in and process lumber and provide port services. The high demand for lumber continued as the city continued to develop, so Henry Meiggs' company was doing well. But Henry Meiggs also became famous as a prominent speaker and talented administrator, so he decided to become a city deputy. In 1853, Meiggs decided to build a pier 650 meters out to sea. The investment was a failure due to strong sea currents. In addition, the «gold rush» gradually began to fade, and the number of residents – to decrease. The real estate market plunged into another crisis. Henry Meiggs had collected loans by that time and paid them off with money from city funds. For this «criminal» reason, he very quickly packed up and left the United States with his family, taking all his property to the ship. After three months of travelling, Henry arrived in Chile and turned his energies into railway projects. He received his first order in 1857, and until 1867 built more than 300 km of railways. Along with entrepreneurial activities, he actively participated in public life and charity events. In 1868 he moved to Peru, where he built more than 1100 km of railways, including the Central Railway in cooperation with Ernest Malinowski. This allowed him to accumulate significant capital and pay off debts in his homeland, where he still planned to return someday. By 1873, Meiggs had paid off all debts with interest. But in the end he never returned to the United States and remained in Peru for the rest of his life.

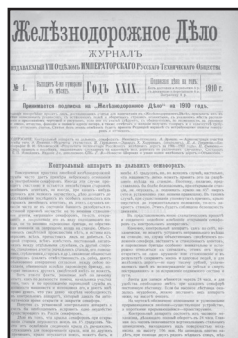
Conclusion. The Central Andean Railway of Peru, built at the turn of 19th–20th centuries was a great project. Despite a very modest budget, in the absence of whatever technologies for building railways, it was nevertheless implemented. The project and construction of the railway was carried out mainly by foreigners, including the American businessman H. Meiggs and the Polish engineer E. Malinowski. Currently, half of Peru's exports are metals, including copper and gold, which are mined in the Andes, so the Central Andean Railway is still actively

operated, generating significant profits for the state. Along with the enormous importance of the Central Andean Railway for the economy of Peru, travel along the entire route can be safely called a «journey for unforgettable impressions», which testifies to a person's desire to conquer and equip new territories, which would have been impossible without contribution of the railway.

REFERENCES

1. Bartkowiak, D. Ernest Malinowski, konstruktor kolei transandynskiej, Poznań, 1996.
2. Bernhardt, D., Reilly, J. F. II Mineral commodity summaries 2019. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 28 February 2019.
3. Bielicki, Z. Wyżej niż kondory Poznaj Świat R. XXVIII, nr. 9 (334), Wrzesień, 1980.
4. Binns, D. The Central Railway of Peru and the Cerro de Pasco Railway. Skipton: Trackside Publications, 1996.
5. Camacho, S. Los Ferrocarriles del Perú, Colección de leyes, decretos, contratos y demás documentos relativos a los ferrocarriles, del Perú, hecha de orden de D. Enrique Meiggs. Tomo I, Lima, Imprenta del Estado, calle de la Rifa N° 58, 1876.
6. Fawcett, B. Railways of the Andes (2nd ed.). East Harling: Plateway Press, 1997.
7. Inżynierowi Ernestowi Malinowskiemu w setną rocznicę śmierci *Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie*, t. 4, Kraków, 1999.
8. Marshall, J. The Guinness Railway Book. *Enfield: Guinness Books*, 1989.
9. Myers, E. P. South America's Yankee Genius, Henry Meiggs. *New York Messner*, 1969.
10. Raczko, D. Ernest Malinowski – kolejną między chmurami. *National Geographic*, 12/1999.
11. Securities and Exchange Commission Washington, D.C. 20549 Form S-4 Registration Statement Under The Securities Act Of 1933 The Doe Run Resources Corporation. As Filed with the Securities and Exchange Commission on May 11, 1998. [Electronic resource]: <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1061112/0001047469-98-018990.txt>.
12. Stewart, W., Henry Meiggs, Yankee Pizarro, Durham, N.C., *Duke University Press*, 1946.
13. The Atlas of Economic Complexity. Harvard Growth Lab's research and data visualization tool used to understand the economic dynamics and new growth opportunities for every country worldwide. [Electronic resource]: <https://atlas.cid.harvard.edu/explore?country=173&product=undefined&year=2018&productClass=HS&target=Product&partner=undefined&startYear=1995>. The World Copper Factbook 2010. International Copper Study Group.
14. Thomson I. The dieselization of the Central Railway of Peru. *Diesels & Electrics*, 1: 54–9, 2003.
15. United States Securities And Exchange Commission Washington, DC 20549 Form 10-Q/A (Amendment No. 1) Quarterly Report Pursuant To Section 13 OR 15(d) Of The Securities Exchange Act Of 1934 For the quarterly period ended April 30, 2006. [Electronic resource]: <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1061112/000101124006000058/doerun10qa2dqtr101906.html>.
16. Whetham, R. D. Railways of Peru. Vol. 2. The Central and Southern Lines. Bristol: Trackside Publications, 2008.
17. Camacho, Simón. Los Ferrocarriles del Perú. Volume I, 1876. Government Printing Office, Calle de la Rifa N°. 58, Lima, pp. 115–116.



DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-304-312>

В продолжение затронутой в предыдущей статье рубрики темы размещаем две публикации из вышедшего 110 лет назад издания. Обе они (в свою очередь воспроизведённые тогда из французской прессы) посвящены инженерным решениям, позволившим осуществить строительство железной дороги в горной местности и для своего времени ставшим уникальными.

В воспроизводимых материалах максимально сохранена лексика статей того времени.

Ключевые слова: горная железная дорога, виадук, Пиренеи, история транспорта, мостовые сооружения.

For the English text of the publication please see p. 309.

Редакция выражает признательность сотрудникам библиотеки Российского университета транспорта за помощь в подготовке материала.

ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА ВО ФРАНЦУЗСКИХ ПИРЕНЕЯХ

В присутствии Министра публичных работ Мильтерана предстоит вскоре открытие на французских Восточных Пиренеях новой железной дороги, соединяющей Villefranche-de-Conflent [Вильфранш-де-Конфлан] с Bourg-Madame [Бур-Мадам]. Эта железная дорога, на которой, по причине крутых подъёмов, решено применить электрическую тягу, служит продолжением существующей линии от Перпиньяна до Вильфранша.

Проходя по неизведанной, малодоступной местности, новая железнодорожная линия замечательна не только по разнообразию красивых видов, но и по оригинальности некоторых искусственных сооружений, для постройки которых применены новые расчётные формулы и смелые приёмы в самом производстве работ.

На протяжении от Вильфранша железнодорожный путь проходит по долине реки Тет и затем пересекает Французские Пиренеи вплоть до Бур-Мадам.

Пролегая вначале на средней высоте 549 метров над уровнем моря, железная дорога поднимается по горному ущелью, переваливает через хребет цепи Пиренеев на высоте 1580 метров и затем снова опускается у границы, держась на высоте 1138 м.

Не касаясь железных дорог чисто-горного характера, эту железнодорожную линию следует считать, в общем, весьма возвышенной по абсолютной высоте её пунктов (Мюрская линия — 925 метров, С.-Готардская — 1154 метра, Арлберг — 1311 метров и Бреннер — 1370 метров); ни на какой другой дороге не встречается отдельных пунктов, так разнящихся по высоте над уровнем моря и по климату в летние ясные дни, в течение трёх часов следования по железнодорожной линии температура в различных пунктах разнится до 20°. Между густыми виноградниками, которые покрывают Руссилионскую равнину, и необитаемыми пастбищами, над которыми поднимается крепость Мон-Луи, — заштатного

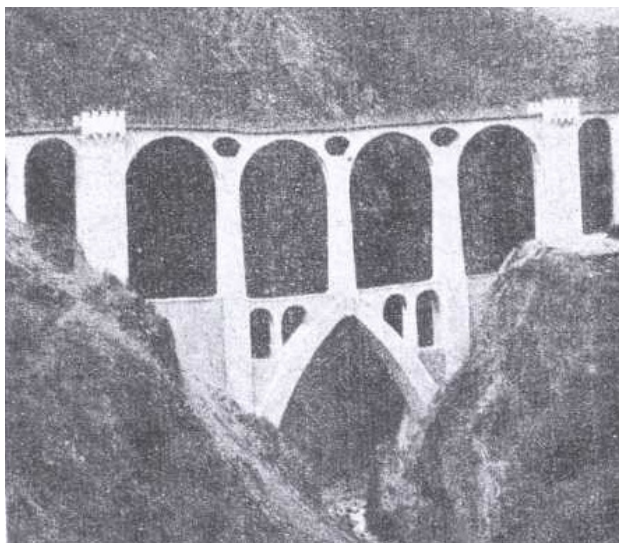


Рис. 1. Арочный мост Сежурне через лавину р. Тет.

города, наиболее возвышенного и самого холодного во Франции по климату, прорезаются долины, где произрастают тамаринд, алое и кактусы: но если отсюда, поднявшись по Першскому ущелью, вновь спуститься к Бур-Мадам (в сторону Испании), то очутиться на высоком плато Сердаль, и хотя это плато находится ещё на высоте 1100 метров, но роскошное плодородие и растительность его может сравниться с лучшими фруктовыми садами Турени. Извиваясь во все стороны, расходятся узкие долины, где ютятся, то в кустах густой зелени, то прилепляясь к голой скале, разного рода климатические станции и водолечебные заведения; их скромные размеры, ограниченные сжатыми ущельями, придают ещё более внушительный вид отдалённым Пиренеям, вершины коих вырисовываются во всю их колоссальную высоту на всём протяжении железнодорожного пути. По мере приближения к испанской границе эта новая железнодорожная линия представляет настоящую перевальную дорогу через Пиренеи, она пересекает границу в пункте, где оба склона в силу трактата принадлежат Франции. По этому договору уступлены во владение Франции 33 селения в Сердани, местечко же Ливиа, тогда считавшееся городом, осталось за Испанией. В настоящее время в этом месте образовалось череполосное владение в 10 кв. км, с населением в 1000 человек, связанное нейтральной полосой (дорогой) с границей вблизи ма-

ленького городка Пьюгсерда, выстроенного лишь в двух километрах от французской территории. Перевал через хребет совершается выемкой под открытым небом; вместо же большого тоннеля для проведения железнодорожной линии пришлось возводить многочисленные искусственные сооружения, между которыми исключительный интерес представляют собой следующие два моста.

Первым мостом (рис. 1) пересекается река Тет немного ниже Фонтпедру (Fontpédrouse). В этом месте долина р. Тет принимает воронкообразную форму, достигая ширины всего 35 метров. При пятидесятиметровой высоте над рекой, между тем в уровне железнодорожного полотна, возвышающегося над рекой на 75 метров, долина, расширяясь, достигает свыше 200 метров ширины.

Устройство каменной трубы (мостовой арки) обыкновенным способом стоило бы больших денег. Инженер Сежурне (Séjourné) придумал перекинуть через эту лавину свод стрельчатой формы, на вершине которого он обосновал колонны, высотой, отвечающей глубине пересекаемого тальвега реки Тет; таким образом получился арочный мост, встроенный оригинально и экономично.

Другой мост (рис. 2), выстроенный выше (по течению реки) предыдущего моста, представляет собою большой мост висячей системы, на стальных канатах. Это один



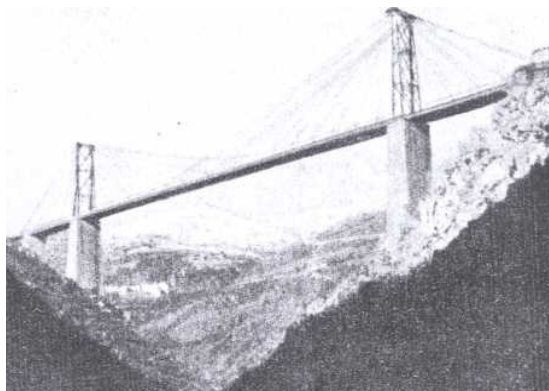


Рис. 2. Общий вид висячего моста системы Жисклара.

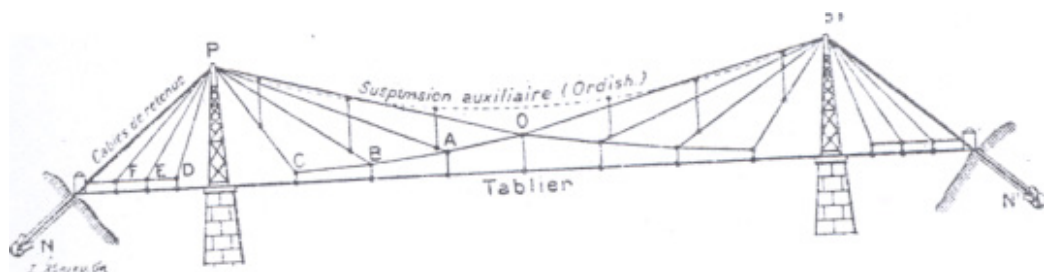


Рис. 3. Схема способа подвешивания моста. Фермы PO , PA , PB и т.д. соединены с главным канатом таким образом, что образуют треугольники, к вершинам которых прикреплены тяги, поддерживающие мостовое полотно. Фермы эти, сверх того, подвешены к вспомогательному канату, протянутому через обе опоры P и P' . В точках N и N' показаны подземные якоря, удерживающие натянутые канаты.

из редких случаев в европейской практике, когда решились устроить под железнодорожный путь такого рода мост.

В этом отношении опыт ранее был сделан в Соединённых Штатах (Северной Америки), но мост, о котором идёт речь, значительно отличается от американских мостов; спроектированный военным инженером Жисклар (Gisclard). Этот мост должен быть отмечен, как важный шаг в усовершенствовании металлических мостов.

Обыкновенно висячие мосты устраиваются при помощи цепей или стальных канатов, протянутых через две опоры (пилоны), и по длине канатов подвешены тяги, поддерживающие мостовое полотно. При проходе подвижной нагрузки кривизна этих канатов (парабола) подвергается постепенным изменениям, которые вызывают вредные колебания в мостовом полотне и добавочные напряжения в отдельных составных частях сооружения.

Чтобы уменьшить качание висячих мостов, американцы применяют систему, принятую при сооружении Бруклинского

моста. Для сей цели устраивают с обеих сторон моста высокие решетчатые фермы, создавая этим промежуточный тип между висячими мостами прежнего типа, с гибким мостовым полотном и мостами обыкновенной жёсткой системы из решетчатых ферм. Мост Жисклара основан на принципе неизменяемой треугольной системы; полотно моста подвешено при помощи ферм треугольной системы, образуемых, как показано на схеме, рис. 3, канатами, скреплёнными как в точках встречи, так и в точках, к которым примыкают тяги, поддерживающие мостовое полотно; жёсткость же последнего усиливается посредством вспомогательных подвесок типа Ордиш (Ordish), состоящих из особых канатов, перекинутых с одной опоры на другую; к этим вспомогательным канатам через определённые промежутки прикреплены главные натяжные канаты ферм при помощи вертикальных связей. Таким образом, получается геометрически неизменяемая система, и металлические части подвергаются лишь весьма малым деформациям, в зависимости от упругости метал-

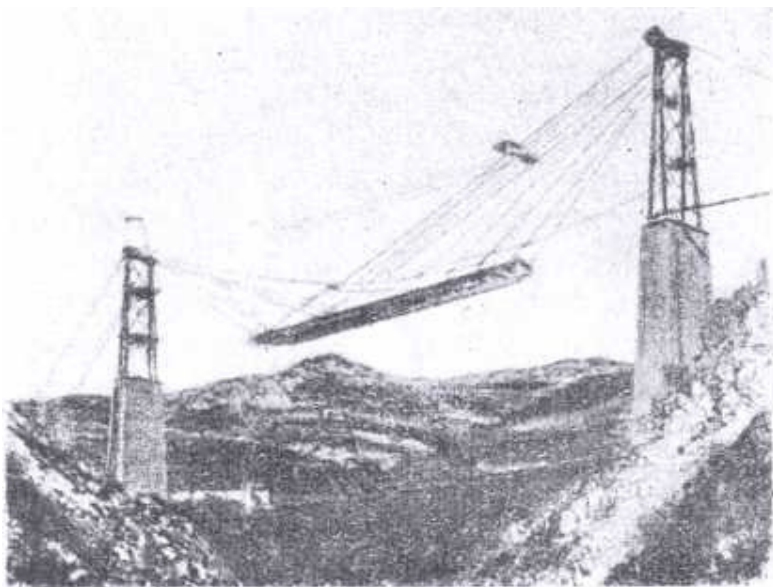


Рис. 4. Производство работ по сборке моста Жисклара.

ла, как это имеет место в сооружениях из прокатного и клéпанного железа.

Полотно моста Жисклара, сооружённого в местечке Кассань, между станциями Сото и Плانه (Sauto et Planès), расположено около 80 метров над уровнем реки Тет; общая длина моста 253 метра, из них 234 метра составляют мостовое полотно, подвешенное к двум опорам, расположенным на расстоянии 156 метров, а остальные 19 метров составляют пролётную неподвижную часть моста, относящуюся к береговым устоям (рис. 4).

Работы по сооружению выполнены с замечательным искусством инженером-специалистом Арноден (Arnodin), хорошо известным по постройке замка Шатонёф (Châteauneuf sur Loire).

Само производство работ по сборке моста отличалось смелостью и изяществом.

Чтобы избежать значительных расходов по устройству подмостей, работы велись на весу, при помощи транспортёров; начавши сборку со средней панели мостового полотна, как показано на рис. 4, продвигались шаг за шагом с каждой стороны к опорам. Работа велась так точно и была поручена такому умелому персоналу, что дело обошлось без всяких несчастных случаев.

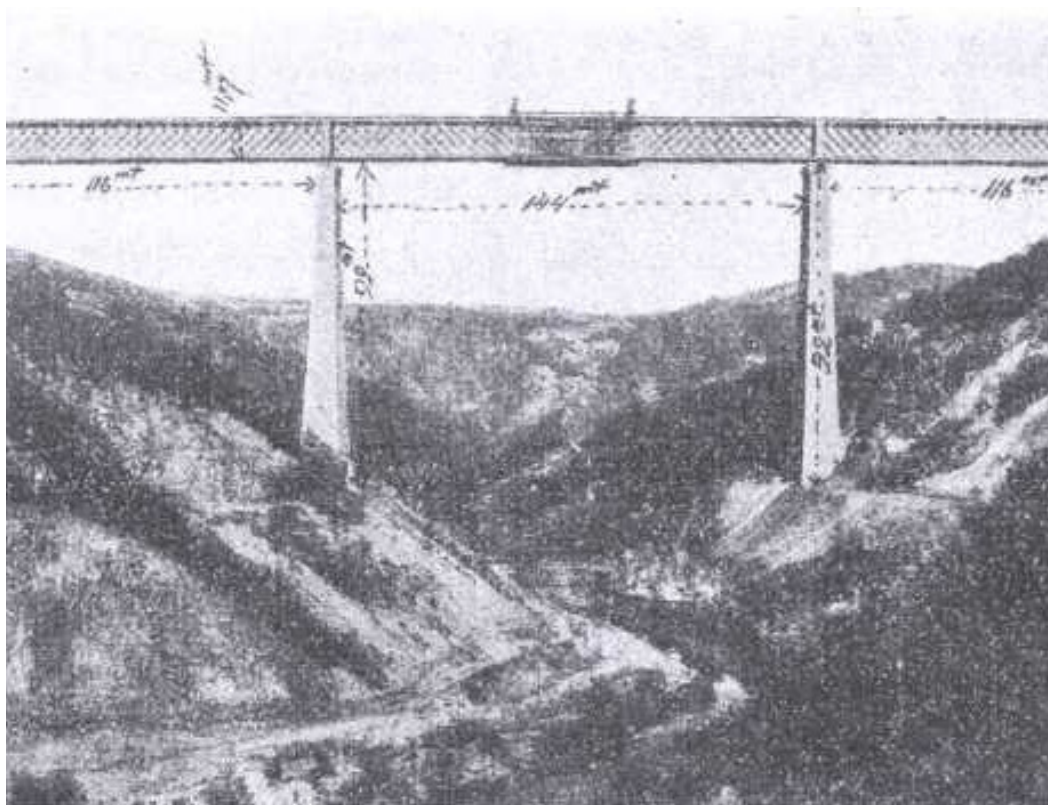
Подземные якоря N и N' (рис. 3), удерживающие натяжение цепей-канатов, устроены по новому весьма усовершенство-

ванному способу инженера Нуэлак-Пиоч (Nouailhas-Pioch). Они допускают во всякое время осмотра канатов по всей их длине и замену любого из них без малейшего вреда для прочности сооружения.

Полотно железнодорожной линии от Виллфранша до Бур-Мадам, уступленное по договору обществу сети Южных железных дорог, было сооружено правительством. Начатая в 1904 году, линия была окончательно выстроена в 5 лет; эта скорость была рекордом, который одержало правительство над частными компаниями. Заслуга в этом отношении принадлежит М. Лаксу (M. Lax), главному инспектору мостов и дорог (бывшему директору департамента железных дорог министерства Публичных работ), которому было вверено главное заведывание работами как этой линии, так и всеми пиренейскими горными железными дорогами. И, действительно, нужен был такой сильный авторитет, как инженер Лакс, чтобы наконец провести через министерство новый тип этого замечательного висячего моста, проекта полковника Жисклара, достоинства которого были признаны по истечении лишь тридцати лет (L'Illustration, 1909).

**Инженер Алексей Жолкевич
(Железнодорожное дело. — 1910. —
№ 6—7. — С. 36—38) ●**





ФАДСКИЙ ВИАДУК НА ОРЛЕАНСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ (ФРАНЦИЯ)

В Оверне, близ Клермон-Феррана, предстоит вскоре открытие сооружаемого Фадского виадука, — одной из достопримечательных построек на французских железных дорогах.

Это искусственное сооружение, возведённое по проекту инженера Шателье, пересекает долину и речку Сиуль (приток реки Аллие) на высоте 132,5 метров, тремя пролётами, причём отверстие среднего пролёта — 144 метра, а боковых — по 116 метров. Сам железный мост, решётчатой системы, при высоте стоек 11, 17 метров, расположен нижними поясами на каменных опорах (пилонах), при высоте средних опор в 92 метра. В общем — это сооружение представляется выдающимся в современных железнодорожных постройках по высоте опор и смелости замысла.

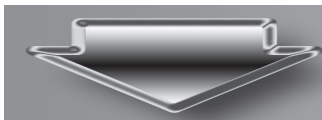
Этот мост-виадук имеет целью сократить железнодорожный путь между станциями Монлюсон и Клермон-Ферран, проходя через местечко Сант-Элой.

До постройки виадука расстояние от Монлюсона до Клермон-Феррана считалось 108 километров (из них 67 километров от Монлюсона до Ганна — по Орлеанской железной дороге и 41 км от Ганна до Клермон-Феррана по линии Париж—Лион—Средиземное море). По новому же направлению, минуя сеть дорог Общества Р. Л. М., расстояние между этими пунктами стало 96 километров.

Виадук, выстроенный из механических сооружений, принят Управлением Орлеанской железной дороги в окончательном виде, после надлежащих испытаний прочности нагрузкой и пропуском через него тяжёлых гружёных поездов.

Проезжавшие по этой линии пассажиры будут любоваться живописным зрелищем с высоты 132 метров над роскошной Сиульской долиной (Из «Le Monde Illustré»).

Инженер Алексей Жолкевич
(Железнодорожное дело. — 1910. —
№ 3—4. — С. 22) ●



NEWS FROM THE ARCHIVES

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-304-312>



The topic considered in the preceding article is continued by two publications first published in the journal 110 years ago. Both articles (they had been in turn reproduced and translated from French editions) are dedicated to engineering solutions that allowed construction of a railway in mountain region and that were unique for that time. To the maximum extent possible the vocabulary of the period of publication has been kept intact.

Keywords: mountain railway, viaduct, Pyrenees, transport history, bridge structures.

For the original Russian text of the publication please see p. 304

The editorial board is grateful to the staff of the library of Russian University of Transport for their help in preparing the material.

RAILWAY IN THE FRENCH PYRENEES

In the presence of the Minister of Public Works, Millerand, the opening of a new railway linking Villefranche-de-Conflent with Bourg-Madame will soon be inaugurated in the French-Eastern Pyrenees. This railway, on which, due to steep inclines, it was decided to use electric traction, serves as an extension of the existing line from Perpignan to Villefranche.

Passing through unexplored, inaccessible terrain, the new railway line is remarkable not only for the variety of beautiful views, but also for the originality of some manmade structures, for the construction of which new calculation formulas and bold methods were used in the work itself.

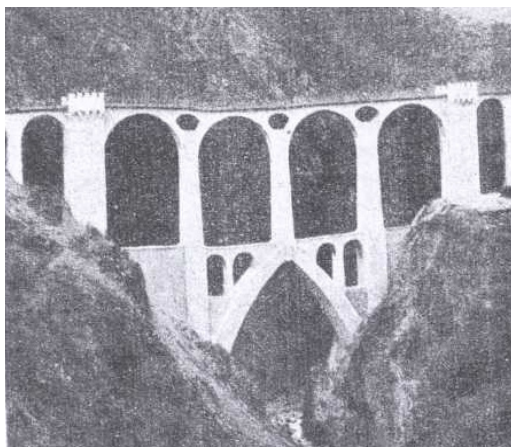
From Villefranche, the train runs along the valley of the Têt River and then crosses the French Pyrenees all the way to Bourg-Madame.

At first, running at an average height of 549 meters above sea level, the railway rises along a mountain gorge, crosses the ridge of the Pyrenees chain at an altitude of 1580 meters

and then again descends at the border, holding at an altitude of 1138 m.

Without touching the railways of a purely mountainous nature, this railway line should be considered, in general, very elevated in terms of the absolute height of its points (La Mur – 925 meters, St. Gotthard – 1154 meters, Arlberg – 1311 meters and Brenner – 1370 meters); on any other road there are no separate points that differ so much in height above sea level and in climate on clear summer days, during three hours of travel along the railway line, the temperature at different points varies up to 20°. Between the dense vineyards that cover the Roussillon Plain and the uninhabited pastures, over which the fortress of Mont Louis rises, a provincial city, the most elevated and coldest in France in terms of climate, there are valleys where tamarind, scarlet and cacti grow: but if from here, having risen along the Perche Gorge, to descend again to Burg-Madame (towards Spain), then you will find yourself on the high plateau Cerdagne, and although this

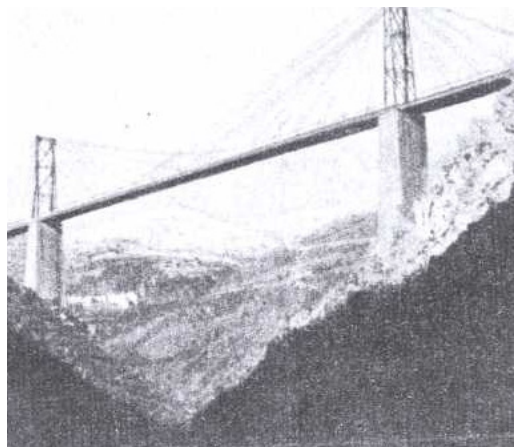




Pic. 1. Arched bridge Séjourné over the avalanche of the river Têt.

plateau is still at an altitude of 1100 meters, its luxurious fertility and vegetation can be compared with the best orchards of Touraine. Winding in all directions, narrow valleys diverge, where they huddle, now in the bushes of dense greenery, now clinging to the bare rock, various climatic stations, and hydropathic establishments; their modest size, limited by compressed gorges, lends an even more imposing appearance to the distant Pyrenees, whose peaks loom at their entire colossal height along the entire length of the railway track. As it approaches the Spanish border, this new railway line represents a real pass through the Pyrenees, it crosses the border to a point where both slopes, by virtue of the treatise, belong to France. Under this agreement, 33 villages in Cerdagne were ceded to the possession of France, while the town of Llívia, then considered a city, remained with Spain. Currently, in this place, a settlement of 10 sq. km appeared, with a population of 1000 people, connected by a neutral strip (road) with the border near the small town of Puigcerda, built only two kilometers from the French territory. The pass over the ridge is made by an open-air notch; instead of a large tunnel for the railway line, numerous artificial structures had to be erected, between which the following two bridges are of exceptional interest.

The first bridge (Pic. 1) crosses the Têt River just below Fontpédrouse. In this place, the valley of the river Têt takes on a funnel shape, reaching a width of only 35 meters. At fifty meters above the river, meanwhile, at the level of the railway bed, which rises 75 meters above



Pic. 2. General view of the suspension bridge of the Gisclard system.

the river, the valley, expanding, reaches over 200 meters in width.

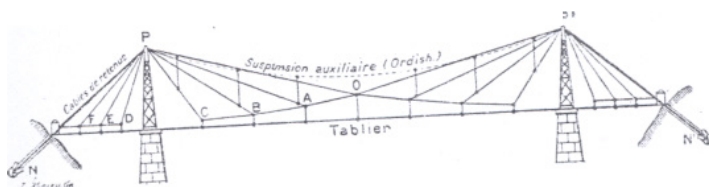
The construction of a stone pipe (bridge arch) in the usual way would cost a lot of money. The engineer Séjourné came up with the idea of throwing a lancet vault over this avalanche, at the top of which he grounded the columns, the height corresponding to the depth of the river Têt crossed by the thalweg; thus, an arched bridge was built, built in an original and economical way.

Another bridge (Pic. 2), built upstream (along the river) of the previous bridge, is a large bridge, a suspension system, on steel ropes. This is one of the rare cases in European practice when they decided to build a bridge of this kind under the railway track.

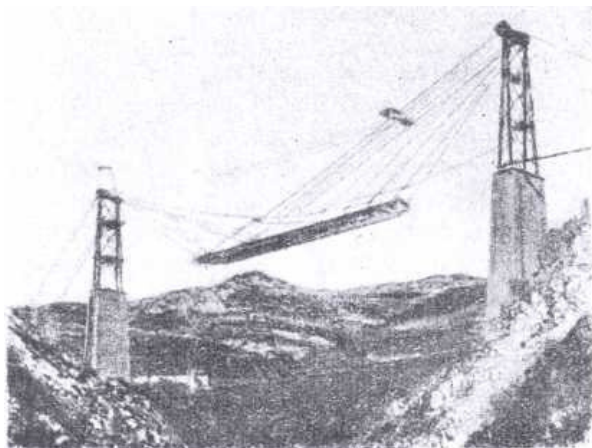
In this respect, experience has previously been done in the United States (North America), but the bridge in question is significantly different from American bridges; designed by military engineer Gisclard. This bridge should be noted as an important step in improvement of metal bridges.

Suspension bridges are usually arranged using chains or steel ropes stretched through two supports (pylons), and ropes are suspended along the length of the ropes to support the bridge deck. When a moving load passes, the curvature of these ropes (parabola) undergoes gradual changes, which cause harmful vibrations in the bridge deck and additional stresses in individual component parts of the structure.

To reduce the swinging of suspension bridges, the Americans use the system adopted during the construction of the Brooklyn Bridge.



Pic. 3. Diagram of the method of suspension of the bridge. Trusses PO, PA, PB, etc. connected to the main rope in such a way that they form triangles, to the tops of which rods supporting the bridge deck are attached. These trusses, moreover, are suspended from an auxiliary rope stretched through both supports P and P'. At points N and N', underground anchors are shown holding the tensioned ropes.



Pic. 4. Execution of works on the assembly of the Gisclard bridge.

For this purpose, high lattice trusses are arranged on both sides of the bridge, thereby creating an intermediate type between suspension bridges of the previous type, with a flexible bridge deck and bridges of an ordinary rigid system of lattice trusses. The Gisclard bridge is based on the principle of an immutable triangular system; the bridge leaf is suspended by means of triangular trusses formed, as shown in the diagram, Pic. 3, with ropes fastened both at the meeting points and at the points adjacent to the rods supporting the bridge deck; the rigidity of the latter is enhanced by means of auxiliary suspensions of the Ordish type, consisting of special ropes thrown from one support to another; to these auxiliary ropes, at certain intervals, the main tension ropes of the trusses are attached using vertical ties. Thus, a geometrically unchanging system is obtained, and the metal parts undergo only very small deformations, depending on the elasticity of the metal, as is the case in structures made of rolled and riveted iron.

The Gisclard bridge, erected in the town of Cassagne, between the stations of Sauto and Planès, is located about 80 meters above the level of the Têt River; the total length of the bridge is 253 meters, of which 234 meters are the bridge deck, suspended from two supports located at a distance of 156 meters, and the

remaining 19 meters constitute the span fixed part of the bridge related to the coastal abutments (Pic. 4).

The construction work was carried out with remarkable art by the specialist engineer Arnodin, well known for the construction of Châteauneuf-sur-Loire.

The very execution of the work on the assembly of the bridge was distinguished by boldness and grace.

To avoid significant costs for arrangement of the scaffold, the work was carried out on the weight, using conveyors; starting the assembly from the middle panel of the bridge deck, as shown in Pic. 4, were moved step by step from each side to the supports. The work was carried out so accurately and was entrusted to such a skilled staff that the business went without any accidents.

The underground anchors N and N' (Pic. 3), holding the tension of the rope chains, are arranged according to a new highly improved method by the engineer Nouailhac-Pioch. They allow at any time to inspect the ropes along their entire length and replace any of them without the slightest harm to the strength of the structure.

The railway line from Villefranche to Bourg-Madame, ceded by contract to the

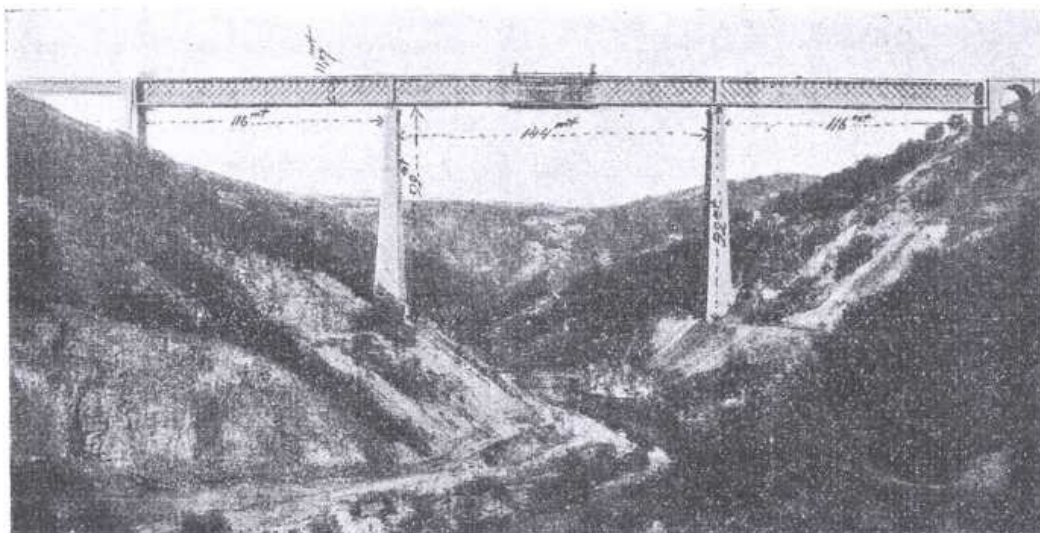


community of the Southern Railways network, was built by the government. Started in 1904, the line was finally completed in 5 years; this speed was the record for the government over private companies. The merit in this respect belongs to M. Lax, Chief Inspector of Bridges and Roads (former Director of the Railways Department of the Ministry of Public Works), who was entrusted with the main management of both this line and all the Pyrenean Mountain

railways. And, indeed, it took such a strong authority as engineer Lax to finally bring through the ministry a new type of this wonderful suspension bridge, the project of Colonel Gisclard, whose merits were recognised after only thirty years (L'Illustration, 1909).

Engineer Aleksey Zholkevich
(*Zheleznodorozhnoe delo [Railway Business]*, 1910, No. 6–7, pp. 36–38) ●

FADE VIADUCT ON THE ORLEANS RAILWAY (FRANCE)



In Auvergne, near Clermont-Ferrand, the viaduct of Fade, which is under construction, is soon to be opened, one of the most notable buildings on the French railways.

This engineering structure, erected by the engineer Chatelier, crosses the valley and the Sioule River (a tributary of the Allier River) at a height of 132,5 meters, in three spans, with the opening of the middle span – 144 meters, and the lateral ones – 116 meters each. The iron bridge itself, a lattice system, with a height of the posts of 11,17 meters, is located with the lower belts on stone supports (pylons), with a height of the middle supports of 92 meters. In general, this structure seems to be outstanding among modern railway buildings in terms of the height of the supports and the boldness of the concept.

This viaduct bridge aims to shorten the railway route between Montlucon and Clermont-Ferrand stations, passing through the town of Saint-Eloy.

Before the construction of the viaduct, the distance from Montlucon to Clermont-Ferrand was considered to be 108 kilometers (of which 67 kilometers from Montlucon to Hann – along the Orleans railway and 41 km from Hann to Clermont-Ferrand along Paris–Lyon–Mediterranean line). In the new direction, bypassing the network of roads of the Society P. L. M. the distance between these points has become of 96 kilometres only.

The viaduct, built with mechanical structures, was accepted by the Orleans Railway in its final form, after proper strength tests by loading and passing heavy loaded trains through it.

Passengers travelling along this line will enjoy the scenic view from a height of 132 meters above the luxurious Sioule Valley (From «Le Monde Illustré»).

Engineer Aleksey Zholkevich
(*Zheleznodorozhnoe delo [Railway Business]*, 1910, No. 3–4, p. 22) ●



АВТОРЕФЕРАТЫ 314

- Методика оценки взаимодействия вагонов и пути на горно-перевальных участках.
- Технологическое взаимодействие предприятий в региональных системах транспортировки насыпных грузов.
- Метод логического дополнения для организации контроля комбинационных устройств в системах мониторинга объектов железнодорожной автоматики.

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ 320

Научные и учебные издания российских издательств.

НАШ ЖУРНАЛ 323

Содержание номеров «Мира транспорта», вышедших в 2020 году.



КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ • BIBLIO-DIRECTIONS



SELECTED ABSTRACTS OF PH.D. THESES 317

- Methodology for assessing the interaction of cars and tracks on mountain crossing sections.
- Technological interaction of enterprises in regional systems of transportation of bulk cargo.
- Method of logical complement for controlling of combinational devices in monitoring systems of objects of railway automation.

NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION 321

New manuals and scientific editions offered by Russian publishing houses.

OUR JOURNAL 328

Contents of the issues of World of Transport and Transportation Journal published in Vol. 18 (2020).



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

*Selected abstracts of Ph.D. theses
submitted at Russian transport universities*

For the English text please see p. 317.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-314-319>

Ермоленко И. Ю. Расчётно-экспериментальная методика оценки взаимодействия вагонов и пути на горно-перевальных участках / Автореф. дис... канд. техн. наук. — Иркутск: ИрГУПС, 2020. — 20 с.

Проблема обеспечения безопасности движения по горно-перевальным участкам пути на данный момент раскрыта недостаточно. Это утверждение основано на множестве публикаций ведущих учёных и крупных специалистов, много лет работающих в области изучения динамики подвижного состава.

Целью диссертационной работы является разработка технических решений и предложений, направленных на повышение безопасности движения подвижного состава по горно-перевальным участкам пути с использованием количественной и качественной оценки эксплуатационных факторов, влияющих на сход вагона.

Объектом исследования является безопасность движения и сходы подвижного состава на горно-перевальных участках пути ВСЖД.

Предметом исследования является расчётно-экспериментальная методика оценки взаимодействия вагона и пути для повышения безопасности движения на горно-перевальных участках.

Использовано сочетание теоретических, экспериментальных и численных методов исследования.

Установлено влияние работы автосцепки на отказы буксового узла.

Разработана расчётно-экспериментальная методика для количественной и качественной оценки влияния эксплуатационных факторов на безопасность движения подвижного состава по горно-перевальным участкам пути.

В результате проведённых исследований сходов вагонов и систематизации факторов, влияющих на нарушение безопасности движения, определено, что сходы происходили в основном при сочетании следующих условий:

- при движении в пологих кривых участках пути радиусом от 800 м до 1200 м со скоростью 60–80 км/ч возникает поперечная нагрузка, которая длительно воздействует на дугу рель-

совой нити и может являться причиной её разрыва;

- при возникновении сверхнормативных боковых нагрузок, обусловленных заклиниванием хвостовика автосцепки в проёме УП1 в крайнем предельном положении (до 13°С).

Проведены поездные испытания, в ходе которых определены продольные и вертикальные силы, действующие на вагон при движении по горно-перевальным участкам пути ВСЖД.

Уточнена математическая модель движения грузового вагона, путём учёта переменного действия продольных усилий от автосцепки, действующих при движении по горно-перевальным участкам пути и определённых в ходе поездных испытаний.

Разработан специализированный катковый стенд, который позволил в лабораторных условиях имитировать движение вагона с неисправностями колёс в кривых участках пути, задавая возвышение рельса и размеры дефектов на поверхности катания колеса.

Установлен новый браковочный признак для визуального контроля заклинивания хвостовика автосцепки и способ его обнаружения.

Разработаны технические рекомендации по скоростным режимам движения вагонов для реальных участков пути Восточно-Сибирской железной дороги.

05.22.07 — Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация. Работа выполнена в Иркутском государственном университете путей сообщения.

Защита состоялась в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

Кравец А. С. Развитие методов технологического взаимодействия предприятий в региональных системах транспортировки насыпных грузов / Автореф. дис... канд. техн. наук. — Ростов н/Д: РГУПС, 2020. — 26 с.

Российская Федерация в силу географических особенностей находится на пересечении важнейших международных направлений грузопотоков, что определяет её приоритеты в развитии транспортной инфраструктуры, необходимость развития технологий организации перевозочного процесса, особенно в сегменте экспортных перевозок. Увеличение доли в экспорте насыпных грузов требует поиска и реализации эффективных транспортно-технологических схем развития этого сегмента перевозок с использованием потенциала видов транспорта, включая железнодорожный.

В этих условиях необходимы и актуальны разработки новых подходов и методов техноло-

гического взаимодействия предприятий в региональных системах транспортировки насыпных грузов на основе совершенствования производственно-транспортно-складских процессов и систем распределения грузопотоков.

Целью диссертационной работы является развитие методов организации и управления транспортно-технологическим взаимодействием предприятий в региональных системах транспортировки массовых насыпных грузов на основе повышения эффективности систем управления распределением грузопотоков при условии рациональной загрузки припортовой региональной инфраструктуры.

Объектом исследования являются региональные ТТС управления перевозками насыпных грузов в адрес портов с учётом взаимодействия видов транспорта и повышения конкурентоспособности транспортных услуг.

Предмет исследования — теоретико-методические подходы функционирования систем организации и управления перевозками массовых насыпных грузов в региональных припортовых ТТС, транспортно-технологические схемы перевозок насыпных грузов в международном сообщении, логистические методы мультиагентного взаимодействия.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке экономико-математической модели, методов и алгоритмов для решения задачи управления региональными транспортными системами в части технологии перевозок массовых насыпных грузов различными видами транспорта, учитывая клиентоориентированность, мультиагентность и мероприятия по повышению конкурентоспособности видов транспорта.

Выполнен анализ современного состояния отечественного и зарубежного научного опыта в области организации и управления транспортными процессами, связанными с насыпными грузами. Проведён анализ технологических параметров взаимодействия региональных субъектов транспортного рынка при экспортных перевозках насыпных грузов с участием различных видов транспорта. Установлена необходимость развития методов распределения региональных грузопотоков на принципах мультиагентности и клиентоориентированности.

Предложено развитие методов выбора форм концентрации региональных транспортно-складских систем при организации железнодорожных перевозок по уточнённым факторам: ёмкости, производительности и динамики грузовой массы. Разработана методика кластеризации элементов региональной ТТС (погрузочный кластер — кластер порта — портовый кластер) по авторскому алгоритму, которая

позволяет оценить возможности повышения уровня маршрутизации массовых насыпных грузов в регионе. Разработаны схемы выбора альтернатив железнодорожных погрузочных станций в кластере при реализации технической маршрутизации перевозок насыпных грузов.

Разработана экономико-математическая модель выбора рациональной организации грузопотоков насыпных грузов в адрес портов на основе сформированной системы временных и экономических критериев оценки перевозочного процесса в мультиагентной ТТС с учётом кластеризации производственно-транспортно-складских объектов и загрузки портовой инфраструктуры.

Разработан алгоритм и программный комплекс формирования плана распределения (маршрутизации) насыпных грузов на принципах клиентоориентированности. В результате апробации методики получены области эффективного взаимодействия погрузочных кластеров, кластеров порта, портовых кластеров.

Выполнена оценка эффективности реализации рациональных планов маршрутизации перевозок насыпных грузов на полигоне Северо-Кавказской железной дороги, которая позволяет сократить расходы клиента на транспортировку на 3,36 % (1,108 млн руб.), сократить пробеги подвижного состава на 11 300 км (3,45 %), создать резерв времени 0,17 суток (7,46 %) для обеспечения ритмичности перевозочного процесса в припортовой транспортно-технологической системе. Интегральный показатель качества организации распределения региональных грузопотоков улучшен на 13 %.

Выполненные в диссертационной работе теоретические и методологические исследования могут служить научной основой для формирования направлений развития региональных ТТС управления перевозками насыпных грузов, конкурентных выгод предприятий транспорта. Их реализация в транспортном процессе обеспечит повышение эффективности систем транспортировки железнодорожного, автомобильного и водного транспорта за счёт применения экономико-математической модели и развития системы параметризации, адекватной оценки уровней взаимодействия видов транспорта на основе интегрального показателя качества организации распределения региональных грузопотоков.

05.22.01 — Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте.

Работа выполнена в Ростовском государственном университете путей сообщения.



Пивоваров Д. В. Метод логического дополнения для организации контроля комбинационных устройств в системах мониторинга объектов железнодорожной автоматики / Автореф. дис... канд. техн. наук. — СПб.: ПГУПС, 2020. — 16 с.

Постоянное усложнение техники, миниатюризация, повышение производительности и увеличение теплоотдачи — всё это требует и развития диагностического обеспечения.

Для обеспечения надёжности принимаются различные меры, такие как использование высоконадёжных элементов, применение методов резервирования, диверсифицирования и технического диагностирования, использование самопроверяемых логических схем и т.д. Настоящее диссертационное исследование затрагивает такое направление как совершенствование подходов к синтезу систем функционального контроля (СФК) устройств автоматики на основе метода логического дополнения.

Основной целью диссертационного исследования является совершенствование методов синтеза СФК устройств автоматики на основе метода логического дополнения.

Объектом исследования являются СФК, построенные на основе метода логического дополнения, а **предметом** — характеристики СФК, построенных на основе логического дополнения и методы синтеза СФК.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке эмпирического и функционального подходов к синтезу СФК на основе метода логического дополнения до равновесных кодов, а также с контролем вычислений по двум признакам с обеспечением полной самопроверяемости структур.

Практическая значимость работы связана с возможностью использования предложенных методов для синтеза СФК по методу логического дополнения для организации диагностического обеспечения устройств автоматики широкого спектра (от контролируемых до управляющих).

Использованы методы булевой алгебры, теории дискретных устройств, технической диагностики.

Степень достоверности результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата булевой алгебры, теории дискретных устройств, технической диагностики, строгими математическими доказательствами, корректными вычислениями, а также экспериментальными исследованиями с системами контрольных логических схем.

В диссертационном исследовании предложены некоторые частные решения важной

научно-технической проблемы синтеза самопроверяемых дискретных устройств на основе метода логического дополнения. Выделим основные результаты:

Проведён обзор в предметной области диссертационного исследования и установлены основные неисследованные вопросы при организации систем функционального контроля устройств автоматики и вычислительной техники.

Предложены и разработаны методы синтеза систем функционального контроля по логическому дополнению на основе равновесных кодов, реализующие идею эмпирического и функционального подходов к получению значений функций логического дополнения.

Показано, что использование метода логического дополнения позволяет синтезировать большое количество вариантов систем функционального контроля для конкретно взятой схемы, в том числе, позволяет получать полностью самопроверяемые дискретные устройства с избыточностью, меньшей избыточности дублирования.

Установлено, что наиболее эффективными и простыми в реализации являются способы, предполагающие использование равновесных кодов с малой длиной кодовых слов, не превышающей значения $n = 6$.

Предложено использование нескольких функциональных признаков при синтезе системы диагностирования по методу логического дополнения и показано, что в таком случае удастся повысить обнаруживающую способность в блоке основной логики при аппаратных затратах, не превышающих затрат при дублировании.

Установлены необходимые и достаточные условия синтеза полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля, фактически требующие невозможности формирования ошибок симметричного типа на выходах каскада сумматоров по модулю два.

Предложен способ организации системы самодиагностирования измерительных контроллеров для мониторинга параметров объектов железнодорожной автоматики, позволяющий контролировать корректность преобразований сигналов в цифровой код.

05.13.06 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)».

Работа выполнена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

ABSTRACTS OF Ph.D. THESES

*Selected abstracts of Ph.D. theses submitted at
Russian transport universities*

For the original Russian text please see p. 314.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-314-319>

Ermolenko, I. Yu. Computational and experimental methodology for assessing the interaction of wagons and the track on mountain crossing sections. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Raschetno-eksperimentalnaya metodika otsenki vzaimodeistviya vagonov i puti na gornoperevalnykh uchastkakh. Avtoref. dis... kand. tekh. nauk]. Irkutsk, IrGUPS publ., 2020, 20 p.

The problem of ensuring safety of traffic on mountain crossing sections of the track is not sufficiently disclosed now. This statement is based on many publications of leading scientists and prominent specialists who have been working for many years in the field of studying the dynamics of rolling stock.

The objective of the thesis is to develop technical solutions and proposals aimed at improving safety of rolling stock moving along mountain crossing sections of the track using a quantitative and qualitative assessment of operational factors affecting car derailment.

The object of the research is traffic safety and rolling stock derailments on mountain crossing sections of the East-Siberian Railway.

The subject of the research is a computational and experimental technique for assessing the interaction between a car and a track to improve traffic safety on mountain crossing sections.

A combination of theoretical, experimental, and numerical research methods was used.

The influence of the automatic coupler operation on the axle box unit failures has been established.

A computational and experimental technique has been developed for a quantitative and qualitative assessment of the influence of operational factors on safety of rolling stock movement along mountain crossing sections of the track.

As a result of investigations of car derailments and systematisation of factors affecting traffic safety violations, it was determined that derailments occurred mainly under a combination of the following conditions:

- when moving in gentle curved track sections with a radius of 800 m to 1200 m at

a speed of 60–80 km/h, a lateral load occurs, which for a long time acts on the arc of the rail and may cause its rupture;

- in case of excessive lateral loads caused by jamming of the coupler shank in UP1 opening in the extreme limit position (up to 13°C).

Train tests were carried out, during which longitudinal and vertical forces acting on the car were determined when it was moving along the mountain crossing sections of the East-Siberian Railway.

The mathematical model of movement of a freight car has been clarified by considering the variable action of longitudinal forces from the automatic coupler, acting when moving along mountain crossing sections of the track and determined during train tests.

A specialized roller stand has been developed, which made it possible in laboratory conditions to simulate movement of a car with wheel faults in curved sections of the track, setting the rail elevation and the size of the defects on the wheel rolling surface.

A new rejection feature has been established for visual monitoring of jamming of the coupler shank and a method for its detection.

Technical recommendations have been developed for speed modes of cars movement for real track sections of East-Siberian Railway, a branch of JSC Russian Railways.

05.22.07 – Railway rolling stock, train traction and electrification. The work was carried out at Irkutsk State Transport University.

The defence took place at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Kravets, A. S. Development of methods of technological interaction of enterprises in regional systems of transportation of bulk cargo. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Razvitie metodov tekhnologicheskogo vzaimodeistviya predpriyatiy v regionalnykh sistemakh transportirovki nasypnykh gruzov. Avtoref. dis... kand. tekh. nauk]. Rostov-on-Don, RGUPS publ., 2020, 26 p.

The Russian Federation, due to its geographical features, is located at the intersection of the most important international directions of cargo flows, which determines its priorities in development of transport infrastructure, the need to develop technologies for organising the transportation process, especially in the export transportation segment. An increase in the share in the export of bulk cargo requires the search and implementation of effective transport and technological



schemes for development of this transportation segment using the potential of transport modes, including railway transport.

In these conditions, it is necessary and relevant to develop new approaches and methods of technological interaction of enterprises in regional systems for transportation of bulk cargo based on improvement of production, transport and warehouse processes and systems for distribution of freight flows.

The objective of the thesis is development of methods for organising and managing transport and technological interaction of enterprises in regional systems for transporting bulk cargo based on increasing the efficiency of control systems for distribution of freight flows, subject to rational loading of the port regional infrastructure.

The object of the research is regional transportation and technology systems (TTS) for managing bulk cargo transportation to ports, taking into account interaction of modes of transport and increasing competitiveness of transport services.

The subject of the research is theoretical and methodological approaches to functioning of systems for organising and managing transportation of bulk cargo in regional port TTS, transport, and technological schemes for transportation of bulk cargo in international traffic, logistic methods of multi-agent interaction.

The theoretical and practical significance of the work lies in development of an economic and mathematical model, methods, and algorithms for solving the problem of managing regional transport systems in terms of the technology of transporting bulk cargo by various modes of transport, taking into account customer focus, multi-agency and measures to increase competitiveness of modes of transport.

The analysis of the current state of domestic and foreign scientific experience in the field of organisation and management of bulk cargo transport processes is carried out. The analysis of technological parameters of interaction of regional entities of the transport market in the export transportation of bulk cargo with participation of modes of transport. The need for development of methods for distribution of regional cargo flows based on the principles of multi-agent and customer focus has been established.

The development of methods for choosing the forms of concentration of regional transport and storage systems in organisation of railway transportation

according to the specified factors: capacity, productivity and dynamics of the cargo mass is proposed. A method of clustering the elements of the regional TTS (loading cluster – port cluster) has been developed according to the author's algorithm, which makes it possible to assess the possibilities of increasing the level of routing of bulk cargo in the region. Schemes for selection of alternatives to railway loading stations in the cluster have been developed for implementation of technical routing of bulk cargo transportation.

An economic and mathematical model has been developed for choosing a rational organisation of bulk cargo flows to ports on the basis of a developed system of temporary and economic criteria for assessing the transportation process in a multi-agent TTS, taking into account clustering of production and transport warehouse facilities and loading of port infrastructure.

An algorithm and a software package for formation of a plan for distribution (routing) of bulk cargo based on the principles of customer focus has been developed. As a result of approbation of the methodology, areas of effective interaction of loading and port clusters were obtained.

An assessment was made of effectiveness of implementation of rational plans for routing bulk cargo transportation at the North Caucasian Railway network, which allows the client to reduce transportation costs by 3,36 % (1,108 million roubles), reduce the mileage of rolling stock by 11,300 km (3,45 %), create a time reserve of 0,17 days (7,46 %) to ensure the rhythm of the transportation process in the port and within technological system. The integral indicator of quality of organisation of distribution of regional cargo flows has been improved by 13 %.

The theoretical and methodological studies carried out in the thesis work can serve as a scientific basis for formation of directions for development of regional TTS for management of bulk cargo transportation, the competitive benefits of transport enterprises. Their implementation in the transport process will ensure an increase in the efficiency of transportation systems for railway, road and water transport through the use of an economic and mathematical model and development of a parameterization system, an adequate assessment of the levels of interaction between modes of transport based on an integral indicator of quality of organising distribution of regional freight flows.

05.22.01 – *Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, industrial organisation in transport sector.*

The work was carried out at Rostov State Transport University.

Pivovarov, D. V. Method of logical complement for organising control of combinational devices in the systems of monitoring of devices of railway automation. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Metod logicheskogo dopolneniya dlya organizatsii kontrolya kombinatsionnykh ustroystv v sistemakh monitoring ob'ektov zheleznodorozhnoi avtomatiki. Avtoref. dis... kand. tekh. nauk]. St. Petersburg, PGUPS publ., 2020, 16 p.

The constant complication of technology, miniaturization, increased productivity, and an increase in heat transfer – all this requires development of diagnostic support.

To ensure reliability, various measures are used, such as the use of highly reliable elements, the use of backup methods, diversification and technical diagnostics, the use of self-checking logic circuits, etc. This thesis research touches on such a direction as improving approaches to the synthesis of functional control systems (SFC) of automation devices based on the logical complement method.

The main objective of the thesis research is to improve the methods for synthesizing the SFC devices of automation based on the logical complement method.

The object of the research is the SFC built on the basis of the logical complement method, and the subject is focused on the characteristics of the SFC built on the basis of the logical complement and the methods of synthesizing the SFC.

The theoretical significance of the work lies with development of empirical and functional approaches to the synthesis of SFC based on the method of logical complement to equilibrium codes, as well as with control of computations based on two features with provision of complete self-checking of structures.

The practical significance of the work is associated with the possibility of using the proposed methods for the synthesis of SFC by the method of logical complement for organisation of diagnostic support for a wide range of automation devices (from monitoring to control).

The methods of Boolean algebra, theory of discrete devices, technical diagnostics are used.

The degree of reliability of the results is confirmed by the correct use of the mathematical

apparatus of Boolean algebra, the theory of discrete devices, technical diagnostics, rigorous mathematical proofs, correct calculations, as well as experimental studies with systems of control logic circuits.

In the thesis, some particular solutions to an important scientific and technical problem of the synthesis of self-checking discrete devices based on the logical complement method are proposed.

A review in the subject area of the thesis research is carried out and the main unexplored issues in organisation of functional control systems for automation and computer equipment are established.

Methods for synthesis of logical complement functional control systems based on equilibrium codes, which implement the idea of empirical and functional approaches to obtaining the values of logical complement functions, have been proposed and developed.

It is shown that the use of the logical complement method allows one to synthesise a large number of variants of functional control systems for a particular circuit, in particular, it makes it possible to obtain completely self-checking discrete devices with the redundancy, which is less than redundancy of duplication.

It has been found that the most effective and simplest to implement are methods that involve the use of constant-weight codes with a small codeword length not exceeding $n = 6$.

The use of several functional features in the synthesis of a diagnostic system by the method of logical complement is proposed and it is shown that in this case it is possible to increase the detecting ability in the main logic block with hardware costs not exceeding the costs of duplication.

The necessary and sufficient conditions for the synthesis of completely self-checking structures of functional control systems have been established, which actually focus on the impossibility of committing errors of a symmetric type at the outputs of a stage of adders referring to module two.

A method for organising a self-diagnosis system of measuring controllers for monitoring the parameters of railway automation devices is proposed, which makes it possible to control the correctness of converting signals into a digital code.

05.13.06 – *Automation and control of technological processes and production (transport).*

The work was carried out at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.





НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

*For the English list of the titles published
in Russian please see p. 321.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-320-322>

Басков В. Н., Игнатов А. В., Славина Ю. А. Нормативно-правовое регулирование на пассажирском автомобильном транспорте и городском наземном электрическом транспорте: Учеб. пособие. — Саратов: Саратовский гос. технический ун-т, 2020. — 177 с. ISBN 978-5-7433-3380-6.

Бобин К. Н., Гриценко В. А., Курлаев Н. В., Маскаев Л. И. Конструкция, испытания и отработка систем силовой установки сверхзвукового самолета: Учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. — 82 с. ISBN 978-5-7782-4240-1.

Болотов М. А., Вдовин Р. А. Перспективные технологии изготовления деталей двигателей и энергетических установок: Учеб. пособие. — Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2020. — 105 с. ISBN 978-5-7883-1566-9.

Боргест Н. М. Авиационные силовые установки: Учеб. пособие. — Самара: Изд-во Самарского университета, 2020. — 127 с. ISBN 978-5-7883-1561-4.

Виноградов Б. С. Авиационные центробежные компрессоры: Учеб. пособие. — Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. — 306 с. ISBN 978-5-7579-2434-2.

Денисенко Г. В., Золотарёва Г. И. Финансовый контроль экологических аспектов деятельности автотранспортных предприятий, осуществляющих вывоз твёрдых коммунальных отходов: Монография. — Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2020. — 160 с. ISBN 978-5-86433-844-5.

Денисенко О. И., Попов И. В. Инженерно-технические средства охраны и надзора: Учеб. пособие. — Самара: Самарский юридический институт ФСИН России, 2020. — 133 с. ISBN 978-5-91612-311-1.

Егоров А. Л., Шаруха А. В., Костырченко В. А. Теория и практика использования снегоуплотняющих машин: Учеб. пособие. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 106 с. ISBN 978-5-9961-2178-6.

Загорский И. О., Володькин П. П., Ланюгова А. Э. Особенности организации перевозок пассажиров для государственных и муниципальных нужд: Монография. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2020. — 99 с. ISBN 978-5-7389-3200-7.

Иванов В. А., Огудова Е. В., Елькин Б. П. Прогрессивные методы прокладки магистральных трубопроводов в сложных природно-климатических условиях: Монография. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 200 с. ISBN 978-5-9961-2428-2.

Ильина М. С., Грасс Е. Ю., Пасюк Е. Д. [и др.]. Проблема оценки и обеспечения конкурентоспособности транспортных услуг в Азово-Черноморском бассейне: Учеб. пособие. — Кинешма: Кинешма-медиа, 2020. — 102 с. ISBN 978-5-6044210-1-7.

Крапивский Е. И., Земенкова М. Ю. Производство, транспорт и хранение сжиженных природных газов: Учеб. пособие. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 221 с. ISBN 978-5-9961-2217-2.

Макашина И. И., Маричев И. В. Методологические основы становления и развития

морского образования в России (историко-педагогический анализ): Монография. — Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2020. — 144 с. ISBN 978-5-89426-170-6.

Мальцев Д. В., Генсон Е. М., Репецкий Д. С. Технологии технического обслуживания и ремонта автомобилей: Учеб. пособие. — Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2020. — 75 с. ISBN 978-5-398-02395-4.

Марков Е. В., Пульников С. А., Сысоев Ю. С. Инженерная защита холодных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов: Учеб. пособие. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 81 с. ISBN 978-5-9961-2283-7.

Мерданов Ш. М., Егоров А. Л. Зимнее содержание дорог: Монография. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 191 с. ISBN 978-5-9961-2305-6.

Пехальский А. П., Пехальский И. А. Техническое обслуживание и ремонт электрооборудования и электронных систем автомобилей: Учебник. — 2-е изд., стер. — М.: Академия, 2020. — 303 с. ISBN 978-5-4468-8707-1.

Пешков М. В. Международная торговля и перевозка грузов морским транспортом (International Trade and Carriage of Cargo by Sea Transport): Учебник по морским перевозкам. — Ростов-на-Дону: [б. и.], 2020. — 432 с. ISBN 978-5-6045227-8-3.

Пульников С. А., Сысоев Ю. С., Казакова Н. В. Оценка технического состояния трубопроводов по динамике эксплуатационного положения: Учеб. пособие. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 81 с. ISBN 978-5-9961-2280-6.

Рябченкова А. В. Транспорт в градостроительстве: Учеб. пособие. — Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020. — 288 с. ISBN 978-5-8038-1574-7.

Смирнов В. Н. Курс лекций по организации, планированию и управлению строительством мостов: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во ДНК, 2020. — 206 с. ISBN 978-5-9939-0017-9.

Смоляницкий Л. А. Земляное полотно железных и автомобильных дорог: Учеб. пособие. — Воронеж: Филиал РГУПС в г. Воронеже, 2020. — 168 с. ISBN 978-5-6042921-8-1.

Сухарева С. В., Теслова С. А. Статистика транспорта (продвинутый уровень): Учеб. пособие. — Омск: Изд-во СибАДИ, 2020. — 136 с.

Терёшина Н. П., Подсорин В. А. [и др.]. Экономика железнодорожного транспорта. Вводный курс: Учебник: в 2 ч. / Под ред. Н. П. Терёшиной, В. А. Подсорина. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2020. — Ч. 2. — 387 с.

Тиратуриян А. Н., Чернов С. А. Основы проектирования аэродромов: Учеб. пособие. — Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. — 83 с. ISBN 978-5-7890-1838-5.

Торопов С. Ю., Дорофеев С. М., Торопов Е. С. Технологии бестраншейного ремонта трубопроводов: Монография. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 232 с. ISBN 978-5-9961-2240-0.

Шахнов С. Ф. Обеспечение доступной среды для инвалидов на транспорте. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 74 с. ISBN 978-5-9509-0396-0.

Ярков С. А., Морозов В. В. Повышение эффективности организации дорожного движения в городах: Монография. — Тюмень: ТИУ, 2020. — 160 с. ISBN 978-5-9961-2291-2.

Подготовила Н. ОЛЕЙНИК ●

NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

For the original list of editions published in Russian please see p. 320.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-320-322>

Baskov, V. N., Ignatov, A. V., Slavina, Yu. A. Normative legal regulation of passenger road transport and urban surface electric transport: Study guide [*Normativno-pravovoe regulirovanie na passazhirskom avtomobilnom transporte i gorodskom nazemnom elektricheskoy transporte: Ucheb. posobie*]. Saratov, Saratov State Technical University, 2020, 177 p. ISBN 978-5-7433-3380-6.

Bobin, K. N., Gritsenko, V. A., Kurlaev, N. V., Maskaev, L. I. Design, testing and development of systems for the power plant of a supersonic aircraft: Study guide [*Konstruktsiya, ispytaniya i otrabotka sistem silovoy ustanovki sverkhzvukovogo samoleta: Ucheb. posobie*]. Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2020, 82 p. ISBN 978-5-7782-4240-1.

Bolotov, M. A., Vdovin, R. A. Promising technologies for manufacture of parts for engines and power plants: Study guide [*Perspektivnye tekhnologii izgotovleniya detalei i dvigatelei energeticheskikh ustanovok: Ucheb. posobie*]. Samara, Publishing house of Samara University, 2020, 105 p. ISBN 978-5-7883-1566-9.

Borgest, N. M. Aviation power plants: Study guide [*Aviatsionnye silovye ustanovki: Ucheb. posobie*]. Samara, Publishing house of Samara University, 2020, 127 p. ISBN 978-5-7883-1561-4.

Denisenko, G. V., Zolotareva, G. I. Financial control of environmental aspects of the activities of motor transport enterprises that carry out removal of solid municipal waste: Monograph [*Finansoviy kontrol ekologicheskikh aspektov deyatel'nosti avtotransportnykh predpriyatiy, osushchestvlyayushchikh vyvoz tverdykh kommunalnykh otkhodov: Monografiya*]. Krasnoyarsk, Siberian State University named after M. F. Reshetnev, 2020, 160 p. ISBN 978-5-86433-844-5.

Denisenko, O. I., Popov, I. V. Engineering and technical means of protection and supervision: Study guide [*Inzhenerno-tekhnicheskie sredstva okhrany i nadzora: Ucheb. posobie*]. Samara, Samara Law Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, 2020, 133 p. ISBN 978-5-91612-311-1.

Egorov, A. L., Sharukha, A. V., Kostyrchenko, V. A. Theory and practices of using snow compacting machines: Study guide [*Teoriya i praktika ispolzovaniya snegouplotnyayushchikh masin: Ucheb. posobie*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 106 p. ISBN 978-5-9961-2178-6.

Ilyina, M. S., Grass, E. Yu., Pasyuk, E. D. [et al.]. The problem of assessing and ensuring competitiveness of transport services in Azov-Black Sea basin: Study guide [*Problema otsenki i obespecheniya konkurentosposobnosti transportnykh uslug v Azovo-Chernomorskom basseine: Ucheb. posobie*]. Kineshma, Kineshma-media publ., 2020, 102 p. ISBN 978-5-6044210-1-7.

Ivanov, V. A., Ogudova, E. V., Elkin, B. P. Progressive methods of laying main pipelines under difficult natural and climatic conditions: Monograph [*Progressivnye metody prokladki magistralnykh truboprovodov v slozhnykh prirodno-klimaticheskikh usloviyakh: Monografiya*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 200 p. ISBN 978-5-9961-2428-2.

Krapivsky, E. I., Zemenkova, M. Yu. Production, transport, and storage of liquefied natural gases: Study guide [*Proizvodstvo, transport i khraneniye szhizhennykh prirodnnykh gazov: Ucheb. posobie*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 221 p. ISBN 978-5-9961-2217-2.

Makashina, I. I., Marichev, I. V. Methodological and theoretical foundations of formation and development of maritime education in Russia (historical and pedagogical analysis): Monograph [*Metodologiko-teoreticheskie osnovy stanovleniya i razvitiya morskogo obrazovaniya v Rossii (istoriko-pedagogicheskiy analiz): Monografiya*]. Novorossiysk, RIO GMU n.a. adm. F. F. Ushakov, 2020, 144 p. ISBN 978-5-89426-170-6.

Maltsev, D. V., Genson, E. M., Repetsky, D. S. Technologies of maintenance and repair of wagons: Study guide [*Tekhnologii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta*



avtomobilei: Ucheb. posobie]. Perm, Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2020, 75 p. ISBN 978-5-398-02395-4.

Markov, E. V., Pulnikov, S. A., Sysoev, Yu. S. Engineering protection of cold pipelines in conditions of heaving soils: Study guide [*Inzhenernaya zashchita kholodnykh truboprovodov v usloviyakh puchinistyykh gruntov: Ucheb. posobie*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 81 p. ISBN 978-5-9961-2283-7.

Merdanov, Sh. M., Egorov, A. L. Winter maintenance of roads: Monograph [*Zimnee soderzhanie dorog: Monografiya*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 191 p. ISBN 978-5-9961-2305-6.

Pekhalsky, A. P., Pekhalsky, I. A. Maintenance and repair of electrical equipment and electronic systems of cars: Textbook [*Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont elektrooborudovaniya i elektronnykh sistem avtomobilei: Uchebnik*]. 2nd ed., ster. Moscow, Academia publ., 2020, 303 p. ISBN 978-5-4468-8707-1.

Peshkov, M. V. International Trade and Carriage of Cargo by Sea Transport: Textbook on sea transportation. Rostov-on-Don: [b. i.], 2020, 432 p. ISBN 978-5-6045227-8-3.

Pulnikov, S. A., Sysoev, Yu. S., Kazakova, N. V. Assessment of technical condition of pipelines by the dynamics of the operational position: Study guide [*Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovodov po dinamike ekspluatatsionnogo polozheniya: Ucheb. posobie*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 81 p. ISBN 978-5-9961-2280-6.

Ryabchenkova, A. V. Transport in urban planning: Study guide [*Transport v gradostroitelstve: Ucheb. posobie*]. Irkutsk, Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2020, 288 p. ISBN 978-5-8038-1574-7.

Shakhnov, S. F. Providing an accessible environment for people with disabilities in transport sector [*Obespechenie dostupnoi sredy dlya invalidov na transporte*]. St. Petersburg, GUMRF n.a. adm. S. O. Makarov, 2020, 74 p. ISBN 978-5-9509-0396-0.

Smirnov, V. N. A course of lectures on organisation, planning and management of construction of bridges: Study guide [*Kurs lektsii po organizatsii, planirovaniyu i upravleniyu stroitelstvom mostov: Ucheb. posobie*].

St. Petersburg, Publishing house DNK, 2020, 206 p. ISBN 978-5-9939-0017-9.

Smolyanitsky, L. A. Roadbed of railways and highways: Study guide [*Zemlyanoe polотно zheleznykh i avtomobilnykh dorog: Ucheb. posobie*]. Voronezh, Branch of RSTU in Voronezh, 2020, 168 p. ISBN 978-5-6042921-8-1.

Sukhareva, S. V., Teslova, S. A. Transport statistics (advanced level): Study guide [*Statistika transporta (prodvinutiy uroven): Ucheb. posobie*]. Omsk, Publishing house SibADI, 2020, 136 p.

Tereshina, N. P., Podsorin, V. A. [et al]. Railway transport economics. Introductory course: Textbook: 2 parts [*Ekonomika zheleznodorozhnogo transporta. Vvodniy kurs: Uchebnik: v 2 ch.*]. Ed. by N. P. Tereshina, V. A. Podsorin. Moscow, TMC for education on railway transport, 2020, Part 2, 387 p.

Tiraturyan, A. N., Chernov, S. A. Fundamentals of airfield design: Study guide [*Osnovy proektirovaniya aerodromov: Ucheb. posobie*]. Rostov-on-Don, DSTU publ., 2020, 83 p. ISBN 978-5-7890-1838-5.

Toropov, S. Yu., Dorofeev, S. M., Toropov, E. S. Technologies of trenchless repair of pipelines: Monograph [*Tekhnologii bestransheynogo remonta truboprovodov: Monografiya*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 232 p. ISBN 978-5-9961-2240-0.

Vinogradov, B. S. Aviation centrifugal compressors: Study guide [*Aviatsionnye tsentrobezhnye kompressory: Ucheb. posobie*]. Kazan, Publishing house of KNRTU-KAI, 2020, 306 p. ISBN 978-5-7579-2434-2.

Yarkov, S. A., Morozov, V. V. Improving the efficiency of organisation of road traffic in cities: Monograph [*Povyshenie effektivnosti organizatsii dorozhnogo dvizheniya v gorodakh: Monografiya*]. Tyumen, TIU publ., 2020, 160 p. ISBN 978-5-9961-2291-2.

Zagorskiy, I. O., Volodkin, P. P., Lanyugova, A. E. Features of organisation of passenger transportation for state and municipal needs: Monograph [*Osobennosti organizatsii perevozok passazhirov dlya gosudarstvennykh i munitsipalnykh nuzhd: Monografiya*]. Khabarovsk, TOGU Publishing House, 2020, 99 p. ISBN 978-5-7389-3200-7.

Compiled by N. OLEYNIK ●

СОДЕРЖАНИЕ НОМЕРОВ ЖУРНАЛА «МИР ТРАНСПОРТА», ВЫШЕДШИХ В 2020 ГОДУ В ТОМЕ 18

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

Агуреев И. Е.

Развитие теории макросистем как необходимое условие повышения качества транспортного моделирования

№ 2 (87) С. 6–20

Братусь А. С., Очеретяная А. С.

Математическая модель распространения эпидемии внутри железнодорожного купейного вагона

№ 6 (91) С. 6–29

Головнич А. К.

Верифицируемая структура технологических процессов в трёхмерных динамических моделях железнодорожных станций

№ 5 (90) С. 6–23

Денисенков А. Н., Полякова Ю. М.

Краудсорсинг и платформенные решения на транспорте: возможности для развития «Цифрового метро» в России

№ 1 (86) С. 6–20

Железнов М. М., Карасев О. И., Шитов Е. А., Шитова Ю. А.

Исследование развития зарубежных железнодорожных компаний с применением патентного и библиометрического анализа

№ 1 (86) С. 22–36

Киселенко А. Н., Сундуков Е. Ю.

Оптимистический и пессимистический сценарии формирования транспортных подходов к Арктической транспортной системе на основе достижения целевых показателей

№ 6 (91) С. 46–62

Кравчук А. С., Кравчук А. И., Михеевич А. П., Гайс Н. Ю.

Теоретический метод управления расходом перекачиваемой среды по положению запирающих элементов трубопроводной арматуры

№ 2 (87) С. 22–49

Куфтинова Н. Г.

Проблемы интеллектуального анализа данных при моделировании транспортных потоков мегаполиса

№ 5 (90) С. 24–40

Лёвин Б. А., Цветков В. Я., Охотников А. Л.

Применение моделей вероятностных ситуаций на железной дороге

№ 3 (88) С. 6–26

Мачерет Д. А., Титов Р. А.

Стратегическое планирование и экономическая оценка развития интермодальной транспортной инфраструктуры

№ 6 (91) С. 30–45

Мачерет Д. А.

Теоретическое осмысление роли транспорта в обеспечении долгосрочного экономического развития

№ 4 (89) С. 6–33

Савосина М. И.

Оценка эффективности устойчивого развития транспорта

№ 2 (87) С. 50–66

Спирин И. В.

Определение затрат времени пассажиров на поездки в городах

№ 3 (88) С. 28–43

Трегубов В. Н.

Перспективные направления современных научных исследований в сфере умной мобильности

№ 3 (88) С. 44–52

Фрейдман О. А.

Методологические аспекты классификации и управления транспортными системами

№ 4 (89) С. 34–52

НАУКА И ТЕХНИКА

Алексеев В. М., Ваганов А. В., Катина М. В.

Концепция построения и реализации высокоскоростного транспорта

№ 1 (86) С. 58–72

Бельков В. М., Гогричиани Г. В.

Физические механизмы подъёма балластных гранул при прохождении высокоскоростных поездов

№ 3 (88) С. 54–71

Бондарь И. С., Квашнин М. Я., Алдекеева Д. Т.

Напряжённо-деформированное состояние железобетонного путепровода под нагрузкой

№ 2 (87) С. 68–81



Волков А. А., Морозов М. С., Кузюков В. А.

Повышение частотной эффективности сигналов с абсолютной фазовой манипуляцией на 180°

№ 3 (88) С. 72–83

Димитров Румен

Оценка электромагнитного воздействия тягового подвижного состава на рельсовые цепи

№ 5 (90) С. 42–61

Дмитренко А. В., Колосова М. А.

Особенности расчёта характеристик энергетических комплексов, использующих низкопотенциальную энергию

№ 6 (91) С. 108–117

Ефанов Д. В., Мячин В. Н., Осадчий Г. В.

Автомобильные путепроводы лифтового типа для пересечения железнодорожных путей в условиях плотной застройки современных городов

№ 5 (90) С. 90–108

Ефанов Д. В.

Система мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе промышленного «Интернета вещей»

№ 6 (91) С. 118–134

Журавлёва Л. М., Нилов М. А., Лошкарев В. Л., Левшунов В. В.

Оценка влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения

№ 4 (89) С. 54–71

Каимов Е. В.

Риск-ориентированный подход при оценке технического состояния фундаментов мостовых сооружений

№ 6 (91) С. 64–73

Лобынцев В. В., Полев С. С., Могилевский К. Г.

Исследование эффективности сглаживающих реакторов РЖФА-6500

№ 4 (89) С. 72–83

Пупатенко В. В., Сухобок Ю. А., Стоянович Г. М.

Определение электрофизических свойств грунтов в откосных зонах земляного полотна при георадарном обследовании

№ 6 (91) С. 88–107

Савинкин В. В., Кузнецова В. Н., Абилямажинова А. С.

Разработка энергоэффективного роторно-инерционного устройства по брикетированию твёрдых бытовых отходов (ТБО)

№ 1 (86) С. 38–57

Семенов А. П., Семченко В. В., Хромов И. Ю.

Мониторинг технического состояния электропоездов переменного тока по расходу электроэнергии на тягу поездов

№ 5 (90) С. 62–89

Таровик О. В., Реуцкий А. С., Топаж А. Г.

Оценка потерь бункерного СПГ от испарения

№ 3 (88) С. 84–106

Терегулов О. А.

Новые подходы к оценке состояния изоляционного материала тяговых электродвигателей электропоездов

№ 2 (87) С. 102–115

Чебыкин И. А.

Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения

№ 6 (91) С. 74–87

Шапран В. В., Фазилова З. Т.

Факторы, оказывающие влияние на развитие продольных профильных деформаций земляного полотна в криолитозоне

№ 2 (87) С. 82–101

Швецова С. В.

Аспекты оснащения объектов транспорта системами для контроля маршрутов беспилотных летательных аппаратов

№ 4 (89) С. 84–96

ЭКОНОМИКА

Брызгина Е. О., Казьмин Д. М.

Методические подходы к предоставлению государственной поддержки развитию общественного городского пассажирского транспорта

№ 4 (89) С. 108–117

Бутов А. В.

Стратегия развития автомобилестроительной компании на российском авторынке на примере ПАО «Соллерс»

№ 6 (91) С. 170–183

Волков Б. А., Бояринов Д. А.

Эффективность планирования реконструкции объектов железнодорожного транспорта с применением BIM

№ 4 (89) С. 98–107

Гудков Д. В., Старынин В. В.

Влияние расстояния перевозок грузов на эксплуатационные расходы автотранспортного предприятия

№ 6 (91) С. 158–169

Жуков В. Е. Модели анализа спроса на пассажирские авиаперевозки	№ 1 (86)	С. 134–144
Жуков В. Е. Исследование предпосылок возникновения операционного убытка в деятельности авиакомпаний	№ 2 (87)	С. 118–135
Карасев О. И., Железнов М. М., Тростьянский С. С., Шитова Ю. А. Комплексный анализ форм инновационной деятельности зарубежных железнодорожных компаний	№ 2 (87)	С. 158–170
Лавров И. М. Разработка «Дома качества» на рынке железнодорожного транспорта	№ 2 (87)	С. 136–157
Макуцкий Н. А., Фадеев М. С., Чистяков П. А. Сравнение методик прогнозирования междугородних пассажиропотоков на различных видах транспорта	№ 1 (86)	С. 74–92
Малышев М. И., Филиппова Н. А., Пономарев М. Л. Неполученная провозная плата — нерешённая проблема предприятий общественного транспорта, осуществляющих перевозку льготников	№ 1 (86)	С. 116–133
Мачерет Д. А., Разуваев А. Д., Ледней А. Ю. Экономическая оценка сезонной неравномерности загрузки железнодорожной инфраструктуры	№ 1 (86)	С. 94–115
Семенов А. П., Лакин И. К. Обоснование необходимости систем диагностирования локомотивов	№ 6 (91)	С. 136–157
Солдатенко И. А. Зарубежные подходы к проведению аудита эффективности транспортной системы на региональном уровне	№ 6 (91)	С. 184–206
Филимонова З. В. Сравнительные оценки конкурентоспособности пассажирских перевозок	№ 4 (89)	С. 118–132

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Будрина Е. В., Лебедева А. С., Рогавичене Л. И., Квитко К. Б. Специфика организации транспортно-логистического кластера с приоритетом развития интеллектуальных транспортных технологий	№ 4 (89)	С. 156–173
Бурлуцкий А. А., Елугачев П. А. Развитие подхода к совершенствованию маршрутной схемы пассажирского транспорта крупного города	№ 4 (89)	С. 174–187
Витолин С. В. Основы методологии управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупного города при светофорном регулировании	№ 4 (89)	С. 148–155
Гуц А. В. Модели организации комбинированных (смешанных) пассажирских перевозок	№ 6 (91)	С. 208–219
Дундуа Р. Д. Развитие системы корпоративного управления в железнодорожных компаниях	№ 3 (88)	С. 134–147
Ефанов Д. В. Интеграция систем управления и мониторинга	№ 1 (86)	С. 146–157
Иванова Е. А., Флягина Т. А. Развитие ВСМ в России с учётом динамики пассажиропотоков и общественного мнения	№ 6 (91)	С. 248–270
Козельский И. Ю. Ключевые ошибки при разработке документов транспортного планирования	№ 3 (88)	С. 108–119
Короткий А. А., Демьянов А. Ан., Демьянов А. Ал. Система дистанционного мониторинга технических объектов	№ 5 (90)	С. 110–121
Кудряшов М. А., Прокопенков А. В., Айриев Р. С. К вопросу нормативного обеспечения эксплуатации пассажирских электрических транспортных средств	№ 1 (86)	С. 196–211
Кудряшов М. А., Прокопенков А. В., Айриев Р. С. Методический подход к организации перевозок на электробусных маршрутах	№ 5 (90)	С. 152–170
Лысенко Н. Е., Кузнецова И. А., Кузнецов К. С. К вопросу эффективности работы маневровых тепловозов на грузовых терминалах	№ 1 (86)	С. 170–183
Малахов С. В., Капустин М. Ю. Оперативное нормирование энергоресурсов на тягу поездов с использованием метода искусственных нейронных сетей	№ 1 (86)	С. 158–169





Мальцев Д. В., Репецкий Д. С.

Контроль производственного персонала при выполнении работ
технического обслуживания автомобилей

№ 6 (91) С. 238–247

Москвичев О. В., Леонова С. А.

Методика выбора мест размещения транспортно-пересадочных узлов
на основе оптимизационной математической модели

№ 2 (87) С. 198–213

Мячин В. Н., Цибро С. В., Семенова Н. Ю., Баскакова А. А.

Методы расчёта численности населения при транспортном моделировании

№ 4 (89) С. 134–147

Немчинов М. В., Холин А. С.

Тенденции развития комплексных транспортных схем городов

№ 3 (88) С. 120–133

Покусаев О. Н., Чекумарев А. Е., Евсеев В. С.

К вопросу о назначении дополнительных остановок пассажирским поездам
дальнего следования в границах города Москвы

№ 2 (87) С. 172–197

Попов А. Т., Суслова О. А., Воронкова Е. А.

Оптимизация процесса выгрузки железорудного сырья на примере
металлургического комбината

№ 3 (88) С. 148–162

Попов А. Т., Хмелев А. С.

Совершенствование методики расчёта средневзвешенного оборота
полувагонов металлургического предприятия

№ 1 (86) С. 184–195

Спирин И. В., Гришаева Ю. М., Матанцева О. Ю.

Индикатор для оценки обеспеченности подвижным составом городского
пассажирского транспорта общего пользования

№ 6 (91) С. 220–237

Троицкий П. С.

Внедрение новейшей железнодорожной техники на основе межотраслевой
кооперации

№ 4 (89) С. 188–198

Чернова Г. А., Великанова М. В., Кокшилов В. А.

Оценка качества перевозок пассажиров в городе Волжском по требованиям
социального стандарта

№ 5 (90) С. 122–139

Юсупова О. А.

Анализ качества обслуживания грузоотправителей-частных лиц

№ 2 (87) С. 214–224

Юсупова О. А.

Анализ качества сайта грузоперевозчика с целью повышения
лояльности клиентов-частных лиц

№ 5 (90) С. 140–151

БЕЗОПАСНОСТЬ

Бочков К. А., Комнатный Д. В.

Метод для расчётных оценок характеристик безопасности
железнодорожной автоматизации

№ 3 (88) С. 164–173

Ерхова М. В., Шумкова Л. Г.

Исследование особенностей совладающего поведения курсантов-пилотов
гражданской авиации

№ 1 (86) С. 214–229

Попов А. В., Каймакова У. М., Стецкий Н. П.

Уровень владения навыками первой помощи среди водителей в России
и Европейском Союзе

№ 1 (86) С. 230–243

Швецов А. В.

Субъект транспортной инфраструктуры как элемент системы обеспечения
транспортной безопасности

№ 1 (86) С. 244–257

Швецова С. В., Швецов А. В.

Обеспечение безопасности при эксплуатации беспилотных летательных
аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры

№ 3 (88) С. 174–188

ОБРАЗОВАНИЕ И КАДРЫ

Коваленко Н. И., Коваленко Н. А.

Техническое обслуживание малоинтенсивных железных
дорог в современных условиях

№ 5 (90) С. 190–200

Платонова О. А.

Об истории математических олимпиад

№ 5 (90) С. 172–189

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Графф М.

Центральная Андская железная дорога в Перу

№ 6 (91) С. 272–303

Григорьев Н. Д.

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

№ 3 (88) С. 214–224

Григорьев Н. Д.

Эмилий Христианович Ленц (1804–1865)

№ 4 (89) С. 200–210

Левин Д. Ю.

Строительство Великого Сибирского пути

№ 3 (88) С. 190–213

Соколов Ю. И.

Институт экономики и финансов Российского университета транспорта:
веки становления и развития

№ 2 (87) С. 226–244

Шелихова А. К.

По воде аки посуху

№ 5 (90) С. 202–211

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Разуваев А. Д.

Журнал «Современник» о железной дороге (социально-экономический анализ)

№ 2 (87) С. 260–269

Холиков И. В.

Правовые знания для будущих транспортников

№ 1 (86) С. 260–264

Холиков И. В.

Право и транспорт: продолжение темы

№ 4 (89) С. 246–253

Шапкин И. Н.

Реформатор железных дорог и страны

№ 5 (90) С. 234–241

Шелихова А. К.

Весь Маглев по алфавиту...

№ 3 (88) С. 244–247

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

Беспилотные авиационные системы: устойчивое развитие
и вопросы регулирования

№ 1 (86) С. 258

Минтранс России оцифрует транспортную накладную и путевой лист

№ 1 (86) С. 21

Новый терминал С в аэропорту Шереметьево

№ 1 (86) С. 212

Первый взлёт самолёта с воды

№ 3 (88) С. 242

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

№ 3 (88) С. 27

Перевозки пассажиров на инфраструктуре ОАО «РЖД» в 2019 году

№ 1 (86) С. 93

Умные перекрёстки в Москве

№ 2 (87) С. 116

Устойчивое развитие: 82-я сессия комитета по внутреннему транспорту ЕЭК ООН

№ 2 (87) С. 21

ПРЕСС-АРХИВ

Железная дорога во французских Пиренеях

№ 6 (91) С. 304–312

Новая система железных дорог с большой скоростью, предложенная

Августом Шерль (проект улучшения пассажирского движения). Часть 1.

№ 4 (89) С. 211–244

О путях развития железных дорог (1910)

№ 3 (88) С. 225–241

Об улучшении условий пассажирского движения по железным дорогам

Петербургского узла пригородным и городским

№ 2 (87) С. 245–258

Передвижение пассажиров и грузов по безрельсовому пути

№ 5 (90) С. 212–232

Фадский виадук на Орлеанской железной дороге (Франция)

№ 6 (91) С. 304–312

АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

№ 1 (86) С. 265–270, № 2 (87) С. 270–274, № 3 (88) С. 248–254, № 4 (89) С. 254–261, № 5 (90) С. 242–254,
№ 6 (91) С. 314–319

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

№ 1 (86) С. 271–272, № 2 (87) С. 275–276, № 3 (88) С. 255–256, № 4 (89) С. 262–264, № 5 (90) С. 255–256,
№ 6 (91) С. 320–322





CONTENTS OF THE ISSUES OF WORLD OF TRANSPORT AND TRANSPORTATION JOURNAL PUBLISHED IN VOL. 18 (2020)

THEORY

Agureev, I. E.

Development of the Theory of Macrosystems as a Necessary Condition for Improving Quality of Transport Modelling Iss. 2 (87) pp. 6–20

Bratus, A. S., Ocheretyanaya, A. S.

Mathematical Model of Spread of the Epidemic Inside a Railway Compartment Coach Iss. 6 (91) pp. 6–29

Denisenkov, A. P., Polyakova, Yu. M.

Crowdsourcing and Platform Solutions in Transport: Opportunities for Development of «Digital Metro» in Russia Iss. 1 (86) pp. 6–20

Freidman, O. A.

Methodological Aspects of Transportation Systems Classification and Management Iss. 4 (89) pp. 34–52

Golovnich, A. K.

Verifiable Structure of Technological Processes in Dynamic 3D Models of Railway Stations Iss. 5 (90) pp. 6–23

Kiselenko, A. N., Sundukov, E. Yu.

Optimistic and Pessimistic Scenarios for Development of Feeder Network of the Arctic Transport System Based on Achievement of Target Indicators Iss. 6 (91) pp. 46–62

Kravchuk, A. S., Kravchuk, A. I., Mikhievich, A. P., Gays, N. Y.

Theoretical Method for Controlling the Flow Rate of the Pumped Medium by Positioning Locking Elements of the Pipe Fittings Iss. 2 (87) pp. 22–49

Kuftinova, N. G.

The Problem of Data Mining in Modelling Traffic Flows in a Megapolis Iss. 5 (90) pp. 24–40

Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya., Okhotnikov, A. L.

Application of Models of Probabilistic Situations regarding Railways Iss. 3 (88) pp. 6–26

Macheret, D. A., Titov, R. A.

Strategic Planning and Economic Assessment of Development of Intermodal Transport Infrastructure Iss. 6 (91) pp. 30–45

Macheret, D. A.

Theoretical Comprehension of the Role of Transport in Ensuring Long-Term Economic Development Iss. 4 (89) pp. 6–33

Savosina, M. I.

Assessment of Effectiveness of Sustainable Transport Development Iss. 2 (87) pp. 50–66

Spirin, I. V.

Estimation of Travel Time Spending by Urban Transport Passengers Iss. 3 (88) pp. 28–43

Tregubov, V. N.

Promising Modern Research Areas in Smart Mobility Iss. 3 (88) pp. 44–52

Zheleznov, M. M., Karasev, O. I., Shitov, E. A., Shitova, Yu. A.

Research of Development of Foreign Railway Companies Using Patent and Bibliometric Analysis Iss. 1 (86) pp. 22–36

SCIENCE AND ENGINEERING

Alexeev, V. M., Vaganov, A. V., Katina, M. V.

The Concept of Development and Implementation of High-Speed Transport Iss. 1 (86) pp. 58–72

Belkov, V. M., Gogrichiani, G. V.

Physical Mechanisms of Ballast Granules Flying during Passage of High-Speed Trains Iss. 3 (88) pp. 54–71

Bondar, I. S., Kvashnin, M. Ya., Aldekeeva, Dinara T.

Stress-Strain State of Reinforced Concrete Overpass under Load Iss. 2 (87) pp. 68–81

Chebykin, I. A.

Automating Road Traffic Monitoring Using Computer Vision Iss. 6 (91) pp. 74–87

Dimitrov, Rumen

Evaluation of the Electromagnetic Effect of Traction Rolling Stock on Track Circuits

Iss. 5 (90) pp. 42–61

Dmitrenko, A. V., Kolosova, M. A.

Features of Calculating the Characteristics of Energy Complexes Using Low-Grade Energy

Iss. 6 (91) pp. 108–117

Efanov, D. V.

Monitoring System for Railway Automation Devices Based on the Industrial Internet of Things

Iss. 6 (91) pp. 118–134

Efanov, D. V., Myachin, V. N., Osadchy, G. V.

Road Overbridges of Car Lift Type for Crossing Railway Tracks in Densely Built-Up Areas of Modern Cities

Iss. 5 (90) pp. 90–108

Kaimov, E. V.

Risk-Based Approach in Assessing the Technical Condition of Foundations of Bridge Structures

Iss. 6 (91) pp. 64–73

Lobyntsev, V. V., Polev, S. S., Mogilevsky, K. G.

Study of Performance of RZhFA-6500 Smoothing Reactors

Iss. 4 (89) pp. 72–83

Pupatenko, V. V., Sukhobok, Yu. A., Stoyanovich, G. M.

Evaluation of Electrophysical Properties of Soils in the Slope Zones of the Foundation During GPR Survey

Iss. 6 (91) pp. 88–107

Savinkin, V. V., Kuznetsova, V. N., Abilmazhinova, A. S.

Development of an Energy-Efficient Rotary Inertia Device for Briquetting Household Solid Waste (HSW)

Iss. 1 (86) pp. 38–57

Semenov, A. P., Semchenko, V. V., Khromov, I. Yu.

Monitoring the Technical Condition of AC Electric Locomotives using Traction Energy Consumption Rates

Iss. 5 (90) pp. 62–89

Shapran, V. V., Fazilova, Z. T.

Factors Influencing Development of Longitudinal Profile Deformations of the Roadbed in the Permafrost Zone

Iss. 2 (87) pp. 82–101

Shvetsova, S. V.

Aspects of Equipping Transport Facilities with Systems for Controlling Routes of Unmanned Aerial Vehicles

Iss. 4 (89) pp. 84–96

Tarovik, O. V., Reutsky, A. S., Topazh, A. G.

Estimation of Evaporation Losses of Bunker LNG

Iss. 3 (88) pp. 84–106

Teregulov, O. A.

New Approaches to Assessing State of Insulating Material of Traction Electric Motors of Electric Locomotives

Iss. 2 (87) pp. 102–115

Volkov, A. A., Morozov, M. S., Kuzyukov, V. A.

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

Iss. 3 (88) pp. 72–83

Zhuravleva, L. M., Nilov, M. A., Loshkarev, V. L., Levshunov, V. V.

Evaluation of the Impact of Doppler Effect on Quality of HSR Radiocommunications

Iss. 4 (89) pp. 54–71

ECONOMICS

Butov, A. V.

Development Strategy of a Car Manufacturing Company in the Russian Car Market at the example of Sollers PJSC

Iss. 6 (91) pp. 170–183

Bryazgina, E. O., Kazmin, D. M.

Methodological Approaches to Providing State Support for Development of Public Urban Passenger Transport

Iss. 4 (89) pp. 108–117

Gudkov, D. V., Starynin, V. V.

Influence of the Distance of Transportation of Goods on Operating Costs of a Motor Transport Enterprise

Iss. 6 (91) pp. 158–169

Filimonova, Z. V.

Comparative Assessment of Competitiveness of Passenger Transportation

Iss. 4 (89) pp. 118–132



<i>Karasev, O. I., Zheleznov, M. M., Trostyansky, S. S., Shitova, Yu. A.</i> Comprehensive Analysis of Forms of Innovative Activity of Foreign Railway Companies	Iss. 2 (87) pp. 158–170
<i>Lavrov, I. M.</i> Development of the House of Quality for Rail Transportation Market	Iss. 2 (87) pp. 136–157
<i>Macheret, D. A., Razuvaev, A. D., Ledney, A. Yu.</i> Economic Assessment of Seasonal Unevenness in Railway Infrastructure Loading	Iss. 1 (86) pp. 94–115
<i>Makutsky, N. A., Fadeev, M. S., Chistyakov, P. A.</i> Comparison of Forecasting Methods for Intercity Passenger Flows for Various Modes of Transport	Iss. 1 (86) pp. 74–92
<i>Malyshev, M. I., Filippova, N. A., Ponomarev, M. L.</i> Uncollected Fare as Unresolved Problem of Public Transport Enterprises Engaged in Transportation of Benefit Holders	Iss. 1 (86) pp. 116–133
<i>Semenov, A. P., Lakin, I. K.</i> Justification of the Need for Locomotive Diagnostic Systems	Iss. 6 (91) pp. 136–157
<i>Soldatenko, I. A.</i> Foreign Approaches to the Audit of Transport System Efficiency at the Regional Level	Iss. 6 (91) pp. 184–206
<i>Volkov, B. A., Boyarinov, D. A.</i> Efficiency of Planning the Reconstruction of Railway Facilities Using BIM	Iss. 4 (89) pp. 98–107
<i>Zhukov, V. E.</i> Demand Analysis Models for Passenger Air Transportation	Iss. 1 (86) pp. 134–144
<i>Zhukov, V. E.</i> The Study on Prerequisites for Operating Losses in the Airline Activity	Iss. 2 (87) pp. 118–135
ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL	
<i>Budrina, E. V., Lebedeva, A. S., Rogavichene, L. I., Kvitko, K. B.</i> Features of Organisation of Transport and Logistics Cluster Prioritising Intelligent Transport Technologies Development	Iss. 4 (89) pp. 156–173
<i>Burlutsky, A. A., Elugachev, P. A.</i> Development of an Approach to Improving the Passenger Transport Routing Scheme in a Large City	Iss. 4 (89) pp. 174–187
<i>Chernova, G. A., Velikanova, M. V., Kokshilov, V. A.</i> Assessment of Quality of Passenger Transportation in the City of Volzhsky in Conformity with the Requirements of the Social Standard	Iss. 5 (90) pp. 122–139
<i>Dundua, R. D.</i> Corporate Governance Development in Railway Companies	Iss. 3 (88) pp. 134–147
<i>Efanov, D. V.</i> Integration of Control and Monitoring Systems	Iss. 1 (86) pp. 146–157
<i>Guts, A. V.</i> Models of Organisation of Combined (Mixed-Mode) Passenger Transportation	Iss. 6 (91) pp. 208–219
<i>Ivanova, E. A., Flyagina, T. A.,</i> HSR Development in Russia Considering the Dynamics of Passenger Traffic and Public Opinion	Iss. 6 (91) pp. 248–270
<i>Korotky, A. A., Demyanov, A. Al., Demyanov, A. An.</i> System of Remote Monitoring of Technical Objects	Iss. 5 (90) pp. 110–121
<i>Kozelsky, I. Yu.</i> Key Mistakes in Development of Transport Planning Documents	Iss. 3 (88) pp. 108–119
<i>Kudryashov, M. A., Prokopenkov, A. V., Ayriev, R. S.</i> On the Issue of Regulatory Support for Passenger Electric Vehicles Operation	Iss. 1 (86) pp. 196–211
<i>Kudryashov, M. A., Prokopenkov, A. V., Ayriev, R. S.</i> Methodical Approach to Organisation of Transportation on Electric Bus Routes	Iss. 5 (90) pp. 152–170

<i>Lysenko, N. E., Kuznetsova, I. A., Kuznetsov, K. S.</i> On the Issue of Efficiency of Shunting Diesel Locomotives at Cargo Terminals	Iss. 1 (86) pp. 170–183
<i>Malakhov, S. V., Kapustin, M. Yu.</i> Operational Rationing of Energy Resources for Train Traction using the Method of Artificial Neural Networks	Iss. 1 (86) pp. 158–169
<i>Maltsev, D. V., Repetsky, D. S.</i> Control of Production Personnel when Performing Vehicle Maintenance	Iss. 6 (91) pp. 238–247
<i>Moskvichev, O. V., Leonova, S. A.</i> Methods of Selection of Transport Interchange Hubs Location Based on Optimization Mathematical Model	Iss. 2 (87) pp. 198–213
<i>Myachin, V. N., Tsibro, S. V., Semenova, N. Yu., Baskakova, A. A.</i> Methods for Calculating the Population Size in Transport Modelling	Iss. 4 (89) pp. 134–147
<i>Nemchinov, M. V., Kholin, A. S.</i> Trends in Development of Integrated Transport Schemes for Cities	Iss. 3 (88) pp. 120–133
<i>Pokusaev, O. N., Chekmarev, A. E., Evseev, V. S.</i> On the Issue of Assigning Additional Stops for Long-Distance Passenger Trains within the Boundaries of the City of Moscow	Iss. 2 (87) pp. 172–197
<i>Popov, A. T., Khmelev, A. S.</i> Improving the Methodology for Calculating the Average Turnover of Gondola Cars of an Iron and Steel Plant	Iss. 1 (86) pp. 184–195
<i>Popov, A. T., Suslova, O. A., Voronkova, E. A.</i> Optimization of the Process of Unloading of Iron Ore Raw Materials: The Case of a Steel Plant	Iss. 3 (88) pp. 148–162
<i>Spirin, I. V., Grishaeva, Y. M., Matantseva, O. Yu.</i> Indicator for Assessing Availability of Rolling Stock for Public Urban Passenger Transport	Iss. 6 (91) pp. 220–237
<i>Troitskiy, P. S.</i> Introduction of the Latest Railway Technology based on Intersectoral Cooperation	Iss. 4 (89) pp. 188–198
<i>Vitolin, S. V.</i> Basic Methodology of Traffic Management for the Street and Road Network of a Large City with Traffic Lights Regulation	Iss. 4 (89) pp. 148–155
<i>Yusupova, O. A.</i> Assessment of Quality of Service Provided to Private Consignors	Iss. 2 (87) pp. 214–224
<i>Yusupova, O. A.</i> Analysis of Quality of a Carrier's Website to Increase Loyalty of Individual Customers	Iss. 5 (90) pp. 140–151

SAFETY AND SECURITY

<i>Bochkov, K. A., Komnatniy, D. V.</i> Method for Calculating Safety Features of Railway Automation Devices	Iss. 3 (88) pp. 164–173
<i>Erkhova, M. V., Shumkova, L. G.</i> Study of Peculiarities of Coping Behavior of Cadets-Pilots of Civil Aviation	Iss. 1 (86) pp. 214–229
<i>Popov, A. V., Kaimakova, U. M., Stetsky, N. P.</i> Level of First Aid Skills Among Drivers in Russia and the European Union	Iss. 1 (86) pp. 230–243
<i>Shvetsov, A. V.</i> The Stakeholders of Transport Infrastructure as an Element of the Transport Security System	Iss. 1 (86) pp. 244–257
<i>Shvetsova, S. V., Shvetsov, A. V.</i> Enhanced Security of Unmanned Aerial Vehicles Operations at Transport Infrastructure Facilities	Iss. 3 (88) pp. 174–188

HRM, EDUCATION & TRAINING

<i>Kovalenko, N. I., Kovalenko, N. A.</i> Maintenance of Low-Intensity Railways in Modern Conditions	Iss. 5 (90) pp. 190–200
<i>Platonova, O. A.</i> History of Mathematical Olympiads	Iss. 5 (90) pp. 172–189





HISTORY WHEEL

Graff, M.

Central Andean Railway in Peru

Iss. 6 (91) pp. 272–303

Grigoriev, N. D.

Evgeny O. Paton (to the 150th anniversary of the birth)

Iss. 3 (88) pp. 214–224

Grigoriev, N. D.

Emilius Lenz (1804–1865)

Iss. 4 (89) pp. 200–210

Levin, D. Yu.

Construction of the Great Siberian Route

Iss. 3 (88) pp. 190–213

Shelikhova, A. K.

On the Water like on the Dry Land

Iss. 5 (90) pp. 202–211

Sokolov, Yu. I.

Institute of Economics and Finance of Russian University of Transport:

Milestones of Establishment and Development

Iss. 2 (87) pp. 226–244

BIBLIO-DIRECTIONS

Kholikov, I. V.

Legal Knowledge for Future Transport Employees

Iss. 1 (86) pp. 260–264

Kholikov, I. V.

Law and Transport: Continuing the Topic

Iss. 4 (89) pp. 246–253

Razuvaev, A. D.

Sovremennik Magazine about the Railways (socio-economic analysis)

Iss. 2 (87) pp. 260–269

Shapkin, I. N.

Reformer of the Railways and of the Country

Iss. 5 (90) pp. 234–241

Shelikhova, A. K.

All Maglev alphabetically...

Iss. 3 (88) pp. 244–247

EXPRESS-INFORMATION

Drone Operations: Sustainable Development and Regulation Issues

Iss. 1 (86) p. 258

First Plane to Take-Off from Water

Iss. 3 (88) p. 242

New Terminal C Opened at Sheremetyevo Airport

Iss. 1 (86) p. 212

Passenger Transportation Through the Infrastructure Owned by Russian Railways in 2019

Iss. 1 (86) p. 93

Russian Ministry of Transport Digitizes Bill of Lading and the Waybill

Iss. 1 (86) p. 21

Russian Railways Implements First Smart Freight Transport Contract

Iss. 3 (88) p. 27

Smart Intersections in Moscow

Iss. 2 (87) p. 116

Sustainable Development: the 82nd Session of the Unece ITC

Iss. 2 (87) p. 21

PRESS ARCHIVES

Fade Viaduct on the Orleans Railway (France)

Iss. 6 (91) pp. 304–312

New High-Speed Rail System Proposed by August Scherl

(Passenger Traffic Improvement Project). Part 1

Iss. 4 (89) pp. 211–244

On Improving the Conditions for Passenger Traffic on Suburban

and Urban Railways of Petersburg Junction

Iss. 2 (87) pp. 245–258

On the Ways of Development of Railway Business (1910)

Iss. 3 (88) pp. 225–241

Railway in the French Pyrenees

Iss. 6 (91) pp. 304–312

The Movement of Passengers and Goods Along a Railless Track

Iss. 5 (90) pp. 212–232

ABSTRACTS OF D.SC. AND PH.D.

Iss. 1 (86) pp. 265–270, Iss. 2 (87) pp. 270–274, Iss. 3 (88) pp. 248–254, Iss. 4 (89) pp. 254–261, Iss. 5 (90) pp. 242–254, Iss. 6 (91) pp. 314–319

NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

Iss. 1 (86) pp. 271–272, Iss. 2 (87) pp. 275–276, Iss. 3 (88) pp. 255–256, Iss. 4 (89) pp. 262–264, Iss. 5 (90) pp. 255–256, Iss. 6 (91) pp. 320–322