

ТРАНСПОРТ

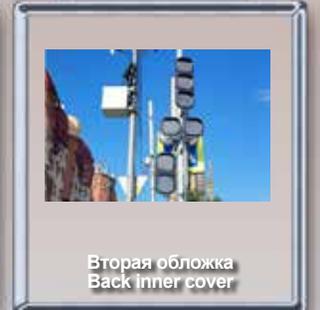
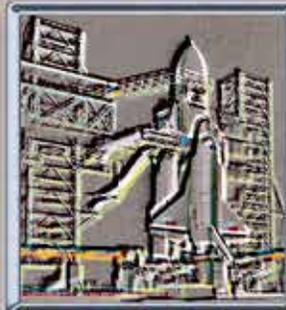
WORLD OF TRANSPORT
AND TRANSPORTATION

3 2024
Том / Vol. 22



**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ –
НА ПУТИ КО ВСЕ БОЛЕЕ ДОСТУПНОМУ
И ЭФФЕКТИВНОМУ ГОРОДСКОМУ ТРАНСПОРТУ**

**INTELLIGENT SYSTEMS – ON THE WAY
TO BETTER AVAILABILITY AND EFFICIENCY
OF URBAN TRANSPORT**



Вторая обложка
Back inner cover



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГОРОДОВ

В российских регионах в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги» продолжается внедрение и развитие интеллектуальных транспортных систем. Сегодня эти мероприятия реализуются в 56 субъектах страны и 62 городских агломерациях в их составе.

«Число городских агломераций, участвующих в реализации программы по внедрению интеллектуальных транспортных систем, растет. Если в прошлом году их было 57 в 51 субъекте страны, то в этом уже 62 в 56 регионах. Кроме того, 18 городских агломераций достигли первого из шести уровней зрелости ИТС, из них Красноярская и Тюменская – второго», – сообщил Министр транспорта Роман Старовойт.

Он также напомнил, что «умные» системы внедряются в городских агломерациях с населением свыше 300 тыс. человек начиная с 2020 года. «Создание интеллектуальной транспортной системы позволит оптимизировать движение общественного транспорта, благодаря чему повысится средняя скорость

движения автомобилей, увеличится пропускная способность городских магистралей, уменьшится количество заторов. И, конечно же, повысится безопасность всех участников дорожного движения. В этом году впервые в рамках нацпроекта ИТС начали внедрять в Республике Северная Осетия – Алания, Приморском крае, Смоленской и Курганской областях, а также в Севастополе», – отметил глава Минтранса.

Программа по внедрению «умных» систем реализуется в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства», который входит в нацпроект. На эти цели предусмотрены средства из федерального бюджета.

Внедрение различных модулей и подсистем помогает собирать, доставлять, хранить, анализировать и визуализировать информацию, полученную от комплексов фотовидеофиксации, детекторов транспорта, установленных на улично-дорожной сети. На основании этих данных система будет предлагать решения по оптимизации управления транспортными потоками. ●

ТТ ММ ТРАНСПОРТА

3 2024
(112)

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

Издается
Российским университетом
транспорта.
Учрежден МИИТ в 2003 году
Редакционный совет:
И. Н. Розенберг – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, научный руководитель РУТ (МИИТ), председатель совета
А. К. Головнич – доктор технических наук, доцент Белорусского государственного университета транспорта
А. Д. Гвишиани – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
А. А. Горбунов – доктор политических наук, профессор РУТ
Б. В. Гусев – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Н. А. Духно – доктор юридических наук, профессор РУТ
Д. Г. Евсеев – доктор технических наук, профессор РУТ
Н. С. Касимов – доктор географических наук, профессор, академик РАН
В. И. Колесников – академик РАН, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения
К. Л. Комаров – доктор технических наук, профессор Сибирского государственного университета путей сообщения
Б. М. Куанышев – доктор технических наук, профессор, заместитель председателя КАЗПРОФТРАНС (Республика Казахстан)
Б. М. Лапидус – доктор экономических наук, профессор
Г. Г. Матишов – доктор географических наук, профессор, академик РАН
Д. А. Мачерет – доктор экономических наук, профессор РУТ, первый заместитель председателя Объединённого учёного совета ОАО «РЖД»
Л. Б. Миротин – доктор технических наук, профессор Московского автомобильного государственного технического университета (МАДИ)
К. А. Пашков – доктор медицинских наук, профессор РАН, профессор Московского государственного медико-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова
А. В. Сладковски – доктор технических наук, профессор Силезского технологического университета (Республика Польша)
С. С. Соколов – доктор технических наук, профессор РУТ
Ю. И. Соколов – доктор экономических наук, профессор РУТ
А. А. Соловьев – доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН
Тран Дак Су – доктор технических наук, профессор Университета транспорта и коммуникаций (Ханой, Вьетнам)
В. Я. Цветков – доктор технических наук, доктор экономических наук
Т. В. Шепитько – доктор технических наук, профессор РУТ

СОДЕРЖАНИЕ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

Станислав КУДЖ, Никита КУРДЮКОВ

Транспортные онтологии 6

Михаил БОЯРЩИНОВ

Особенности использования метода нормированного размаха и фрактального анализа при изучении интенсивности потока автомобильного транспорта 12

Ирина ДУБЧАК

Комплексное пространство цифровой железной дороги 22

НАУКА И ТЕХНИКА

*Ольга ПОДДАЕВА, Алексей ЛОКТЕВ,
Павел ЧУРИН, Анастасия ФЕДОСОВА*

Влияние трафика на аэродинамическую устойчивость большепролетных мостов 28

ВИН Ко Мьинт Ту

Особенности визуального программирования для проектирования мостовых сооружений на основе информационного и параметрического моделирования 39

*Павел ГРИГОРЬЕВ, Сергей КОРЖИН,
Шерзод ИБОДУЛЛОЕВ*

Влияние жидкого груза на частотные характеристики котла вагона-цистерны 45

Роман НИКОЛАЕВ, Ольга ЖДАНОВИЧ

Анализ уровня патентной активности в области гоночных автомобилей 52

Александр ОТОКА, Олег ХОЛОДИЛОВ

Повышение эффективности ультразвукового контроля ободьев цельнокатаных колес при ремонте колесных пар вагонов 59

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

*Валерий ХАЙТБАЕВ, Владимир КОСТРОВ,
Евгений ЧЕРНЯЕВ*

Ресурсосберегающий подход к организации доставки грузов в региональных цепях поставок 68

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

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

РЕДАКЦИЯ

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

При перепечатке ссылка на журнал «Мир транспорта» обязательна.

© «Мир транспорта», 2024

Екатерина КУЛИКОВА, Павел МИНАКОВ

Методика определения рационального порядка использования маневровых локомотивов на пассажирской станции 80

Петр СМИРНОВ, Борис СУББОТИН, Олег ПИКАЛЕВ

Методика выбора дорожно-строительной техники в условиях недостатка информации 92

ОБРАЗОВАНИЕ И КАДРЫ

Владимир ПАНКОВ, Ольга ФЕДОРОВА

Проект образовательной программы синхронизированного обучения специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» 102

Виктория ФИЛОНЕНКО, Вера ТЕНИЦЕВА, Анна ПОПОВА

Развитие иноязычной коммуникативной компетенции моряков с применением тренажеров 115

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Дмитрий МАЧЕРЕТ

Роль транспортных средств в древнейшей евразийской интеграции 124

Пресс-архив

К обзору печати «Протяжение и срок постройки необходимых железных дорог» (публикация 1912 года в журнале «Железнодорожное дело») 130

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Авторефераты диссертаций 138

Новые книги о транспорте 142

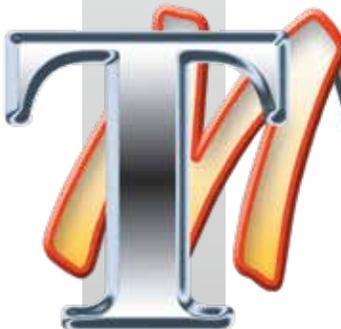
Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 20 декабря 2002 г. Регистрационный номер ПИ № 77-14165.

Журнал выходит 6 раз в год. Номер подписан в печать 10.09.2024. Тираж 150 экз. Цена свободная.

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

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

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



World of Transport and Transportation

•THEORY
•HISTORY
•ENGINEERING
OF THE FUTURE

Vol. 22²⁰²⁴
Iss. 3

The journal is published
by Russian University
of Transport.

Founded in 2003 by MIIT.

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CONTENTS

Page numbering below refers to the texts in English

THEORY

- Stanislav A. KUDZH, Nikita S. KURDYUKOV*
Transport and Transportation Ontologies 144
- Mikhail G. BOYARSHINOV*
Features of Using the Method of Normalised Range and Fractal Analysis in Studying the Car Traffic Flow Intensity 149
- Irina A. DUBCHAK*
Integrated Digital Railway Space 160

SCIENCE AND ENGINEERING

- Olga I. PODDAEVA, Alexey A. LOKTEV, Pavel S. CHURIN, Anastasia N. FEDOSOVA*
The Impact of Traffic on the Aerodynamic Stability of Long-Span Bridges 166
- WIN Ko Myint Thu*
Features of Visual Programming for Designing Bridge Structures Based on Information and Parametric Modelling 177
- Pavel S. GRIGOREV, Sergey N. KORZHIN, Sherzod R. IBODULLOEV*
Study of Liquid Cargo Influence on Frequency Characteristics of Tank Wagon Boiler Shell 183
- Roman S. NIKOLAEV, Olga A. ZHDANOVICH*
Analysis of the Patent Activity in the Field of Racing Cars 190
- Alexander G. OTOKA, Oleg V. KHOLODILOV*
Improving the Efficiency of Ultrasonic Testing of Solid-Rolled Wheel Rims During Repair of Car Wheelsets 197

MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS

- Valery A. KHAITBAEV, Vladimir N. KOSTROV, Evgeny V. CHERNIAEV*
Resource-Saving Approach to Cargo Delivery in Regional Supply Chains 206

EDITORIAL BOARD

Igor N. Rozenberg, Editor-in-Chief

Evgeny Yu. Zarechkin, Deputy Editor-in-Chief

BOARD MEMBERS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Alla K. Shelikhova, head of Editorial office

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

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

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

Vladimir B. Zyl'ov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Ekaterina B. KULIKOVA, Pavel A. MINAKOV

Methodology for Determining the Rational Order of Using Shunting Locomotives at a Passenger Station 218

Petr I. SMIRNOV, Boris S. SUBBOTIN, Oleg N. PIKALEV

Methodology for Selecting Road Construction Equipment in Conditions of Insufficient Information 229

EDUCATION AND HRM

Vladimir Yu. PANKOV, Olga A. FEDOROVA

Project of an Educational Program for Synchronised Training in the Specialty «Roads and Aerodromes» 238

Victoria A. FILONENKO, Vera F. TENISHCHEVA, Anna V. POPOVA

Development of Seafarers' Foreign Language Communicative Competence Using Simulators 249

HISTORY WHEEL

Dmitry A. MACHERET

The Role of Transport Vehicles in Ancient Eurasian Integration 258

Archival publication

On the press review. «Extent and duration of construction of indispensable railways» (publication of 1912 in the Rail Business [Zheleznodorozhnoe Delo] Journal) 263

BIBLIO-DIRECTIONS

Selected Abstracts of D.Sc. and Ph.D. Theses Submitted at Russian Transport Universities 270

New Books on Transport and Transportation 272

Published quarterly since 2003. Bimonthly since 2013.

112 issues have been published since 2003.

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

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

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

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

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

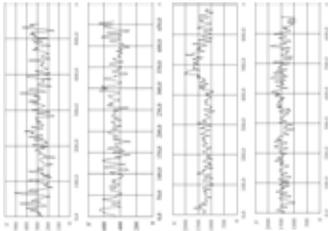
Any reproduction in whole or in part on any medium or use of English translation of the articles contained herein is prohibited for commercial use without the prior written consent of World of Transport and Transportation.

Т

ТРАНСПОРТНЫЕ ОНТОЛОГИИ

6

От формирования транспортных онтологий и преодоления онтологической информационной неопределенности к онтологическому управлению.

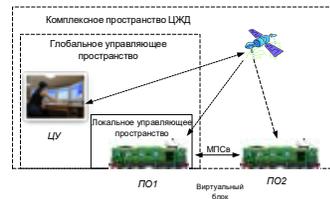


ОПТИМИЗАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

12

Методы нормированного размаха и фрактального анализа при оценке мониторинговых данных и прогнозировании городских транспортных потоков.

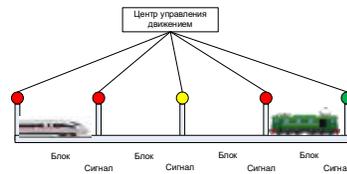
ВОПРОСЫ ТЕОРИИ



ЦИФРОВАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА

22

Комплексное пространство цифровой железной дороги в отношении с информационным, геопространственным, координационным пространством: многофункциональность и связанность.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.001.57

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-1>

Транспортные онтологии



Станислав КУДЖ



Никита КУРДЮКОВ

**Станислав Алексеевич Кудж¹,
Никита Сергеевич Курдюков²**

^{1,2} *Российский технологический университет (РТУ МПРЭА), Москва, Россия.*

¹ *ORCID 0000-0003-1407-2788; Web of Science Researcher ID: AAG-1319-2019; Scopus Author ID: 56521711400; РИНЦ SPIN-код: 8173-1572; РИНЦ Author ID: 723257.*

² *ORCID 0000-0001-6784-3369; Web of Science Researcher ID: KCY-1854-2024; РИНЦ SPIN-код: 8535-1612; РИНЦ Author ID: 1236094.*

✉ ¹ rektor@mirea.ru.

✉ ² nskurdyukov@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

Цель описываемой в статье работы состоит в анализе особенностей применения онтологий в транспортной сфере. Изучены методы построения онтологий, информационная неопределенность, препятствующая образованию онтологий. Введены термины «транспортная онтология», «онтологическое управление», «онтологическая информационная неопределенность».

Основными методами исследования являлись системный, онтологический, качественный и сравнительный анализ.

С учетом того, что применение онтологий для управления транспортом практикуется последние двадцать лет, накопленный в этой сфере опыт, развитие онтологий и современное технологическое состояние транспортной инфраструктуры дают основание ввести понятия «транспортная онтология» и «онтологическое управление». Основанные на них подходы имеют критически важное значение для дальнейшего развития транспортной системы, цифрового транспорта, эффективного управления объектами транспортной инфраструктуры. Предложен краткий анализ

применения онтологий в транспортной сфере, в том числе построения прикладных онтологий, к числу которых относятся и транспортная онтология.

Подчеркнуто значение семантических отношений для формирования прикладных онтологий. Описаны проблемы интеграции информации и обосновано применение онтологических информационных единиц для формирования онтологий. Констатируется, что в силу отсутствия общего метода построения онтологий в настоящее время в транспортной сфере преобладают частные онтологии, основные из которых перечислены в статье. Отмечен метод применения маркировки для построения онтологий и описано применение графовых баз данных для моделирования семантики, при этом показано, что препятствиями для формирования онтологий являются многообразие информационных систем и большое количество фактических данных, применяемых в современном управлении транспортом, которое объективно содержит информационную неопределенность. В этом контексте описаны типы неопределенности и методы их устранения.

Ключевые слова: транспорт, управление, интеграция информации, связанные геоаннотации, атрибутивная информационная неопределенность, семантическая сеть терминов, транспортная онтология, онтологические информационные единицы, онтологическое управление.

Для цитирования: Кудж С. А., Курдюков Н. С. Транспортные онтологии // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-1>.

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

ВВЕДЕНИЕ

В современном управлении транспортом возрастает роль знаний, что особенно характерно для интеллектуального и беспилотного транспорта [1]. Это влечет за собой повышение значимости онтологий, которые целесообразно рассматривать в качестве «транспортных онтологий» как разновидности прикладных онтологий, служащих основой интеллектуального и кибер-физического управления [2]. В технологическом аспекте они служат основой формирования решений на основе опыта, в связи с чем можно ввести понятие «онтологический опыт». Особенностью онтологического опыта является сокращение числа рассматриваемых вариантов при принятии решений в сложных ситуациях и в условиях большого объема данных [3; 4]. Для сжатия информации при решении управленческих задач применяют модельно-стереотипный подход, состоящий в применении стереотипов моделей, которые содержат обобщенный опыт управления в конкретных ситуациях. Для мобильных объектов характерно управление с применением динамических пространственно-временных моделей [5]. Применение стереотипов моделей требует конкретной информации о ситуации управления и состоянии объекта. В отличие от стереотипов моделей, метамодели содержат обобщения опыта управления безотносительно к конкретной ситуации. Они обобщают управление в типологической группе ситуаций и для их формирования необходимо изучение групп ситуаций. Таким образом, можно резюмировать, что метамодели обобщают теоретический опыт, а стереотипы моделей используют практический опыт. Метамодели позволяют совершить переход к онтологиям, которые содержат знание.

Цель работы состоит в исследовании особенностей применения и построения онтологий в транспортной сфере, в том числе аспектов информационной неопределенности, препятствующей их формированию.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Транспортные онтологии можно определить как «онтологии, обобщающие опыт в сфере управления транспортом, включая стационарные объекты».

Фактически в настоящее время управление транспортом с использованием онтологического и архитектурного подходов для обеспечения надежности грузоперевозок [6] решается с применением именно транспортных онтологий. Особенностью транспортной онтологии является то, что она использует имеющееся знание, помогает решать управленческие задачи и создает новое пространственное знание [7]. К числу частных транспортных онтологий можно отнести онтологии транспортных сетей [8], которые формируются как обобщение файлов геоданных. Также можно отметить частную онтологию транспортных сбоев [9], которая предоставляет формальную структуру для моделирования событий, связанных с планированием поездок.

Развитие применения онтологий

Изначальные идеи применения онтологии связывают с философией античного мира. С помощью онтологий и системы онтологий пытались описать существующий мировой порядок [10]. В современных условиях разработка онтологической модели предприятия на начальном этапе требует формировать глоссарий терминов и понятий, определяющих предметную область деятельности конкретного предприятия [11], при этом термин «предприятие» можно заменить на другой объект, например «киберпространство» или «транспортная инфраструктура», сущность построения онтологии от этого не изменится.

Онтологический глоссарий можно рассмотреть как систематизированную совокупность онтологических информационных единиц. Онтологические информационные единицы транспортной онтологии соответствуют объектам реального мира, в числе которых индивиды, здания, транспортные средства, железнодорожные пути и прочее. По возможности в данный глос-





сарий как основу онтологии следует включать понятия, связанные с функционированием транспортной инфраструктуры, транспортных систем, включая технические, организационные, экономические, управленческие, информационные [12] и даже киберпространственные. На втором этапе формирование онтологий требует описания или составления моделей сущностей, сформированных из этих понятий, между которыми должны существовать семантические отношения. В настоящее время для формирования семантических отношений предлагается использовать онтологический подход [6].

Прикладная онтология или онтология предметной области может быть рассмотрена как технология обобщения семантической паутины и технология обобщения связанных данных, позволяющая оптимизировать их общее или повторное использование.

Это в полной мере применимо к ситуациям и управленческим решениям в транспортной сфере. Благодаря цифровой трансформации информация о сущностях, связанных с управлением транспортной инфраструктурой, теперь может собираться автоматически. С понятием «сущности» связано понятие «онтологии». то есть транспортные онтологии могут представлять знания предметной области транспорта и могут использовать информацию для цифрового управления [13]. Транспортные онтологии как вид прикладных онтологий являются общими представлениями знаний о сфере транспорта, которые определяют термины и отношения между ними, при этом для них характерна специфика, которая заключается в необходимости формирования информации в реальном времени [14].

Использование онтологии для решения проблемы любого управления основано на интеграции информации, которая осуществляется через различные частные схемы и контексты, поскольку в настоящее время отсутствует общая методика [13]. Основной проблемой интеграции информации для получения онтологий является гетерогенность исходных информационных массивов, что обусловлено тем, что транспорт-

ная информация собирается разными устройствами, датчиками и системами и в процессах применения разных технологий. Одна из идей [6] интеграции основана на том, что она должна строиться с опорой на стандартные информационные модели и информационные конструкции. Это влечет необходимость стандартизации информационных моделей и, в итоге, приводит к идее стандартизованных информационных единиц или онтологических информационных единиц. В рамках онтологии онтологические информационные единицы, образующие сущность предприятия, определяются на основе бизнес-терминов. Это еще раз подчеркивает значимость бизнес-гlossария для формирования онтологий.

Онтологии характеризует высокий уровень обобщения. В силу этого онтологии являются общими по своему формированию. Онтология как модель является новой в своем представлении однозначной формализованной информационной структурой. Что касается транспортной онтологии, то она служит основой для структурирования и интеграции данных и информации для построения целостной управленческой ситуации, в которой находится подвижный объект. Набор онтологий в цифровой форме может служить инструментом для разработки приложений для управления, основой которых являются сетевые модели: семантическая сеть терминов и связанные данные. Онтологии, разработанные на основе сетевых моделей, полезны для специалистов технологического и стратегического управления, а также для академических исследователей, работающих в области транспорта, где существует проблема формирования систематики методов интеграции информации для построения онтологий.

Для создания онтологий, в том числе решения задач организации семантики в условиях необходимости работы с большими данными, в настоящее время применяют методы искусственного интеллекта [3] и графовые базы данных (ГБД), которые позволяют обобщать и сжимать информацию, выделяя сущности, эффективно опи-

сывать и обрабатывать данные, в том числе геоданные [3].

Для формирования онтологий также используется технология, именуемая «маркировкой информации», которая включает процессы дополнения дескриптивной информации эмпирической: наборами изображений, измерениями, полученными от датчиков. Маркировка широко применяется в сетях Петри и служит инструментом анализа процессов, что позволило предложить на основе данного метода подход к созданию глобальной онтологии (AGO) для автотранспорта [3], включающий в том числе создание графовых баз данных для моделирования семантики в автотранспортной области.

Проблема информационных систем

Наличие большого числа информационных систем в транспортной сфере не является само по себе гарантией эффективного управления транспортом. Опыт внедрения разных систем показывает, что их ценность для транспортного бизнеса часто оказывается ниже ожидаемой, а в некоторых проектах корреляция эффективности деятельности транспортных компаний с процессами внедрения информационных систем [6] прослеживается преимущественно на уровне оптимизации документооборота, учетных операций и снижения соответствующих им затрат. Одним из выводов из анализа сложившейся практики является то, что в стратегическом плане рост эффективности управления и деятельности транспортных компаний и их конкурентоспособности зависит в первую очередь от обеспечения согласованности функционирования внедряемых информационных систем, а в идеале – от появления синергетического эффекта от их совместного применения. Во многом это обусловило то, что в последние годы базовой концепцией формирования единого информационного управленческого пространства предприятий и объектов транспорта стала являться архитектура предприятия.

При этом со временем выяснилось, что оптимального построения одной архитек-

туры недостаточно для функционирования транспортного предприятия. Необходимо дополнительно разрабатывать методы комплексного поведения всех частей и элементов архитектуры. Для этого необходимо использовать информацию об их сущностях, что неизбежно приводит к необходимости использования понятийного аппарата онтологии и согласованного применения онтологического и архитектурного подходов.

Особенностью транспортной системы является и то, что многообразие информационных систем приводит к многообразию форматов и типов данных. Большое количество фактической информации, применяемой в современном управлении транспортом, объективно содержит информационную неопределенность [15], которая становится препятствием для построения онтологий и должна быть устранена.

Информационная неопределенность имеет разные причины, которые можно связать с определенным атрибутом и определить такую неопределенность как атрибутивную информационную неопределенность.

Например, неопределенность по информационному объему обусловлена трудностями анализа больших объемов информации и замены полного анализа на фрагментарный.

Существует неопределенность по разнообразию типов информации, обусловленная многообразием типов информационных моделей и отсутствием опыта работы с новыми типами. Как следствие, новые типы или модели заменяют на старые, что приводит к получению неадекватных результатов. Такой тип неопределенности характерен для многоаспектных электронных атласов [16], которые можно рассматривать как графические онтологические глоссарии, если они систематизированы и в них согласованы пространственные и терминологические отношения.

Существует неопределенность по нечеткости информации, детерминированная объективной ситуацией сочетания количественных и качественных данных, которые частично являются нечеткими. Без теории





нечетких множеств такую информацию обрабатывать нельзя.

Также можно отметить неопределенность по противоречивой информации [17], определяемую наличием в исходном контенте явной противоречивой информации и неявной противоречивой информации. Для устранения этих противоречий необходим дополнительный анализ.

Вероятно возникновение неопределенности по времени, которая обусловлена тем, что для принятия решений выделен небольшой промежуток времени, за который невозможно провести полный анализ всего информационного массива.

Для уменьшения неопределенности требуется применение онтологий и специального моделирования [18]. Онтологии и вероятностные меры также необходимо применять при наличии нечеткой или вероятностной информации [19]. Устранение информационной неопределенности по противоречию требует отхода от формальных логических рассуждений и перехода к схемам рассуждений, допускающим противоречия. Все эти схемы входят в преобработку построения онтологий. Уменьшение информационной неопределенности также выполняют методами систематизации, классификации и семантического анализа. В качестве первичного метода применяют кластеризацию гетерогенной информации [20].

Большое значение устранение информационной неопределенности имеет при управлении беспилотным транспортом, цифровой железной дорогой [21], в транспортных киберфизических системах [2; 22].

Устранение неопределенности необходимо для технологического управления непосредственно и как предварительный этап построения онтологий, использование которых позволяет говорить об «онтологическом управлении».

Выводы

Накопленный опыт в управлении транспортом, формировании онтологий и современный технологический уклад дают основания для использования понятийного

и методологического аппарата, основанного на «транспортной онтологии» и «онтологическом управлении», без которого невозможно развитие эффективной транспортной системы, современного управления объектами транспортной инфраструктуры.

При этом, однако, пока не создана единая общая онтология, которая бы адекватно описывала перевозки грузов. Эта проблема обусловлена отношением между частным и общим, необходимостью решения проблем интеграции транспортной информации из разнородных источников, что повышает актуальность исследований в этой области.

Опыт показывает, что формирование транспортной онтологии следует выполнять в два этапа. Первый этап в простом варианте включает составление онтологического глоссария. В системном варианте первый этап включает создание системы онтологических информационных единиц, которая имеет более связанные терминологические отношения. На втором этапе создания транспортной онтологии необходимо создать семантическую сеть, которая будет служить основой онтологии. При создании такой сети целесообразно в дополнение к ней использовать графовую базу данных.

Отдельного внимания требует проблема многообразия информационных систем в управлении транспортом, часто затрудняющая управление и формирование онтологий. Такое многообразие создает информационную неопределенность, имеющую разные причины и соответственно разные виды, из множества которых можно выделить группу видов информационных неопределенностей, которые препятствуют нормальному построению онтологий и онтологическому управлению, и которую можно назвать «онтологической неопределенностью». Устранение такой онтологической неопределенности является обязательным этапом преобработки информации при формировании онтологий.

В целом, с позиций информационного управления, онтология можно рассматривать как метод сжатия информации и устранения противоречий в системе управления.

Предлагаемые к рассмотрению подходы к оценке роли транспортных онтологий и их формированию являются принципиальными составляющими комплексной научной проблемы и предполагают системные междисциплинарные исследования множества ее взаимосвязанных аспектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dolgy, A. I., Rozenberg, I. N., Tsvetkov, V. Ya. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation. In: Proceedings of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering: MIP: Engineering-III – 2021, 29–30 April 2021, Krasnoyarsk, Russian Federation. AIP Conference Procurements, 2021, Vol. 2402, Iss. 1, 050059. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0074851>.
2. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 138–145. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-2-13>.
3. Urbiet, I., Nieto, M., García, M., Otaegui, O. Design and Implementation of an Ontology for Semantic Labeling and Testing: Automotive Global Ontology (AGO). Applied Sciences, 2021, Vol. 11, Iss. 17, 7782. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11177782>.
4. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Информационные процессы в пространстве «больших данных» // Мир транспорта. 2017. – Т. 15. – № 6 (73). – С. 20–30. EDN: YTBSCN. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2017-15-6-2>.
5. Розенберг И. Н., Цветков В. Я. Создание динамической пространственно-временной модели управления железной дорогой // Геодезия и картография. – 2010. – № 71 (8). – С. 48–51. EDN: SNGVHJ.
6. Dorofeev, A., Altukhova, N., Filippova, N., Pashkova, T., Ponomarev, M. Development of transportation management system with the use of ontological and architectural approaches to ensure trucking reliability. Sustainability, 2020, Vol. 12, Iss. 20, 8504. DOI: [10.3390/su12208504](https://doi.org/10.3390/su12208504).
7. Розенберг И. Н., Вознесенская М. Е. Геоанализ и геореференция // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Естественные науки». – 2010. – № 2. – С. 116–118. [Электронный ресурс]: <https://www.geocosreda.ru/jour/article/view/872/842>. Доступ 13.02.2024.
8. Lorenz, B., Ohlbach, H., Yang, L. Ontology of Transportation Networks. REVERSE Proj. Publ., 2005. [Электронный ресурс]: <https://www.macs.hw.ac.uk/bisel/reverse/deliverables/m18/a1-d4.pdf>. Доступ 13.02.2024.
9. Corsar, D., Markovic, M., Edwards, P., Nelson, J. D. The Transport Disruption Ontology. In: Arenas, M. [et al]. The Semantic Web – ISWC 2015. Lecture Notes in Computer Science, 2015, Vol 9367, Springer, Cham, pp. 329–336. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25010-6_22pp.
10. Dietz, J. L. G. Enterprise Ontology. Springer, Berlin, Germany, 2006, 244 p., pp. 16–83. ISBN 9783540331490.
11. Negri, E., Perotti, S., Fumagalli, L., Marchet, G., Garetti, M. Modelling internal logistics systems through ontologies. Computers in Industry, 2017, Vol. 88, pp. 19–34. DOI: [10.1016/j.compind.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.03.004).
12. Leukel, J., Kirn, S. A Supply Chain Management Approach to Logistics Ontologies in Information Systems. In: Abramowicz, W., Fensel, D. (eds). Business Information Systems. BIS 2008, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. Lecture Notes in Business Information Processing, 2008, Vol. 7, pp. 95–106. DOI: [10.1007/978-3-540-79396-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79396-0_9).
13. Zheng, Y., Törmä, S., Seppänen, O. A shared ontology suite for digital construction workflow. Automation in Construction, 2021, Vol. 132, 103930. DOI: [10.1016/j.autcon.2021.103930](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103930).
14. Belyakov, S., Belyakova, M., Rozenberg, I. Approach to Real-Time Mapping, Using a Fuzzy Information Function. Communications in Computer and Information Science, 2013. Vol. 398, Part I, pp. 510–521. DOI: [10.1007/978-3-642-45025-9_50](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45025-9_50).
15. Цветков В. Я. Информационная неопределенность и определенность в науках об информации // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21. – № 1. – С. 3–7. EDN: TGFRFH.
16. Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A., Kostianoy, A. G., Gvozdk, S. A., Serykh, I. V., Krasnoperov, R. I., Sazonov, N. V., Dubchak, I. A., Popov, A. B., Kostianaia, E. A., Gvozdk, G. A. Electronic Atlas of Climatic Changes in the Western Russian Arctic in 1950–2021 as Geoinformatic Support of Railway Development. Applied Sciences, 2023, Vol. 13, Iss. 9, 5278. DOI: [10.3390/app13095278](https://doi.org/10.3390/app13095278).
17. Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. The contradiction between belief functions: Its description, measurement, and correction based on generalized credal sets. International Journal of Approximate Reasoning, 2019, Vol. 112, pp. 119–139. DOI: [10.1016/j.ijar.2019.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.06.001).
18. Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Modelling uncertainty with generalized credal sets: application to conjunction and decision. International Journal of General Systems, 2017, Vol. 47, Iss. 1, pp. 67–96. DOI: [10.1080/03081079.2017.1391805](https://doi.org/10.1080/03081079.2017.1391805).
19. Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Ranking probability measures by inclusion indices in the case of unknown utility function. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2014, Vol. 13, Iss. 1, pp. 49–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10700-013-9169-6>.
20. Chenhang Cui, Yazhou Ren, Jingyu Pu, Jiawei Li, Xiaorong Pu, Tianyi Wu, Yutao Shi, Lifang He. A Novel Approach for Effective Multi-View Clustering with Information-Theoretic Perspective. Advances in Neural Information Processing Systems, 2023, Vol. 36. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.13989>.
21. Tsvetkov, V. Ya., Shaytura, S. V., Ordov, K. V. Digital management railway. Advances in Economics, Business and Management Research, 2019, Vol. 105. 1st International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019), pp. 181–185. DOI: [10.2991/iscde-19.2019.34](https://doi.org/10.2991/iscde-19.2019.34).
22. Цветков В. Я. Управление с применением киберфизических систем // Перспективы науки и образования. – 2017. – № 3 (27). – С. 55–60. EDN: ZCSISD. ●

Информация об авторах:

Кудж Станислав Алексеевич – доктор технических наук, доцент, ректор Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), Москва, Россия, rektor@mirea.ru.

Курдюков Никита Сергеевич – аспирант кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения (ИППО) института информационных технологий Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), Москва, Россия, nskurdyukov@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 05.08.2024, одобрена после рецензирования 19.08.2024, принята к публикации 21.08.2024.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.1

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-2>

Особенности использования метода нормированного размаха и фрактального анализа при изучении интенсивности потока автомобильного транспорта



Михаил БОЯРШИНОВ

Михаил Геннадьевич Бояршинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.

ORCID 0000-0003-4473-6776; Web of Science Researcher ID: ACE-0166-2022;

Scopus Author ID: 6506008407; ПИНЦ SPIN-код: 5958-2345; ПИНЦ Author ID:

79853; ColabID: R-38610-17352-TA83O; Google Scholar: Y4AT3SUAAAAJ.

✉ mgboyarshinov@pstu.ru.

АННОТАЦИЯ

Актуальность изучения методов исследования транспортных потоков обусловлена необходимостью анализа их особенностей, определения допустимых областей их применения при решении практических задач транспортной отрасли.

Целью настоящей работы является выявление результатов использования современных методов анализа временных рядов, использующих значения интенсивностей потоков автомобильных транспортных средств на городской улично-дорожной сети. Предмет исследования – вычисляемые показатели Хёрста и фрактальной размерности (фрактальный анализ), а также проверка справедливости количественной взаимосвязи этих показателей, указанной Б. Мандельбротом и применяемой в прикладных исследованиях, на реальных данных об интенсивности потоков автомобильного транспорта. Цифровые данные для исследова-

ния получены с использованием стационарных измерительных программно-технических комплексов фото- и видеодетекции «Азимут», размещенных на улично-дорожной сети города.

Исследованием установлено, что при использовании метода нормированного размаха и фрактального анализа встречаются аномальные значения ключевых показателей: показатель Хёрста принимает значения за пределами обычно определяемого диапазона, соотношение между фрактальной размерностью и показателем Хёрста не вполне соответствует известному соотношению Б. Мандельброта. Представляется необходимым глубокое и доскональное исследование результатов, получаемых при применении указанных и, возможно, иных методов изучения интенсивности потоков автомобильного транспорта на улично-дорожной сети.

Ключевые слова: транспортный поток, интенсивность движения автомобилей, показатель Хёрста, фрактальная размерность, городской транспорт.

Для цитирования: Бояршинов М. Г. Особенности использования метода нормированного размаха и фрактального анализа при изучении интенсивности потока автомобильного транспорта // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-2>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность транспортного потока как временной ряд (функция времени), наряду с другими случайными процессами, относится к особому классу элементов функциональных пространств, которые, в отличие от гладких (дифференцируемых) функций, проявляют свойства фрактальности или самоподобия, то есть при многократном изменении масштаба переменных наблюдается воспроизведение структуры функции, уже зафиксированной на предыдущих масштабах [1, С. 36]. Для описания особых (фрактальных) свойств таких функций используется специально определяемое понятие фрактальной или дробной размерности Хаусдорфа – Безиковича [2, С. 22] (Минковского [3, С. 129]).

Фрактальный анализ с успехом применяется для исследования самоподобных стохастических процессов, характерных для сетевых трафиков и данных о солнечных вспышках [4], для исследования и прогнозирования землетрясений [5]. Моделирование [6] мультимодального распределения пористости нефтегазовых месторождений позволило выявить взаимосвязь показателя фрактальности со степенью нефтенасыщенности грунта.

Аналізу фрактальных свойств временных рядов, моделирующих реальные стохастические процессы, посвящена работа [7]. Идентификация временного ряда на основе фрактального анализа с учетом хаотичности предложена в [8]. Классификация стационарных, нестационарных и квазипериодических сигналов разработана автором [9]. В [10; 11] рекомендуется использовать критическое значение фрактальной размерности в качестве индикатора кризисного состояния (катастрофы) рассматриваемой системы. Согласно [12], для оценки структуры и влияния долговременной памяти временного ряда целесообразно использовать значение фрактальной размерности функций, описывающих фазовые превращения в рассматриваемых механических и физических системах.

Фрактальная размерность может использоваться для анализа трендов котировок и в управлении инвестиционными портфелями, при исследовании и выявлении динамики временных рядов показателей финансовой активности [13], для прогнозирования волатильности рынка нефтепродуктов [14] и оценки значимости финансовых активов [15] на основе предположения [16] о фрактальной природе рынка и наличии у рыночных цен истории (долговре-

менной либо кратковременной памяти).

Использование фрактального подхода [17] позволило оптимизировать форму кузова автобуса для уменьшения сопротивления движению, снизить расход топлива. Анализ [18; 19] фрактальных показателей потока автомобилей на городской улично-дорожной сети (УДС), распределения вероятностей и корреляционных характеристик движения транспорта показал, что эмпирические данные о транспортных потоках соответствуют фрактальным показателям и удовлетворительно описываются с их помощью. Исследованием [20] установлено, что появление на дорогах средств автомобильного транспорта в большей степени определяется не пуассоновским (простейшим) процессом, а факторами фрактальной природы. Для классификации транспортных потоков – как следствие их самоподобия и нерегулярности – целесообразно использование гипотезы о «мультифрактальном» характере спектра потока автомобилей [21].

Наряду с анализом фрактальной размерности активно применяется метод нормированного размаха, в основе которого лежит вычисление показателя Хёрста. Индекс Хёрста [22] используется для анализа динамики электроэнцефалографических сигналов пациентов для построения показателя здоровой и аномальной мозговой активности. Количественная оценка [23] морфологических свойств поверхностных структур зубной эмали на основе фрактальной размерности применяется наряду с традиционно определяемым показателем шероховатости поверхности. Анализ интенсивности потока автомобильного транспорта на УДС мегаполиса с использованием современных математических методов (статистический, вейвлет- и Фурье-анализ, показатель Хёрста) изложен в [24–29].

Для большинства временных рядов, порождаемых естественными процессами, прямое (аналитическое) нахождение фрактальной размерности невозможно, поэтому приходится пользоваться специальными алгоритмами [30], показателем Хёрста [1, С. 348] или численными процедурами [31]. Связь между фрактальной размерностью и показателем Хёрста достаточно подробно изучена в работах [1, С. 353; 32–34].

Целью настоящей работы является выявление результатов использования современных методов анализа временных рядов, использующих значения интенсивностей потоков автомобильных транспортных средств на городской



Показатель H Хёрста и фрактальная размерность D функций интенсивности транспортных потоков на участках городской УДС [выполнено автором]

№	Средняя интенсивность N , авт/ч	Показатель H Хёрста	Фрактальная размерность D	Статистика Пирсона χ^2
1	166	0,5392	1,6998	30,6
2	281	0,7330	1,6943	32,5
3	311	0,7612	1,7501	31,6
4	417	0,7433	1,7701	40,9
5	467	-0,0310	1,7259	45,4
6	599	0,0359	1,6414	325,8
7	719	0,0573	1,7081	36,7
8	830	0,0158	1,6928	3634,7
9	956	0,0085	1,6715	39,0
10	975	-0,0520	1,6823	32,0
11	1046	-0,0230	1,6801	56,3
12	1273	0,0200	1,6523	108,0
13	1377	-0,0590	1,6606	31,5
14	1398	0,0313	1,6463	71,5
15	1426	-0,0080	1,7021	31,4

улично-дорожной сети, полученные в ходе эксперимента с помощью измерительных программно-технических комплексов.

**ДААННЫЕ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
ЗА ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ПОТОКА
АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**

При изучении особенностей движения автомобильного транспорта традиционно применяется зависимость от времени интенсивности транспортного потока [35; 36]. Интенсивность $N(t_i)$ потока автомобильного транспорта на рассмотренном в предлагаемом исследовании участке городской УДС (на примере города Пермь) в произвольный момент времени t_i определялась по данным, поступающим от «комплексов измерительных программно-технических» (КИПТ) в режиме реального времени, с использованием выражения:

$$N(t_i) = \frac{n(t_i)}{\Delta}, \quad (1)$$

где $n(t_i)$ – количество автомобилей на входном рубеже, зафиксированных за интервал времени $[t_i - \Delta/2, t_i + \Delta/2]$, $i = \overline{1, m}$;

Δ – выбранный интервал времени;

m – общее количество интервалов наблюдения.

КИПТ серии «Азимут»¹ позволяет распознавать государственный регистрационный знак, измерять скорость автомобиля в зоне контроля,

¹ КИПТ «Азимут 2» Технологии безопасности дорожного движения. – [Электронный ресурс]: <https://tbdd.ru/node/224>. Доступ 11.01.2024.

его среднюю скорость, время движения между рубежами контроля и прочие характеристики.

Для вычисления показателей Хёрста и фрактальных характеристик функций интенсивности потока автомобильного транспорта выбраны 15 улиц города Перми (улица Вавилова, улица Ласьвинская, улица Подлесная, улица Стахановская, Шоссе космонавтов, Южная дамба и другие) с различными значениями средней интенсивности движения транспорта (таблица 1).

На рис. 1 представлены зависимости интенсивностей транспортных потоков от времени, вычисленных согласно (1), при $D = 5$ мин. Продолжительность наблюдения за транспортными потоками варьировалась от 350 до 700 минут, в течение которых интенсивности $N(t)$ автомобильных потоков оставались практически постоянными.

В основе метода нормированного размаха [1, С. 349; 24; 28] лежит аппроксимация безразмерного показателя R/S степенной зависимостью вида at^H , где a – константа, H – показатель Хёрста (константа), t – время. Здесь обозначено:

$$R(M) = \max_{t_i \leq t \leq M} Z(t, M) - \min_{t_i \leq t \leq M} Z(t, M) \quad (2)$$

– размах отклонений –

$$Z(t_i, M) = \sum_{i=1}^M [N(t_i) - \langle N \rangle]$$

случайных значений интенсивности $N(t_i)$ потока автомобильного транспорта от среднего значения

$$\langle N \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N(t_i); \quad (3)$$

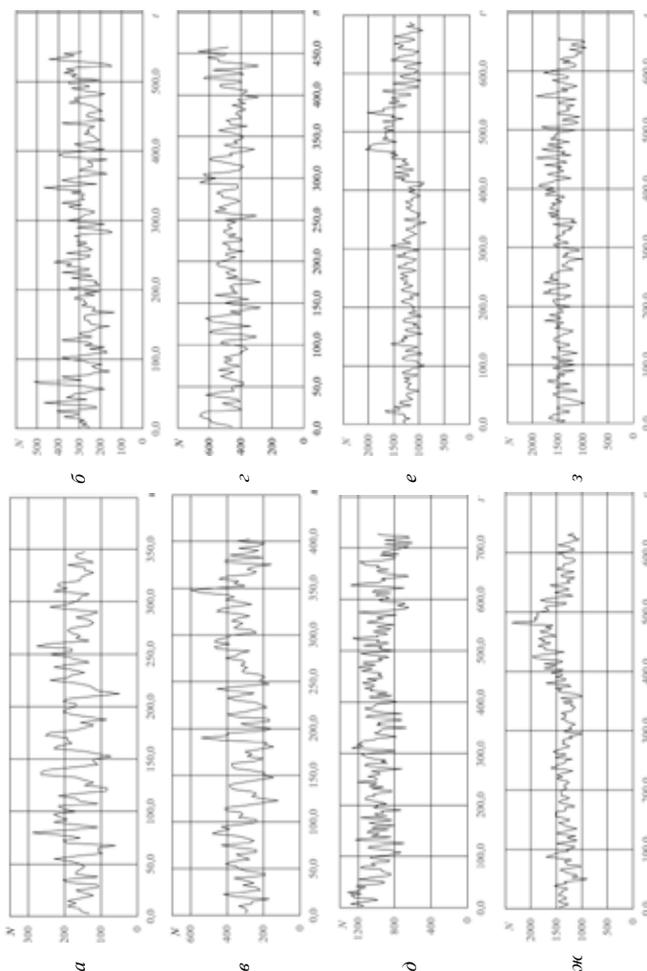


Рис. 1. Интенсивности N (авт/ч) транспортных потоков как функции времени t (мин); средние значения интенсивностей потоков (авт/ч): 166 (а), 281 (б), 311 (в), 467 (г), 975 (д), 1273 (е), 1398 (ж) и 1426 (з) [выполнено автором].

$$S = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [N(t_i) - \langle N \rangle]^2} \quad (4)$$

– среднеквадратичное отклонение интенсивности $N(t_i)$ транспортного потока.

Показатель степени (индекс H Хёрста) функции at^H , аппроксимирующей зависимость R/S , позволяет выделять основные типы поведения временных рядов [1, С. 351; 37]: при $H = 0,5$ значения временного ряда признаются случайными, то есть для слагаемых ряда не проявляется трендовая зависимость; иначе говоря, предыстория появления «ранних» членов ряда не сказывается на значениях последующих;

при $0 \leq H < 0,5$ временной ряд считается «антиперсистентным», что отражает его неустойчивость;

при $0,5 < H \leq 1,0$ наблюдаемый процесс оказывается «персистентным», то есть имеет трендовую составляющую; предыстория

формирования «ранних» слагаемых сказывается на значениях последующих слагаемых временного ряда.

На рис. 2 в логарифмических координатах представлены зависимости функций нормированных размахов R/S от времени t для функций интенсивности $N(t)$ транспортных потоков на рассматриваемых участках дорог согласно соотношениям (2)–(4), а также аппроксимации методом наименьших квадратов этих кривых степенными функциями. Соответствующие значения H показателя Хёрста приведены в таблице 1. Для некоторых временных рядов интенсивностей $N(t_i)$ транспортных потоков значения H показателя Хёрста принимают отрицательные значения, что не предусмотрено классической интерпретацией этого показателя, $0 \leq H \leq 1,0$ [1, С. 349; 37].

Для подсчета фрактальных размерностей исследуемых кривых интенсивностей (1)



транспортных потоков используется метод клеточного покрытия [1, С. 46; 2, С. 197; 3, С. 137], основанный на определении размерности Хаусдорфа – Безиковича.

Предполагается, что на рассматриваемом интервале наблюдения $[t_i, t_m]$ известна функция $N(t)$ с конечным числом разрывов (именно такие функции $N(t_i)$ рассматриваются в качестве временных рядов, получаемых с КИПТ серии «Азимут»). На отрезке $[t_i, t_m]$ вводится сеточная область

$$\omega_m = \{t_i = \delta \cdot i, \quad i = \overline{1, m}\},$$

где $\delta = (t_m - t_i) / m$ – шаг сетки.

Рассматриваемая функция $N(t)$ покрывается квадратными ячейками со стороной δ . При уменьшении размера δ количество клеток m , покрывающих кривую, растет согласно степенному закону [13]:

$$m(\delta) \sim \left(\frac{1}{\delta}\right)^D, \quad (5)$$

показатель степени D определяет размерность Хаусдорфа – Безиковича.

Логарифмирование выражения (5) приводит к соотношению:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln m(\delta)}{\ln(1/\delta)}. \quad (6)$$

Для вычисления фрактальной размерности D плоскость, на которой определена рассматриваемая функция $N(t)$, первоначально покрывается квадратными ячейками размером δ_1 , и подсчитывается количество M_1 ячеек, покрывающих исследуемый график. Затем размер квадратной ячейки уменьшается до величины δ_2 , подсчитывается количество M_2 ячеек, покрывающих исследуемый график ячейками размером δ_2 , и так далее.

Для практических расчетов вместо количества m ячеек, покрывающих исследуемый график, удобно использовать длину измеряемой кривой $L(\delta) = m\delta$. В этом случае выражение (5) приводится к виду:

$$L(\delta) = \delta m(\delta) \sim \delta \left(\frac{1}{\delta}\right)^D = \left(\frac{1}{\delta}\right)^{D-1}. \quad (7)$$

Полученная эмпирическая зависимость $L(\delta)$ аппроксимируется методом наименьших квадратов степенной функцией:

$$L(\delta) \approx a(1/\delta)^d. \quad (8)$$

Из сравнения (7) и (8) следует, что фрактальная размерность D определяется значением показателя степени d аппроксимирующей функции:

$$D = 1 + d. \quad (9)$$

На рис. 3 показаны зависимости длины L функций $N(t)$ интенсивности транспортных

потоков на рассматриваемых участках дорог от величины $1/\delta$ (в логарифмических координатах), определенные согласно алгоритму метода клеточного покрытия, а также аппроксимации методом наименьших квадратов этих кривых степенными функциями.

В монографии [1, С. 353] Б. Мандельбротом предложено соотношение между индексом (показателем) H Хёрста и фрактальной размерностью D :

$$D = 2 - H, \quad (10)$$

которое активно используется исследователями для вычисления индекса H по известному значению D и, наоборот, для определения размерности D по найденному значению индексу H . Использование соотношения (10) встречается в теоретических исследованиях [30; 34; 38], в публикациях по экономике [11; 15; 16; 39], физике [12], медицине [23], сетевым технологиям [41–44], отраслевому развитию [45–47], транспортным задачам [20; 48] и другим дисциплинам. Исследованию соотношения (10) на большом количестве экспериментальных данных посвящена монография [32], в которой отмечается наличие определенного несоответствия этого соотношения результатам натуральных измерений.

Наличие данных о реальных интенсивностях транспортных потоков в результате сбора информации от КИПТ, установленных на дорожной сети города Перми, позволяет дополнительно изучить вопрос соответствия соотношения (10) результатам натуральных измерений. Для этого на выбранных участках улично-дорожной сети (таблица 1) с различной интенсивностью движения потока автомобилей вычислены показатели H Хёрста и фрактальной размерности D .

На рис. 4 приведены зависимости показателей H Хёрста (рис. 4, а) и фрактальных размерностей D (рис. 4, б), а также суммы $D + H$ (рис. 4, в) от средних интенсивностей N потоков автомобильных транспортных средств.

При значениях средней интенсивности $\langle N \rangle$ транспортного потока менее 420 авт/ч показатель Хёрста принимает значения от 0,54 до 0,76, что характеризует временную зависимость интенсивности транспортных потоков как персистентную, характерную для естественных процессов [37].

При средней интенсивности $\langle N \rangle$ транспортного потока более 420 авт/ч показатель

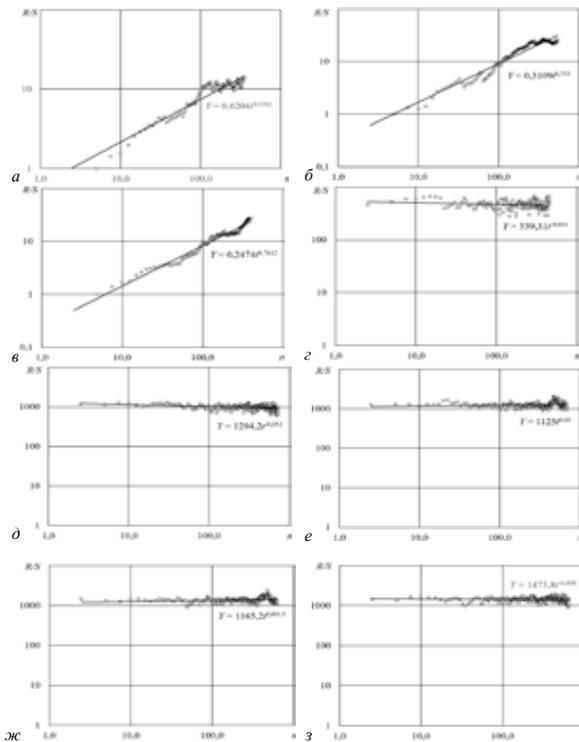


Рис. 2. Зависимости показателей нормированного размаха R/S функций $N(t)$ интенсивности транспортных потоков от времени t (мин, логарифмические координаты); средние значения интенсивности N потоков: 166 (а), 281 (б), 311 (в), 467 (г), 975 (д), 1273 (е), 1398 (ж) и 1426 (з) [выполнено автором].

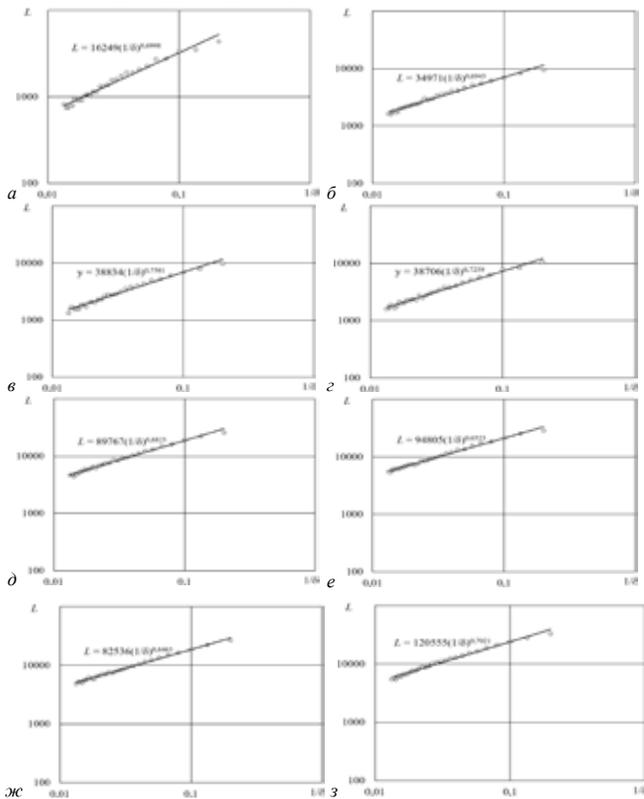


Рис. 3. Зависимости длины L функций $N(t)$ интенсивности транспортных потоков от величины $1/\delta$ (мин $^{-1}$, логарифмические координаты $\ln(1/\delta)$ и $\ln L(\delta)$); средние интенсивности N потоков: 166 (а), 281 (б), 311 (в), 467 (г), 975 (д), 1273 (е), 1398 (ж) и 1426 (з) [выполнено автором].



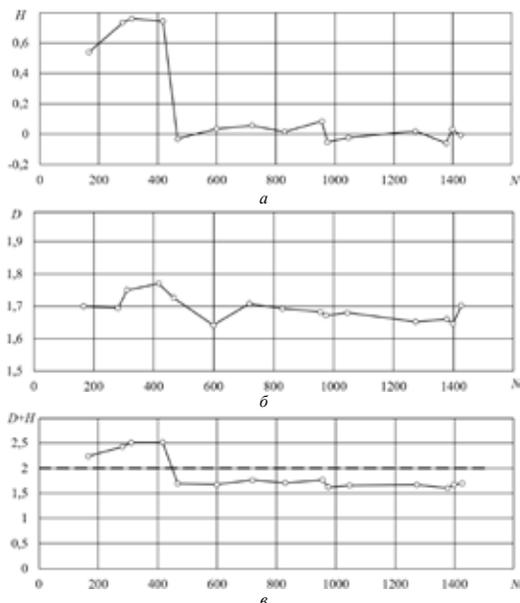


Рис. 4. Зависимости показателя Хёрста H (а), фрактальной размерности D (б) и суммы $D + H$ (в) от среднего значения N (авт/ч) интенсивности транспортных потоков [выполнено автором].

Хёрста падает до минимальных, в том числе отрицательных значений (см. данные в таблице 1, рис. 2, з, д), характеризующих временную зависимость интенсивности транспортных потоков как антиперсистентную, то есть как хаотичную. Следует отметить, что при вычислительной обработке данных натуральных наблюдений получены отрицательные значения показателя Хёрста (рис. 2, з, д, з; 4, а; таблица 1). Это противоречит утверждению, содержащемуся в некоторых из перечисленных выше публикаций, что показатель Хёрста не может принимать отрицательные значения.

Фрактальная размерность D временных рядов (рис. 4, б) мало зависит от средней интенсивности $\langle N \rangle$ транспортного потока и изменяется в пределах от 1,65 до 1,77.

Сумма $D + H$ (рис. 4, в) при $\langle N \rangle < 420$ авт/ч превышает значение 2, предсказываемое соотношением (10); при $\langle N \rangle > 420$ авт/ч сумма $D + H$ оказывается меньше ожидаемого значения. Относительное отклонение суммарного значения $D + H$ от значения 2 достигает 25,7 %.

В монографии [1, С. 350] Б. Мандельброт указывает, что соотношение (9) получено в предположении, что изучаемый случайный процесс должен соответствовать гауссовскому (нормальному) распределению вероятностей. На рис. 5 представлены данные о распределении теоретических и эмпирических распределений плотностей p вероятностей интенсивностей N потоков автомобильного транспорта на УДС города Перми.

В таблице 1 приведены числовые значения статистик критерия χ^2 Пирсона для всех рассмотренных участков дорог. Критическое значение критерия Пирсона для уровня значимости 0,95 составляет 30,1, которое меньше всех приведенных в таблице 1 значений критерия χ^2 для представленных в настоящем исследовании функций $N(t_i)$ интенсивности потоков автомобильного транспорта.

Следует признать, что во всех рассмотренных случаях распределение вероятностей значений временных рядов интенсивностей $N(t_i)$ транспортных потоков нельзя считать гауссовским (нормальным). Этим, по-видимому, объясняется несоответствие соотношения (10), установленного Б. Мандельбротом, результатам натуральных наблюдений (рис. 4, в).

Становится очевидным, что перед использованием соотношения (10) следует убедиться в гауссовском (или близком к таковому) распределении вероятностей слагаемых изучаемого временного ряда. В противном случае ошибка при использовании формулы (10) может быть значительной.

ВЫВОДЫ

Обработка данных от КИПТ позволяет получать достоверную и содержательную информацию о транспортных потоках налично-дорожной сети современного города в режиме реального времени.

Анализ получаемых от КИПТ данных об интенсивности транспортных выявил ано-

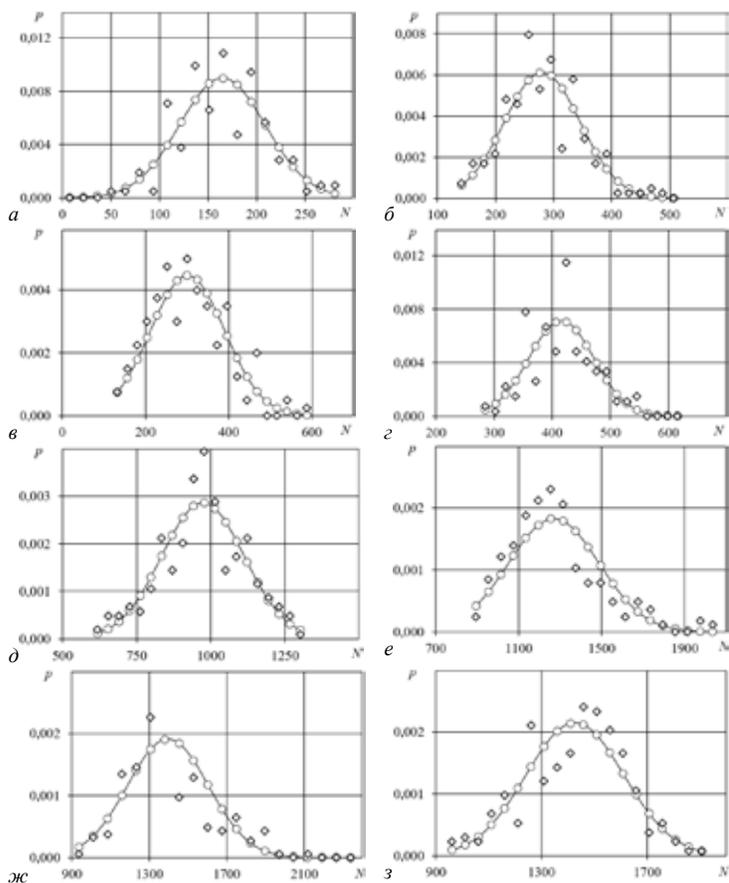


Рис. 5. Гауссовские (—○) и эмпирические (—◇) распределения плотностей p вероятностей интенсивностей N транспортных потоков; значения средних интенсивностей N потоков автомобильного транспорта (авт/ч): 166 (а), 281 (б), 311 (в), 467 (г), 975 (д), 1273 (е), 1398 (ж) и 1426 (з) [выполнено автором].

малии в значениях показателя Хёрста при использовании метода нормированного размаха. Традиционно считается, что показатель Хёрста, являющийся критерием устойчивости или неустойчивости тенденций эволюции временного ряда, лежит в диапазоне от 0 до 1, тогда как при вычислении этого показателя для функций интенсивности транспортных потоков в настоящем исследовании получены значения, выходящие за пределы указанного диапазона. Выявлена зависимость показателя Хёрста от среднего значения интенсивности потока транспорта: при небольших значениях средней интенсивности показатель Хёрста превышает 0,5, что соответствует персистентности наблюдаемого процесса; при значениях, превышающих 420 ... 450 авт/ч, этот показатель резко снижается, что является признаком антиперсистентности процесса движения потока автомобильного транспорта, и может принимать отрицательные значения.

Установлено, что традиционно применяемое соотношение Б. Мандельброта, связывающее фрактальную размерность и показатель Хёрста, при выполнении натурных измерений интенсивности потоков автомобильного транспорта нарушается с относительной погрешностью до 25 %. Дополнительное исследование показало, что, возможно, причина такой погрешности заключается в невыполнении условия гауссовского (нормального) распределения вероятностей для полученных временных рядов интенсивностей потоков автомобильного транспорта.

Представляется необходимым в практических исследованиях выполнять проверку соответствия распределения вероятностей слагаемых временных рядов гауссовскому (нормальному) распределению для обоснования корректности применения соотношения Б. Мандельброта.

Обнаруженные аномалии требуют дальнейшего глубокого исследования рассмотрен-





ных и иных методов и подходов, используемых для анализа транспортных процессов на улично-дорожных сетях крупных городов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с. ISBN 5-93972-108-7.
2. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с. ISBN 5-03-001712-7.
3. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 354 с. ISBN 5-901095-03-0.
4. Grahovac, D., Leonenko, N. N., Taqqu, M. S. Scaling Properties of the Empirical Structure Function of Linear Fractional Stable Motion and Estimation of Its Parameters. *Journal of Statistical Physics*, 2015, Vol. 158 (1), pp. 105–119. DOI: 10.1007/s10955-014-1126-4.
5. Любушин А. А. Прогноз Великого Японского землетрясения // *Природа*. – 2012. – № 8 (1164). – С. 23–33. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/download/elibrary_18042955_47303750.pdf. Доступ 16.01.2024. EDN: PEVRQB.
6. Гасанов А. Б., Аббасова Г. Г. Оценка фрактальной структуры и стохастического распределения поровых пустот нефтеносных коллекторов // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 228–239. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.3.
7. Смирнов В. В., Спиридонов Ф. Ф. Фрактальные модели стохастических процессов // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2013. – № 1 (3). – С. 99–102. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/download/elibrary_19107961_73506142.pdf. Доступ 16.01.2024. EDN: QCDQDT.
8. Пашенко Ф. Ф., Амосов О. С., Муллер Н. В. Структурно-параметрическая идентификация временного ряда с применением фрактального и вейвлет-анализа // *Информатика и системы управления*. – 2015. – № 2 (44). – С. 80–88. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=twnbmr&ysclid=m3ok83dhjp774512399>. Доступ 17.01.2024. EDN: TWNBMR.
9. Кликушин Ю. Н. Метод фрактальной классификации сложных сигналов // *Журнал радиоэлектроники*. – 2000. – № 4. – 6 с. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15111685>. Доступ 16.01.2024. EDN: MSRQXN.
10. Неганов В. А., Антипов О. И., Неганова Е. В. Фрактальный анализ временных рядов, описывающих качественные преобразования систем, включая катастрофы // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2011. – Т. 14. – № 1. – С. 105–110. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/download/elibrary_16337899_76189553.pdf. Доступ 16.01.2024. EDN: NTNOXH.
11. Кривоносова Е. К., Первадчук В. П., Кривоносова Е. А. Сравнение фрактальных характеристик временных рядов экономических показателей // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 6. – 113 с. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/download/elibrary_22877127_95621621.pdf. Доступ 16.01.2024. EDN: TGQDAZ.
12. Барабаш Т. К., Масловская А. Г. Компьютерное моделирование фрактальных временных рядов // *Вестник Амурского государственного университета. Естественные и экономические науки*. – 2010. – № 49. – С. 31–38. [Электронный ресурс]: https://vestnik.amursu.ru/wp-content/uploads/2017/12/N49_7.pdf. Доступ 16.01.2024.
13. Гарафутдинов Р. В., Ахуньянова С. А. Адаптированный метод клеточного покрытия для оценивания фрактальной размерности финансовых временных рядов

// *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2020. – № 3. – С. 185–218. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.3.10.

14. Gerogiorgis, D. I. Fractal scaling in crude oil price evolution via Time Series Analysis (TSA) of historical data. *Chemical Product and Process Modeling*, 2009, Vol. 4, No. 5. DOI: <https://doi.org/10.2202/1934-2659.1370>.

15. Некрасова И. В. Показатель Херста как мера фрактальной структуры и долгосрочной памяти финансовых рынков // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2015. – № 7 (38). – С. 87–91. [Электронный ресурс]: https://research-journal.org/media/PDF/irj_issues/7-3-38.pdf#page=87. Доступ 15.01.2024.

16. Симонов П. М., Гарафутдинов Р. В. Моделирование и прогнозирование динамики курсов финансовых инструментов с применением эконометрических моделей и фрактального анализа // *Вестник Пермского университета. Экономика*. – 2019. – Т. 14. – № 2. – С. 268–288. DOI: 10.17072/1994-9960-2019-2-268-288.

17. Генералова А. А., Бычков Д. С. Улучшение аэродинамических свойств междугороднего автобуса с применением теории фракталов // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2015. – № 2 (14). – С. 158–166. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/download/elibrary_24107892_77708413.pdf. Доступ 13.01.2024.

18. Караблин О. В. О фрактальном характере автомобильного трафика города // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. – 2018. – Т. 8. – № 9А. – С. 287–292. [Электронный ресурс]: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-economy-2018-9/32-karablin.pdf>. Доступ 13.01.2024.

19. Pengjian Shang, Meng Wan, Santi Kama. Fractal nature of highway traffic data. *Computers and Mathematics with Applications*, 2007, Vol. 54, Iss. 1, pp. 107–116. DOI: doi.org/10.1016/j.camwa.2006.07.017.

20. Qiang Meng, Hooi Ling Khoo. Self-Similar Characteristics of Vehicle Arrival Pattern on Highways. *Journal of Transportation Engineering*, 2009, Vol. 135, Iss. 11, pp. 864–872. DOI: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:11\(864\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:11(864)).

21. Xuewei Li, Pengjian Shang. Multifractal classification of road traffic flows. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2007, Vol. 31, Iss. 5, pp. 1089–1094. DOI: doi.org/10.1016/j.chaos.2005.10.109.

22. David, S. A., Machado, J. A. T., Inacio, C. M. C., Valentim, C. A. A combined measure to differentiate EEG signals using fractal dimension and MFDFA-Hurst. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2020, Vol. 84, 105170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105170>.

23. Ерофеева Е. С., Ляпунова Е. А., Оборин В. А., Гилева О. С., Наймарк О. Б. Структурно-функциональный анализ твёрдых тканей зубов в оценке качества технологий отбеливания // *Российский журнал биомеханики*. – 2010. – Т. 14. – № 2 (48). – С. 47–55. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15105346_39403207.pdf. Доступ 16.01.2024.

24. Бояршинов М. Г. Метод нормированного размаха для анализа интенсивности транспортного потока // *Вестник ГБУ «Научный центр безопасности жизнедеятельности»*. – 2020. – № 2 (46). – С. 35–46. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/download/elibrary_44788054_61375863.pdf. Доступ 15.01.2024.

25. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. The deterministic component of the traffic flow intensity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020) 27th – 29th October 2020, Saint-Petersburg, Russian Federation*, 2021, 1111 (1), 012013 (10p). DOI: 10.1088/1757-899X/1111/1/012013.

26. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Использование комплекса фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения для выделения детерминированной и стохастической составляющих интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 3. – С. 61–71. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-3-61.
27. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Фурье-анализ интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 4. – С. 46–59. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-4-46.
28. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Васькина Е. В. Применение показателя Хёрста для исследования интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 2. С. 68–81. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-68.
29. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Васькина Е. В. Применение вейвлет-анализа для исследования интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 4. – С. 72–87. DOI: doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-72.
30. Grassberger, P., Procaccia, I. Characterization of Strange Attractors. *Physical Review Letters*, 1983, 50, pp. 346–349. [Электронный ресурс]: https://e-l.unifi.it/pluginfile.php/591014/mod_resource/content/0/PhysRevLett.50.346.pdf. Доступ 16.01.2024.
31. Крылова О. И., Цветков И. В. Комплекс программ и алгоритм расчета фрактальной размерности и линейного тренда временных рядов // Программные продукты и системы. – 2012. – № 4. – С. 106–110. [Электронный ресурс]: <https://swsys.ru/index.php?page=article&id=3320&lang>. Доступ 16.01.2024. EDN: OXSJMU.
32. Дещеревский А. В. Фрактальная размерность, показатель Херста и угол наклона спектра временного ряда. – М.: Институт сейсмологии Объединенного института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 1997. – 34 с. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26650013_92379281.pdf. Доступ 16.01.2024. EDN: WLESYZ.
33. Старченко Н. В. Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов // Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: МИФИ (гос. ун-т), 2005. – 24 с. [Электронный ресурс]: https://viewer.rusneb.ru/ru/000200_000018_RU_NLR_bibl_1085207?page=1&otate=0&theme=white. Доступ 16.01.2024.
34. Анисимов И. А., Осипов Г. С. Сравнение классического и модифицированного методов расчета фрактальной размерности временных рядов с помощью показателя Херста // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. – 2020. – Т. 10–2 (49). – С. 6–10. DOI: 10.24411/2500-1000-2020-11104.
35. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
36. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
37. Sutcliffe, J., Hurst, S., Awadallah, A. G., Brown, E., Named, Kh. Harold Edwin Hurst: the Nile and Egypt, past and future. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, Vol. 61, Iss. 9, pp. 1557–1570. DOI: 10.1080/02626667.2015.1019508.
38. Голубь Ю. Я. Изучение фрактальной размерности произведения временного ряда на число и умножения временных рядов // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2016. – № 5 (59). – С. 72–76. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26384218_98248727.pdf. Доступ 13.01.2024. EDN: WJFNCD.
39. Голубь Ю. Я. Аналитическое рассмотрение фрактальной размерности кросс-курсов одной валюты по отношению к другой // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2014. – № 7 (37). – С. 42–45. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22309341_13493325.pdf. Доступ 14.01.2024. EDN: SUFBVT.
40. Михайлов В. В., Киринос С. Л., Гедзенко М. О. Фрактальная модель обработки потоковых данных в задаче прогнозирования условий погоды // *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. – 2013. – Т. 2. – № 1 (2). – С. 43–46. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26293729_82151009.pdf. Доступ 13.01.2024. EDN: WDKAMR.
41. Li Li, Zhiheng Li, Yi Zhang, Yudong Chen. A Mixed-Fractal Traffic Flow Model Whose Hurst Exponent Appears Crossover. *Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, Conference Publishing Service, 2012, pp. 443–447. DOI: 10.1109/CSO.2012.103.
42. Kaklauskas, L., Sakalauskas, L. Study of on-line measurement of traffic self-similarity. *CEJOR*, 2013, Vol. 21, pp. 63–84. DOI: 10.1007/s10100-011-0216-5.
43. Mehrvar, H. R., Le-Ngoc, T. Estimation of Degree of Self-Similarity for Traffic Control in Broadband Satellite Communications. *Proceedings 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Montreal, QC, Canada, 1995, Vol. 1, pp. 515–518. DOI: 10.1109/CCECE.1995.528187.
44. Главацкий С. П. Статистический анализ трафика социальных сетей // *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*, 2013, № 26 с. 94–99. – [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21597433>. – Доступ 14.08.2023.
45. Жмурко Д. Ю., Осипов А. К. Прогнозирование показателей развития сахарной отрасли с применением методов фрактального анализа // *Вестник Удмуртского университета. Экономика и право*. – 2018. – Т. 28. – № 2. – С. 185–193. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35078230_18865640.pdf. Доступ 14.08.2023. EDN: LVBFMT.
46. Лопухин А. М. Применение методов фрактального анализа к прогнозированию показателей развития предприятий кофейной отрасли // *Continuum. Математика. Информатика. Образование*. – 2020. – № 4. – С. 70–77. DOI: 10.24888/2500-1957-2020-4-70-79.
47. Шмырин А. М., Седых И. А., Щербаков А. П. Методы нелинейного анализа при исследовании характеристик производства клинкера // *Вестник ТГУ*. – 2014. – Т. 19. – Вып. 3. – С. 923–926. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21830477_25858437.pdf. Доступ 14.08.2023. EDN: SJSQBH.
48. Can Ye, Huiyun Li, Guoqing Xu. An Early Warning Model of Traffic Accidents Based on Fractal Theory. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, 2014, pp. 2280–2285. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958055. ●

Информация об авторе:

Бояршинов Михаил Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, mgboyarshinov@pstu.ru.

Статья поступила в редакцию 10.01.2024, одобрена после рецензирования 05.07.2024, принята к публикации 24.07.2024.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.001.57

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-3>

Комплексное пространство цифровой железной дороги

**Ирина Александровна Дубчак***Российский университет транспорта, Москва, Россия.**РИНЦ SPIN-код: 1330-5849, РИНЦ Author ID: 1152475.**✉ dia.rut.miit@gmail.com.*

Ирина ДУБЧАК

АННОТАЦИЯ

В статье приводятся выводы по итогам исследования сложившегося де-факто комплексного пространства цифровой железной дороги. Показано, что комплексное пространство цифровой железной дороги в качестве первоисточника имело информационное пространство, но в процессе развития оно усложнилось, появились специфические отличия, сделавшие его более разнообразным и, благодаря интеграции информационного пространства с технологией «интернета вещей», более близким по содержанию к киберпространству.

Показаны связь комплексного пространства с геоинформационным пространством и с координатным пространством, его многофункциональность, включающая функции коммуникации, навигации, координации, позиционирования и управления, реализуемые в том числе как способ оптимизации графика движения и обеспечения бесперебойной работы системы транспортной инфраструктуры на основе комплементарного обеспечения группового управления, корпоративного управления и управления одиночными объектами.

Ключевые слова: транспорт, комплексное пространство, управление, цифровая железная дорога, сложные системы.

Для цитирования: Дубчак И. А. Комплексное пространство цифровой железной дороги // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-3>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая железная дорога (ЦЖД) появилась как результат цифровой технологической трансформации. В ее основе – динамические пространственно-временные модели управления железной дорогой [1]. ЦЖД обладает большей свободой в выборе режимов движения, но большая свобода сопряжена с большей неопределенностью, ввиду чего необходимо использовать методы моделирования [2] и уменьшения неопределенности [3]. Для задач ЦЖД требуется использовать рассуждения и выбор доминирующих факторов в условиях нечеткой информации [4]. Неопределенность, которая существует в сопряженных с ЦЖД ситуациях, приводит к необходимости применения вероятностных мер по индексам включения в случае неизвестной функции полезности [5].

ЦЖД [6] может быть рассмотрена как сложная «система систем», в частности, для ее функционирования необходимо использовать не только информацию, но и геоинформацию [7]. Как и обычное такси, ЦЖД использует электронные карты и атласы [8] для прокладки маршрутов и режимов движения, при этом и решение задач получения картографических информационных моделей должно происходить в реальном времени [9].

ЦЖД развивается комплементарно с технологиями цифрового транспорта: цифровой логистики [10], беспилотного транспорта [11], цифровых коммуникаций [12], киберфизических систем [13; 14]. Как саморазвивающаяся система ЦЖД относится к классу субсидиарных систем [15]. Как пространственный феномен ЦЖД связана с геоинформатикой, геодезией и пространственной экономикой [16]. Как современное управление [17] в целом тесно связано с информационными пространствами и иными пространствами как инструментами управления, так

и ЦЖД также использует пространство для управления, которое следует считать комплексным. Это пространство образовано коммуникационными и информационными пространствами и технологиями.

Целью исследования стал анализ особенностей и взаимосвязей комплексного пространства цифровой железной дороги.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура комплексного пространства ЦЖД

Для понимания особенностей комплексного пространства на рис. 1 приведена его обобщенная структура.

Комплексное пространство ЦЖД включает три основных пространства: *коммуникационное, управленческое и координатное*.

Так как ЦЖД является пространственной системой, она использует пространственное управление и применяет пространственную логику [18]. Для пространственного управления необходимо *координатное пространство*, которое создается с использованием геодезических методов. В координатное пространство входят технологии глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), с помощью которых координаты подвижного объекта вычисляют в реальном времени. Координатное пространство создается на основе геодезических сетей (ГГС) и местных сетей, при этом для железных дорог применяют специальные реперные сети.

Коммуникационное пространство включает сети связи и устройства цифровой коммуникативистики, мобильную связь, которая является обязательным компонентом ЦЖД [12], а также радиорелейное информационное пространство, которое обеспечивает радионаблюдение подвижных объектов дополнительно к визуальному

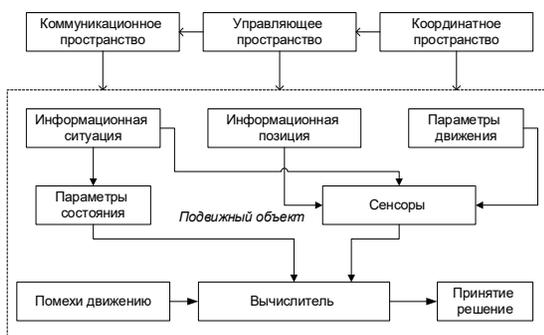


Рис. 1. Структура комплексного пространства ЦЖД [составлено автором].



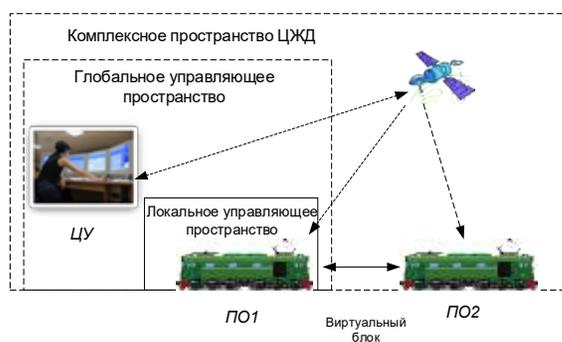


Рис. 2. Глобальное и локальное управляющее пространство ЦЖД [разработано автором].

наблюдению в обычном транспорте, являясь необходимым компонентом при беспилотном управлении транспортом [18]. Коммуникационное пространство также содержит спутниковое коммуникационное пространство, спутниковое навигационное пространство и спутниковое координационное пространство. Эти пространства поддерживаются с помощью ГНСС. Спутниковое навигационное пространство решает задачи ориентации и навигации подвижного объекта.

Координационное пространство фактически является координатным пространством, решает задачи определения местоположения объекта в абсолютной и относительной системе координат, и таким образом ГНСС входит в координатное и коммуникационное пространство.

Спутниковое коммуникационное пространство поддерживает связь через космические системы связи. Коммуникационное пространство решает проблемы информационной безопасности

Управленческое пространство ЦЖД является информационным управляющим пространством. Оно делится на локальное и глобальное, различие между ними показано на рис. 2.

Глобальное управляющее пространство ЦЖД включает множество локальных пространств и имеет ядро в виде центра управления (ЦУ, рис. 2). Глобальное управляющее пространство ЦЖД также включает технологию «интернета вещей».

Локальное управляющее пространство включает статическую и динамическую (скользящую) информационную ситуацию, при этом статическая информационная ситуация связана со стационарными объектами окружения трассы и помехами движению

[15], а динамическая информационная ситуация – с подвижным объектом и перемещается вместе с ним. Информация из этой ситуации попадает в системы интеллектуального управления объектом или глобальные ИТС.

Технологические особенности ЦЖД

Первой технологической особенностью ЦЖД является использование комплексного пространства. Второй технологической особенностью ЦЖД является применение подвижных блоков. Эта особенность (Moving block signaling (MBS)) показана на рис. 4, а для сравнения на рис. 3 показано обычное движение.

Обычное движение называют сигнально-блоковым именно потому, что оно использует систему фиксированных в пространстве блоков и систему сигнализации, разделяющую блоки. Сигнал дает команду на движение или остановку. Рис. 3 показывает плотность движения при сигнально-блоковом движении, при котором часть блоков (от 30 до 50 %) пустует.

Как альтернатива этому на рис. 4 дана схема цифрового движения с технологией подвижных блоков или «конвертов».

Подвижный блок реализуется через систему связи. Подвижный объект рассчитывает допустимое приближение к следующему объекту и движется синхронно с ним. При этом фиксированная сигнализация и фиксированные блоки не нужны. Подвижный блок – динамическая информационная ситуация, которая скользит по трассе, а подвижный объект находится внутри такой ситуации. При таком движении пустующих блоков нет и существенно возрастает интенсивность перевозки.

В технологии MBS подвижный объект имеет встроенный вычислитель, который формирует размеры блока и через коммуни-

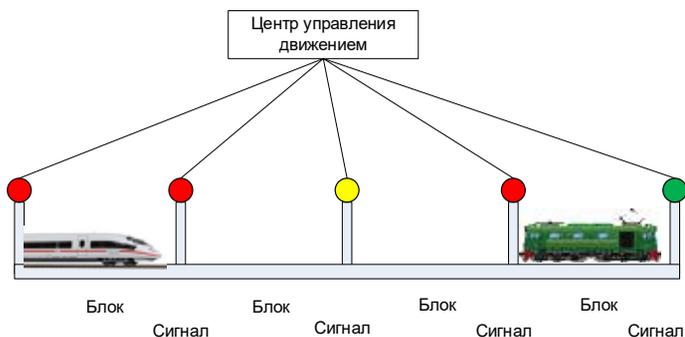


Рис. 3. Принцип обычного движения [[6] и др.].

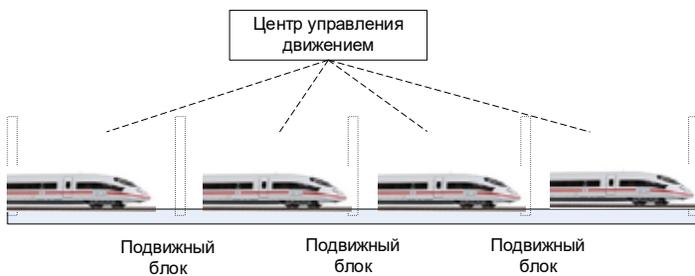


Рис. 4. Принцип цифрового движения [[6] и др.].

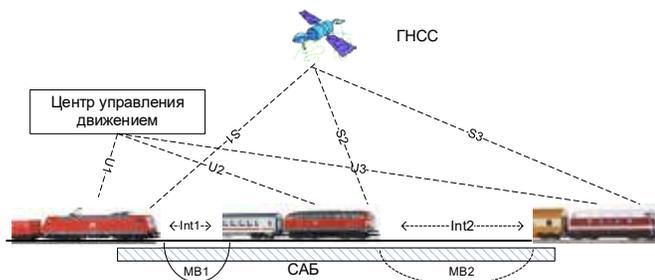


Рис. 5. Принцип функционирования комплексного пространства ЦЖД [подготовлено автором].

кационное пространство осуществляет коммуникационное взаимодействие с другими подвижными объектами.

Основы функционирования ЦЖД

На рис. 5 показан принцип функционирования комплексного информационного пространства ЦЖД.

Показанные три условных подвижных объекта (А, Б, В) имеют спутниковую связь и спутниковую координацию. Эта связь показана как S_1 , S_2 , S_3 . Помимо этого, между центром управления движением и подвижными объектами существует координационная и информационная связь (U_1 , U_2 , U_3). Между подвижными объектами существует координационная и информационная связь (Int_1 , Int_2). По этой связи они передают информацию о собственном положении, скорости и ускорении движения,

которая используется в центре управления движением для адаптации перевозок, оптимизации трафика и расчета подвижного блока.

Рис. 5 по сути демонстрирует объективную необходимость комплексного пространства ЦЖД как инструмента управления перевозками. При использовании такой технологии интенсивность перевозок возрастает (рис. 4), но значительно возрастает и сложность управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное пространство цифровой железной дороги, возникшее на основе интеграции информационного пространства с технологией «интернета вещей» и включающее функции коммуникации, навигации, координации и позиционирования, предопределило свою роль как практически безальтер-





нативной основы управления и развития железнодорожного транспорта.

Например, технологии виртуальной сцепки [20], тесно связанной с понятием виртуальных блоков, повышают эффективность ЦЖД и, относясь к локальному информационному пространству подвижного объекта, могут рассматриваться именно в качестве технологии комплексного пространства ЦЖД.

Кроме того, комплексное пространство цифровой железной дороги позволяет осуществлять решение задач оптимизации внутри себя, не прибегая к внешним вычислителям.

В целом исследование показало высокую перспективность использования концепции комплексного пространства цифровой железной дороги для анализа, системного развития и внедрения взаимосвязанных технологических решений, направленных на повышение эффективности железнодорожных перевозок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Розенберг И. Н., Цветков В. Я. Создание динамической пространственно-временной модели управления железной дорогой // *Геодезия и картография*. – 2010. – № 8. – С. 48–51. EDN: SNGVHH.
2. Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Modelling uncertainty with generalized credal sets: application to conjunction and decision. *International Journal of General Systems*, 2018. Vol. 47, Iss. 1, pp. 67–96. DOI: 10.1080/03081079.2017.1391805.
3. Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. The contradiction between belief functions: Its description, measurement, and correction based on generalized credal sets. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2019, Vol. 112, pp. 119–139. DOI: 10.1016/j.ijar.2019.06.001.
4. Bozhenyuk, A., Belyakov, S., Knyazeva, M., Rozenberg, I. On Computing Domination set in Intuitionistic Fuzzy Graph. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2021, Vol. 14, Iss. 1, pp. 617–624. DOI: 10.2991/ijcis.d.210114.002.
5. Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Ranking probability measures by inclusion indices in the case of unknown utility function. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2014, Vol. 13, Iss. 1, pp. 49–71. DOI: 10.1007/s10700-013-9169-6.
6. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Цифровая железная дорога: принципы и технологии // *Мир транспорта*. – 2018. – Т. 16. – № 3 (76). – С. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-3-5>.
7. Розенберг И. Н., Вознесенская М. Е. Геоознания и геореференция // *Вестник Московского государственного областного педагогического университета. Географическая среда и живые системы*. – 2010. – № 2. – С. 116–118. [Электронный ресурс]: <https://www.geocosreda.ru/jour/article/view/872/842>. Доступ 29.05.2024.

8. Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A., Kostianoy, A. G., Gvozdik, S. A., Serykh, I. V., Krasnoperov, R. I., Sazonov, N. V., Dubchak, I. A., Popov, A. B., Kostianaia, E. A., Gvozdik, G. A. *Electronic Atlas of Climatic Changes in the Western Russian Arctic in 1950–2021 as Geoinformatic Support of Railway Development*. Applied Sciences (Switzerland), 2023, Vol. 13, Iss. 9, pp. 5278. DOI: 10.3390/app13095278.

9. Belyakov, S., Belyakova, M., Rozenberg, I. Approach to Real-Time Mapping, Using a Fuzzy Information Function. *Communications in Computer and Information Science*, 2013, Vol. 398, PART I, pp. 510–521. DOI: 10.1007/978-3-642-45025-9_50.

10. Chung-Shan Yang, Moses Shang-Min Lin. The impact of digitalization and digital logistics platform adoption on organizational performance in maritime logistics of Taiwan. *Maritime Policy & Management*, 2023, pp. 1–18. DOI: 10.1080/03088839.2023.2234911.

11. Yuan Shuyun, Ying Li, Fangwen Bao, Haoxiang Xu. [et al.] Marine environmental monitoring with unmanned vehicle platforms: Present applications and future prospects. *Science of The Total Environment*, 2023, Vol. 858, Part 1, 159741. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159741.

12. Шнепс-Шнеппе М. А., Федорова Н. О., Сукольников Г. В., Куприяновский В. П. Цифровая железная дорога и переход от сети GSM-R к LTE-R и 5G-R – состоится ли он? // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2017. – Т. 5. – № 1. – С. 71–80. [Электронный ресурс]: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/379/346>. EDN: XNRUKL. Доступ 29.05.2024.

13. Khaitan, S. H., McCalley, J. D. Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey. *IEEE Systems Journal*, 2015, Vol. 9, Iss. 2, pp. 350–365. DOI: 10.1109/JSYST.2014.2322503.

14. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // *Мир транспорта*. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 138–145. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-2-13>.

15. Лёвин Б. А., Цветков В. Я., Дзюба Ю. В. Субсидиарное управление на железной дороге // *Мир транспорта*. – 2019. – Т. 17. – № 4 (83). – С. 22–35. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-22-35.

16. Tsvetkov, V. Ya. Spatial Relations Economy. *European Journal of Economic Studies*, 2013, Vol. 3, Iss. 1, pp. 57–60. EDN: PZTGYF.

17. Kovalenko, N., Rosenberg, I., Tsvetkov, V. UC aims system in the management of the economic activities of the track complex of JSC «Russian railways». *E3S Web of Conferences*, 2023, Vol. 376, 04001. DOI: 10.1051/e3sconf/202337604001.

18. Dolgy, A. I., Rozenberg, I. N., Tsvetkov, V. Ya. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation. *AIP Conference Proceedings*, 2021, Vol. 2402, Iss. 1, 50059. DOI: 10.1063/5.0074851.

19. Розенберг И. Н., Цветков В. Я. Динамическая информационная ситуация в транспортной сфере // *Наука и технологии железных дорог*. – 2022. – № 1. – С. 3–8. [Электронный ресурс]: <https://nias.ru/upload/iblock/e29/ojxkwbyvwmimhgmf0uml56anw9he6x.pdf> [полный текст выпуска]. Доступ 29.05.2024.

20. Yuan Cao, Jiakun Wen, Lianchuan Ma. Tracking and collision avoidance of virtual coupling train control system. *Future Generation Computer Systems*, 2021, Vol. 120, pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.future.2021.02.014. ●

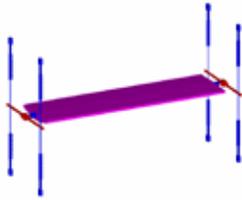
Информация об авторе:

Дубчак Ирина Александровна – начальник Управления новых проектов и технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, dia.rut.mit@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 29.05.2024, одобрена после рецензирования 24.06.2024, принята к публикации 28.06.2024.

TV

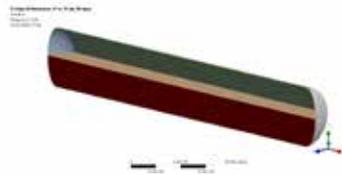
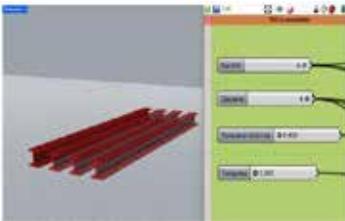
НАУКА И ТЕХНИКА



МОСТОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ 28, 39

*Аэродинамическая устойчивость
большепролетных мостов: влияние
трафика.*

*Визуальное программирование
при проектировании мостовых
сооружений на основе
информационного
и параметрического моделирования.*

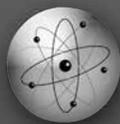


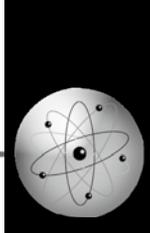
ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ 45, 52, 59

*Вагон-цистерна: взаимосвязь
перевозимого жидкого груза
и частотных характеристик
оболочки котла.*

*Гоночные автомобили: анализ
динамики патентной активности.*

*Ультразвуковой контроль
цельнокатаных колес.*





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21

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

Влияние трафика на аэродинамическую устойчивость большепролетных мостов



Ольга ПОДДАЕВА



Алексей ЛОКТЕВ



Павел ЧУРИН



Анастасия ФЕДОСОВА

Ольга Игоревна Поддаева¹, Алексей Алексеевич Локтев², Павел Сергеевич Чурип³, Анастасия Николаевна Федосова⁴

^{1,3,4} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия.

² Российский университет транспорта, Москва, Россия.

¹ORCID 0000-0003-1969-6696; Web of Science Researcher ID: H-1030-2019; Scopus Author ID: 56002141900; РИНЦ SPIN-код: 4857-5428; РИНЦ Author ID: 410581.

²ORCID 0000-0002-8375-9914; Web of Science Researcher ID: W-1762-2017; Scopus Author ID: 35618959900; РИНЦ SPIN-код: 5766-6018; РИНЦ Author ID: 16528.

³ORCID 0000-0003-1509-6108; Web of Science Researcher ID: AAD-1005-2022; Scopus Author ID: 56002171000; РИНЦ SPIN-код: 4017-7152; РИНЦ Author ID: 690208.

⁴ORCID 0000-0002-2339-0289; Web of Science Researcher ID: S-2955-2016; Scopus Author ID: 56001803200; РИНЦ SPIN-код: 1503-9064; РИНЦ Author ID: 676314.

✉ ² aaloktev@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

Ветровые воздействия на большепролетные мосты при определенных условиях могут вызывать явления аэроупругой неустойчивости. В настоящее время основным методом исследования таких конструкций на возникновение явлений аэроупругой неустойчивости является экспериментальное моделирование в аэродинамических трубах.

Экспериментальное моделирование основано на предположении о неизменности формы поперечного сечения моста с течением времени. Очевидно, что такое предположение не может быть верным, поскольку наличие транс-

портных средств на мостовой конструкции изменяет профиль поперечного сечения моста. В связи с этим крайне важно выяснить, является ли обоснованным игнорирование изменения профиля поперечного сечения мостов из-за наличия транспортного потока. Настоящее исследование направлено на то, чтобы путем экспериментального моделирования в аэродинамических трубах получить представление о влиянии на аэродинамическую устойчивость моста изменений его поперечного сечения из-за наличия трафика.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, большепролетные мосты, устойчивость мостов, трафик, ветровые воздействия, аэродинамические трубы.

Финансирование: данная работа была поддержана грантом 2024 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами НИУ МГСУ, проект № 01–392/130.

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Головного регионального центра коллективного пользования и уникальной научной установки «Большая исследовательская градцентная аэродинамическая труба НИУ МГСУ».

Для цитирования: Поддаева О. И., Локтев А. А., Чурип П. С., Федосова А. Н. Влияние трафика на аэродинамическую устойчивость большепролетных мостов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-4>.

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

ВВЕДЕНИЕ

При классическом анализе мостовых конструкций на явления аэроупругой неустойчивости с использованием как экспериментального, так и численного моделирования автомобильный трафик обычно игнорируется [1–5]. Под трафиком понимается расположение автомобильного или железнодорожного транспорта на пролетном строении. Очевидно, что такой подход значительно облегчает исследование аэродинамики большепролетных мостов. Если же учитывать трафик на мостах, профиль поперечного сечения моста будет постоянно меняться из-за движущегося транспортного потока. В результате измененные профили поперечных сечений моста вдоль пролетного строения будут существенно отличаться даже в одно и то же время, кроме того, профили также будут меняться из-за дорожной и ветровой обстановки в различные моменты времени. Из-за этого существенным представляется вопрос, является ли обоснованным игнорирование изменения профиля поперечного сечения мостов из-за наличия транспортного потока.

По сравнению с исследованиями влияния трафика как внешней динамической нагрузки на мост, исследования влияния изменения профилей поперечного сечения моста на аэродинамическое поведение конструкций встречаются довольно редко.

Авторы [6] провели серию экспериментов в аэродинамической трубе для изучения влияния стохастического трафика на производные флаттера. Протестировано несколько сценариев для получения представления об изменениях производных флаттера на разных участках моста и в разные моменты времени. В работе [7], посвященной влиянию на аэродинамические характеристики конструкции изменения профиля моста из-за наличия транспортного потока, авторы, проведя экспериментальное моделирование, показали, что изменение поперечного сечения моста из-за наличия трафика может существенно повлиять на аэроупругие свойства большепролетных мостов. В работе [8] исследовано изменение аэродинамических и аэроупругих характеристик моста, обусловленных неподвижными транспортными средствами при различном расположении транспортных средств на мостовом полотне. Установлено, что для системы с двумя степенями свободы неподвижные транспортные средства доволь-

но благотворно влияют на устойчивость моста. В работе [9] изучается ветровая нагрузка на железнодорожный мост, входящий в состав высокоскоростной магистрали. Авторы пришли к качественному заключению о неизменных флуктуациях коэффициентов аэродинамического сопротивления системы «пролетное строение» – «транспортные средства» для различных сочетаний совокупности положений экипажей на мостовом переходе, в том числе, и для высокоскоростных магистралей.

Одной из решаемых в данной работе задач, является исследование влияния плотности транспортного потока и местоположения отдельных экипажей на пролетном строении на аэродинамическое поведение большепролетных мостов.

С этой целью для двух различных моделей большепролетных мостовых переходов была проведена серия экспериментов в аэродинамической трубе в нескольких постановках: отсутствие транспортных средств на конструкции (классическая постановка) и наличие автомобильного трафика, приводящего к изменению поперечного сечения моста.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объект исследования № 1

Постановка задачи

В качестве объекта исследования выбрано пролетное строение длиной 265,41 м (рис. 1).

Методика проведения аэродинамических экспериментальных исследований

Согласно отечественным нормативным документам¹ проверка аэродинамической устойчивости для такой конструкции должна быть проведена с помощью экспериментального моделирования в аэродинамических трубах. В настоящее время в зависимости от размеров и основных целей испытаний мировым сообществом ветроэнергетики и промышленной аэродинамики IAWE (*International Associations for Wind Engineering*) официально приняты два способа исследования ветрового воздействия на мостовые конструкции:

1. Испытания секционных (отсечных) моделей пролетных строений;

¹ Свод правил СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849>. Доступ 05.05.2024.



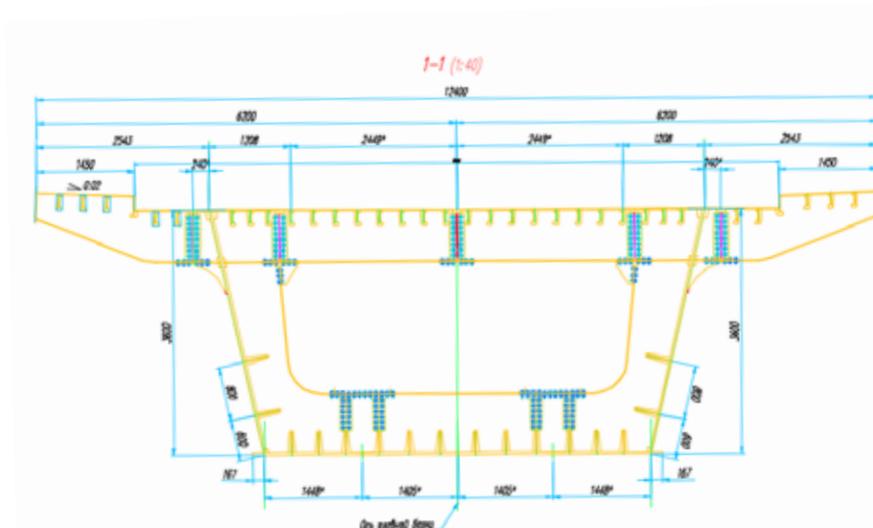


Рис. 1. Схема поперечного сечения моста № 1 [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

2. Испытания полномасштабных моделей [10].

Проведение натурных экспериментов в аэродинамических трубах связано с рядом прямых и косвенных ограничений, к которым относится использование полномасштабных макетов, что обусловлено геометрическими, финансовыми и временными аспектами проведения такого вида работ. Хотя создание полномасштабных моделей объекта может позволить получить полную достоверную информацию о фактическом состоянии и поведении конструкции при аэродинамических воздействиях, ввиду необходимости точного воспроизведения массо-инерционных и частотных параметров мостового сооружения изучение явлений аэроупругой неустойчивости связано со сложностью масштабирования моделей и интерпретацией результатов, получаемых после эксперимента² [11–16]. В процессе моделирования важным является возможность варьирования широкого спектра параметров модели, поскольку при проведении научно-технического сопровождения проектирования мостового перехода конструктивные и иные инженерные решения могут меняться [10]. Испытания пролетных строений мостовых переходов в аэродинамических трубах предлагается проводить в виде жестких секций, геометрически подобных реальной конструкции, обладающих тремя степенями свободы и подвешенных в рабочей

зоне трубы в шестикоординатной системе. Такое модельное представление позволяет достаточно точно воспроизводить реальные аэродинамические эффекты в лабораторных условиях: различные виды аэродинамических потоков, изменение скорости ветра по высоте, варьирование интенсивности ветрового потока, различные углы атаки, вертикальные и горизонтальные пульсации нагрузки, визуализацию распределения ветровых потоков по окрестностям продуваемой конструкции и т. д. [10].

Секционные испытания являются наиболее распространенным методом исследования. Данный метод целесообразно использовать для балочных мостов при отсутствии высотных пилонов и необходимости учета воздействия вантовой системы на пролетное строение.

При проведении испытаний секционной модели моделируется участок наиболее длинного пролета моста как самого восприимчивого к динамическому ветровому воздействию. Практический опыт проведения экспериментов в аэродинамических трубах, а также требования нормативных документов позволяют утверждать, что для наиболее точного моделирования необходимо секционную модель пролетного строения изготавливать абсолютно жесткой, а упругие характеристики моделировать с помощью пружинных подвесов на специализированном стенде-столе. Подробные требования были ранее описаны в ОДМ 218.2.040–2014 «Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных

² Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. National Research Council of Italy. CNR-DT 207/2008. [Электронный ресурс]: <https://www.cnr.it/it/node/2627>. Доступ 05.05.2024.

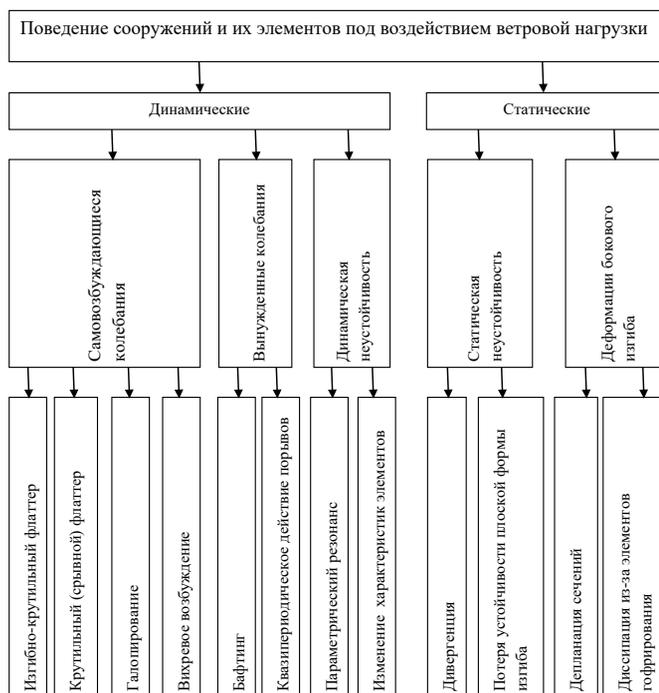


Рис. 2. Классификация аэроупругих явлений М. И. Казакевича [10] [диаграмма выполнена А. А. Локтевым].

строений мостов»³. В настоящее время действует ГОСТ Р 59625–2022, национальный стандарт Российской Федерации «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости»⁴. Неуказанные в данном документе особенности отрабатываются и в дальнейшем учитываются путем эмпирического варьирования характеристик при начале обдувки макета.

Аэродинамические воздействия, как и любую другую нагрузку, принято разделять на статические и динамические, в их основе лежат аэродинамические силы и силы упругости (флаттер, бафтинг), одной из дополнительных причин появления динамических воздействий являются силы инерции.

³ ОДМ 218.2.040-2014 «Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных строений мостов». Утверждены распоряжением Федерального дорожного агентства от 24.03.2014 г. № 478-р. [Электронный ресурс]: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/prikazy-rasporiyazheniya/13183>. Отменены распоряжением Федерального дорожного агентства от 05.05.2022 г. № 1414-р. [Электронный ресурс]: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/prikazy-rasporiyazheniya/522301>. Доступ 05.05.2024.

⁴ ГОСТ Р 59625-2022. «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости». [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200182851>. Доступ 05.05.2024.

Представленная на рис. 2 классификация охватывает практически все известные формы движения упругих тел в ветровом потоке [10].

Воздействия, которым подвергаются мостовые сооружения, можно также разделить на техногенные и природные, в зависимости от природы их возникновения, но учитывая нелинейный характер большинства из них, результаты их совместного действия нельзя получить обычным агрегированием отдельных типов воздействий в итоговый результат может быть существенным, исследователи вынуждены усложнять применяемые подходы и модели, совмещая, например, эффект нахождения на пролетном строении транспортных средств и снеговые (и/или гололедные) отложения, местоположения которых также может изменяться в зависимости от направления и интенсивности ветра.

Так, при физическом моделировании снеговой нагрузки на макете искусственного сооружения использовался специальный пластиковый порошок, фракции которого соответствуют параметрам масштабирования сооружения, с учетом влажности в помещении лаборатории, чтобы не допустить эффектов слипания и дополнительного впитывания влаги.



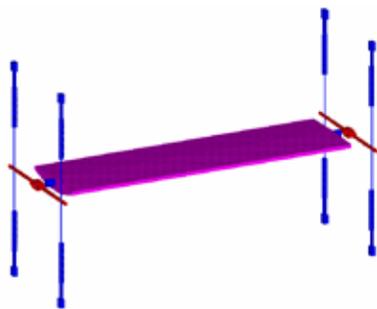


Рис. 3. Схема подвешивания на пружинных растяжках секции пролетного строения [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

Предлагаемый подход к моделированию не позволяет учесть эффектов таяния или, наоборот, намерзания дополнительной гололедной облойки на элементы конструкции, то есть он фактически сводится к дополнительной квазистатической нагрузке, локальная интенсивность которой может меняться из-за переноса частиц вследствие ветра. При этом распределение частиц, имитирующих снег, позволяет прогнозировать появление на сооружении и по близости от него опасных для работников зон, связанных с увеличенными скоростями ветровых потоков и действующими ограничениями в рамках обеспечения безопасности труда.

Физическая модель-макет секции пролетного строения лежит в основе экспериментальных исследований для мостового перехода в аэродинамической трубе (рис. 3). Макет подвешивается на пружинных крепежах и после подвергается ветровому воздействию для детектирования изгибных и крутильных колебаний с агрегированием различных форм колебаний с последующим их разделением [10].

Физическая модель-макет устанавливается в центре поперечного сечения аэродинамической трубы на специальный стенд, опоры которого жестко крепятся к полу камеры, и к ним, в свою очередь, подвешивается пролетное строение на пружинах (рис. 4). Такая компоновка эксперимента позволяет проводить как статические, так и динамические испытания мостового перехода [10; 16].

В ходе динамических испытаний пролетного строения моста определяются параметры вынужденных колебаний модели при воздействии аэродинамической нагрузки:

- амплитуды колебательных движений;
- частотные спектры колебаний;



Рис. 4. Установка для испытания макета мостового перехода в аэродинамической трубе [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

- порядковые формы колебаний;
- спектральные характеристики колебаний.

Статические испытания секции мостового перехода необходимы для выверки характеристик нагрузки и сопоставления ее с параметрами нагрузки, действующей на реальное сооружение транспортной инфраструктуры:

- лобового сопротивления характерного продольного или поперечного сечения;
- подъемной силы, действующей как на секцию пролетного строения, так и на весь стенд в целом;
- крутильного момента вокруг продольной оси макета секции пролетного строения мостового перехода.

В качестве экспериментальной установки для проведения аэродинамических экспериментальных исследований используется уникальная научная установка «Большая исследовательская градиентная аэродинамическая труба» (номер регистрации 585332, портал «Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. Центры коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки»; Дата регистрации: 04.05.2018).

Проектирование модели

Принимая во внимание поперечное сечение рабочей зоны аэродинамической трубы (4 x 2,5 м), из условия «прозрачности» и незагроможденности воздушного потока оптимальным представляется масштаб макета 1:40 (рис. 5). Для одновременного обеспечения геометрического подобия, нужного соотношения массы и жесткости пролетного строения предлагается использовать плоские листы алюминия, из которых на болтовых и закле-



Рис. 5. Модель № 1 пролетного строения моста [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

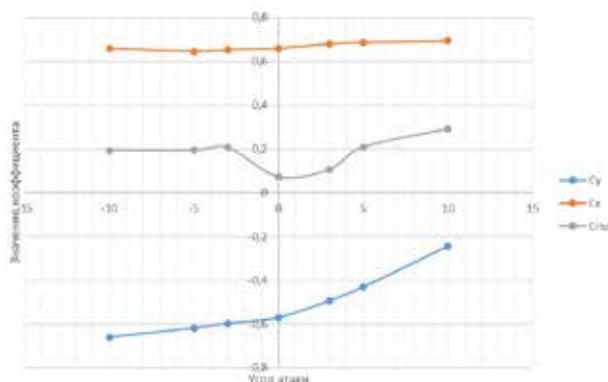


Рис. 6. Графики зависимости значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x) от угла атаки потока [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

почных соединениях собирается секция пролетного строения моста.

Предлагаемые конструктивные решения для создания макета обеспечивают не только верное геометрическое подобие, но и достоверное распределение погонных масс, при котором центры масс макета и реального сооружения совпадают в относительных координатах.

Таким образом, проектируемая модель соответствует натурному объекту по следующим параметрам:

- геометрическое подобие;
- соответствие распределения масс;
- соответствие геометрических центров масс и моментов инерции.

Это полностью удовлетворяет требованиям экспериментальных исследований.

Правильный выбор конструктивных элементов позволяет обеспечить подобие по массам и силам инерции, поставить в соответствие поведение макета пролетного строения и реального объекта транспортной инфраструктуры при аэродинамических воздействиях различной интенсивности и направлений [16].

Все частотные характеристики пролетного строения моделируются специализированными пружинами измерительного стенда.

Экспериментальные исследования проводятся в два этапа:

- статические испытания, в ходе которых определяются значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x) и аэродинамического момента (C_{mz});
- динамические испытания, направленные на вычисление амплитуд изгибных и крутильных колебаний при различных значениях скоростей и направлениях ветрового потока (α).

Статические испытания

В результате статических испытаний получены графики зависимости значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x) от угла атаки потока (рис. 6).

По полученным значениям аэродинамических коэффициентов (рис. 6) для модели № 1 возможно выполнить проверку необходимого условия возникновения аэроупругой неустойчивости галопирования – критерий Глауэрта–Ден-Гартога [10]:



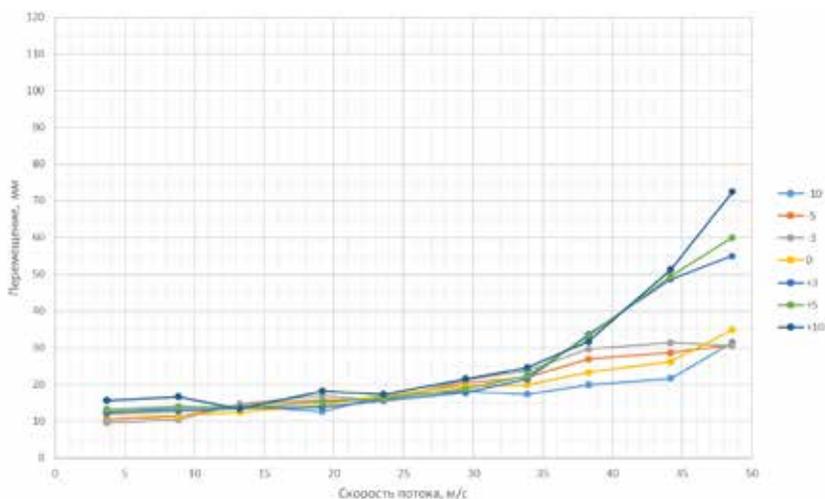


Рис. 7. Зависимость перемещений при колебательных движениях макета пролетного строения от скорости ветрового потока при его различных направлениях [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].



Рис. 8. Схема проведения эксперимента по оценке количества и расположения экипажей на пролетном строении на его аэродинамическую устойчивость [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

$$[C_L(\alpha) + C_D(\alpha)] < 0. \quad (1)$$

Как видно из рис. 6, коэффициент подъемных сил на интервале возрастает, а коэффициент лобового сопротивления положителен, соответственно критерий Глауэрта–Ден-Гартога не выполняется, и галопирование невозможно.

Динамические испытания

Исследования на динамические воздействия секции пролетного строения проводятся на описанном выше стенде (рис. 3, 4), при этом параметры жесткости пружинных подвесов увязываются со скоростями ветрового потока и закладываются в модель при ее проектировании. Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 7.

Выполнена оценка влияния автомобильного трафика на аэродинамическую устойчивость (рис. 8, 9).

Испытания проводились для наветренного и подветренного пролетного строения исследуемого моста в следующих конфигурациях:

- А. Свободное пролетное строение (рис. 5);
- Б. Пролетное строение с учетом автомобильного трафика (рис. 8);
- В. Пролетное строение с учетом автомобильного трафика и снеговых отложений.

Результаты испытаний

Результаты натурных экспериментов, проведенные для двух направлений ветрового потока с углом атаки, изменяющимся в диа-

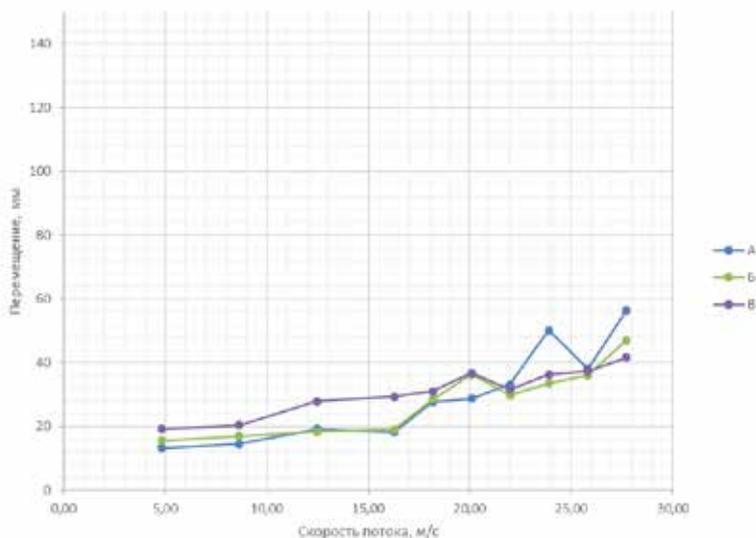


Рис. 9. Зависимость амплитуды колебаний макета пролетного строения от скорости ветрового потока для различных условий загрузки конструкции [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

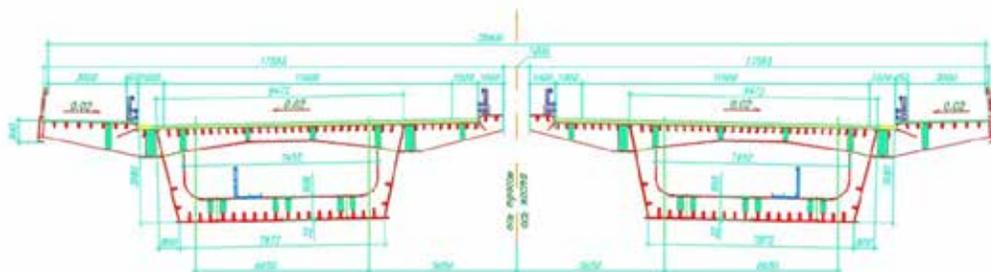


Рис. 10. Схема поперечного сечения моста [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

пазоне от -10° до $+10^\circ$, показали, что явления аэродинамической неустойчивости, согласно классификации (рис. 2), не возникают.

Также результаты эксперимента показали, что наличие экипажей и снеговых мешков существенно не влияет на аэродинамическую устойчивость конструкций пролетного строения в рассмотренной квазистатической постановке автомобильного трафика. Определяющим фактором является влияние расположенного в непосредственной близости существующего мостового перехода. Влияние автомобильного трафика в данном случае пренебрежимо мало.

Объект исследования № 2

Постановка задачи

Исследуется пролетное строение протяженностью 600 метров (рис. 10).

Проектирование модели

Модель масштабом 1:70 изготовлена из листового алюминия (рис. 11).

Результаты статических испытаний для модели пролетного строения моста с учетом автомобильного трафика (рис. 12) приведены на рис. 13.

Выполнена проверка критерия Глауэрта–Ден-Гартога по формуле (1): для некоторых углов атаки необходимое условие галопирования выполняется (рис. 14).

Для наглядности представления результатов, полученных в ходе экспериментальных динамических испытаний, показана графическая зависимость перемещений пролетного строения от средней скорости ветрового потока в масштабе, соответствующем реальной ситуации на объекте транспортной инфраструктуры. Фактически, при этом можно наблюдать изменение функции устойчивости конструкции моста.

Испытания проводились для наветренного и подветренного пролетного строения исследуемого моста в следующих конфигурациях:

А. Свободное пролетное строение (рис. 11);





Рис. 11. Модель пролетного строения [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].



Рис. 12. Модель пролетного строения моста (автомобильный трафик) [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

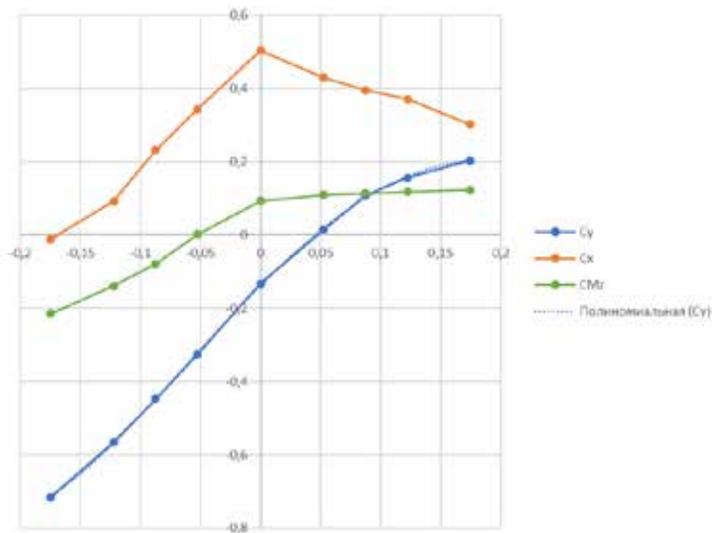


Рис. 13. Графики зависимости значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x), крутящего момента (C_{mz}) от угла атаки потока при углах атаки $(-10^\circ - +10^\circ)$ [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

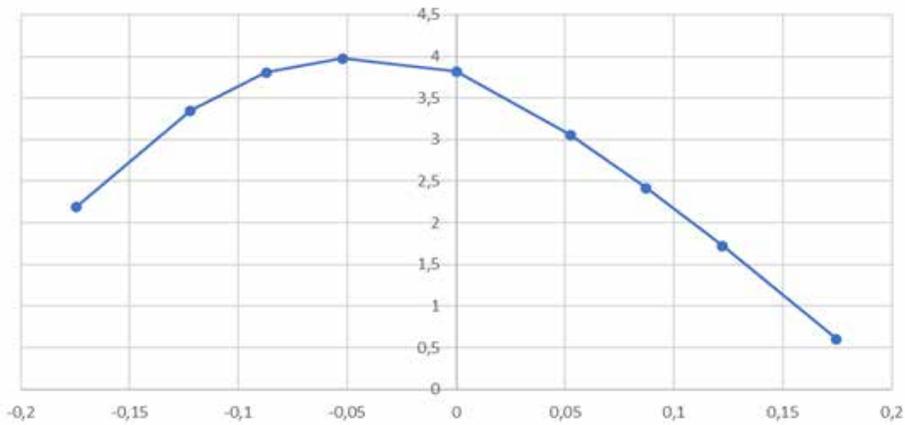


Рис. 14. График зависимости значения критерия Глауэрта – Ден-Гартога от угла атаки потока при углах атаки (-10° – $+10^{\circ}$) [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

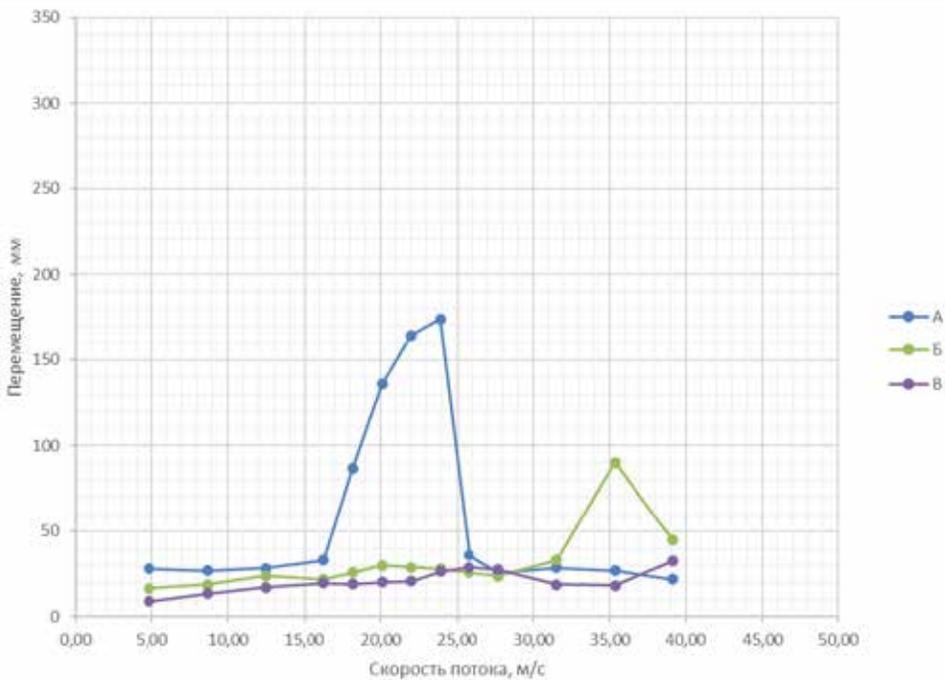


Рис. 15. Зависимость максимальных перемещений точек пролетного строения моста при колебательных движениях от скорости ветрового потока при его направлении $\alpha = 00$ [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

Б. Пролетное строение с учетом снеговых отложений и автомобильного трафика;

В. Пролетное строение с учетом автомобильного трафика (рис. 12).

Моделировалась ситуация скопления автомобилей по двум направлениям движения поочередно (автомобильная пробка). В соответствии со среднестатистическими размерами автотранспорта при моделировании за основу взяты следующие габариты:

- грузовой автотранспорт – 4 x 18 x 2,5 м;
- легковой автотранспорт – 1,5 x 4,2 x 1,7 м.

На рис. 15 изображены графические зависимости максимальных перемещений пролетного строения от скорости ветрового потока для различных случаев нагружения секции пролетного строения при угле атаки $+3^{\circ}$.

ВЫВОДЫ

Проведенные с физическим макетом сооружения натурные испытания на предмет возможной потери аэродинамической устойчивости секций пролетных строений мостового перехода с учетом автомобильного трафика показали, что наличие авто-



мобильного трафика, при исследованиях на отдельных углах атаки, оказывает благоприятное влияние на аэродинамическую устойчивость пролетного строения, что согласуется с выводами работы [8]: для системы с двумя степенями свободы неподвижные транспортные средства довольно благотворно влияют на устойчивость моста. Это в первую очередь объясняется дополнительной турбулизацией ветрового потока над пролетным строением, что с учетом различных габаритов автомобильного трафика на его отдельных участках препятствует формированию стабильной дорожки Кармана и возникновению резонансного вихревого возбуждения.

Представляется, что полученные результаты дают возможность создания более точных моделей аэродинамических нагрузок на мостовые сооружения с учетом влияния трафика экипажей и дополнительной снеговой нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Jain, A., Jones, N. P., Scanlan, R. H. Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-Span Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1996, Vol. 122, Iss. 7, pp. 716–725. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:7\(716\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:7(716)).
- Poddaeva, O., Churin, P. Experimental study of aerodynamic stability of a long-span bridge under wind loads. *Energy Reports*, 2023, Vol. 9, Suppl. 9, pp. 370–375. DOI: [10.1016/j.egyrs.2023.05.273](https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2023.05.273).
- Гостев Ю. А., Обуховский А. Д., Саленко С. Д. Численное моделирование поперечного обтекания пролетных строений балочных мостов // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. – 2018. – № 4. – С. 362–378. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378>.
- Simiu, E., Scanlan, R. H. *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*. 3rd ed. Wiley-Interscience, 1996, 704 p. ISBN 978-0471121572.
- Соловьев С. Ю. Аэродинамическая устойчивость большепролетных мостов // *Транспорт Российской Федерации*. – 2016. – № 5 (66). – С. 47–50. EDN: WZJSVT.

- Chen, S., Nelson, R., Chen, F., Chowdhury, A. Impact of Stochastic Traffic on Modified Cross-Section Profiles of a Slender Long-Span Bridge: Wind Tunnel Experimental Investigation. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, Vol. 139, Iss. 3, pp. 347–358. [Доступ для подписчиков]. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000444).

- Wu, J., Zhou, Yu., Chen, S. Wind-induced performance of long-span bridge with modified cross-section profiles by stochastic traffic. *Engineering Structures*, 2012, Vol. 41, pp. 464–476, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.004>.

- Pospisil, S., Buljac, A., Kozmar, H., Kuznetsov, S., Macháček, M., Král, R. Influence of Stationary Vehicles on Bridge Aerodynamic and Aeroelastic Coefficients. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, Vol. 22, Iss. 4, 05016012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001017](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001017).

- Локтев А. А., Королев В. В., Шишкина И. В., Поддаева О. И., Грибач Ю. С. Исследование мостового перехода высокоскоростной железнодорожной магистрали при аэродинамических воздействиях // *Транспорт Урала*. – 2022. – № 3 (74). – С. 55–59. DOI: [10.20291/1815-9400-2022-3-55-59](https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-3-55-59).

- Казакевич М. И. Ветровая безопасность конструкций. Теория и практика. – М.: Ин-т Гипростроймост, 2015. – 288 с.

- Казакевич М. И. Классификация аэродинамических экспериментальных исследований // *Вестник Донбасской Национальной Академии Строительства и Архитектуры*. – 2011. – № 4. – С. 154–157. EDN: WYGTEK.

- Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт. – 1987.

- Казакевич М. И. Аэродинамика инженерных сооружений. – М.: Ин-т Гипростроймост, 2014. – 167 с.

- Solari, G., Bartoli, G., Gusella, V., Piccardo, G., Pistoletti, P., Ricciardelli, F., Vintani, A. The new CNR-DT 207/2008 Guidelines on Actions and Effects of Wind on Structures. In: 5th European & African conference on wind engineering (EACWE): Florence Italy, July 19th-23rd 2009. Conference proceedings 2009. Eds. Borri, C., Augusti, G., Bartoli, G., Facchini, L. Firenze University Press, 517 pp. [Электронный ресурс]: <https://www.iawe.org/Proceedings/5EACWE/164.pdf>. Доступ 05.05.2024.

- Саленко С. Д. Нестационарная аэродинамика плохообтекаемых многобалочных конструкций // *Дисс... докт. техн. наук.* – Новосибирск, Ин-т теорет. и прикладной механики СО РАН, 2005. – 332 с.

- Поддаева О. И. Основы обеспечения техносферной безопасности критически важных объектов транспортной инфраструктуры в пределах жизненного цикла / *Автореф. дисс... докт. техн. наук.* – М.: РУТ, 2023. – 48 с. С. 41–48. ●

Информация об авторах:

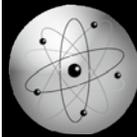
Поддаева Ольга Игоревна – доктор технических наук, доцент, заведующий учебно-научно-производственной лабораторией по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия, poddaevaol@gmail.com.

Локтев Алексей Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортного строительства Российской государственной академии транспорта, Москва, Россия, aaloktev@yandex.ru.

Чурин Павел Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель заведующего учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия, pashok_inbox.ru.

Федосова Анастасия Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия, tgssu-misi@list.ru.

Статья поступила в редакцию 05.05.2024, одобрена после рецензирования 22.07.2024, принята к публикации 26.07.2024.



Особенности визуального программирования для проектирования мостовых сооружений на основе информационного и параметрического моделирования



Вин Ко Мьянт Ту

*Российский университет транспорта, Москва, Россия / Магуэ, Мьянма.
ORCID 0009-0001-1751-5348.
✉ winkomyinthu@mail.ru.*

ВИН КО МЬИНТ ТУ

АННОТАЦИЯ

Технический прогресс значительно способствовал расширению внедрения информационного моделирования зданий (BIM) в управление строительными проектами. Несмотря на это, подход BIM в основном применялся к проектам строительства зданий, при этом инфраструктурным проектам, таким как мосты, уделялось ограниченное внимание.

Эти типы проектов часто имеют значительные геометрические и семантические различия между структурами, что затрудняет использование существующих схем данных BIM. Недавние исследования показывают, что параметрическое моделирование может обеспечить жизнеспособное решение, позволяющее повысить эффективность проектирования и функциональную совместимость. Однако количество существующих научных источников по этой теме остается весьма ограниченным. Цель исследования, представленного в статье, – устранить этот пробел в знаниях

путем разработки параметрических мостовых элементов, способных генерировать все типы мостовых конструкций из одного параметрического файла.

Параметрические скрипты, использованные в этом исследовании, были разработаны с использованием языка визуального программирования Grasshopper и впоследствии интегрированы в Tekla Structures, популярное программное обеспечение BIM для целей моделирования. Полученная в результате интеграция BIM позволяет исследовать и создавать перспективные проекты со сложной геометрией, что в конечном итоге приводит к получению экономически эффективных решений. По сравнению с традиционными методологиями проектирования, полученные результаты демонстрируют существенные улучшения с точки зрения экономии времени, повышенной гибкости проектирования и оптимизированных конструктивных характеристик.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, BIM, мост, параметрическое моделирование, элемент моста, программирование, Tekla Structures, Grasshopper.

Для цитирования: Вин Ко Мьянт Ту Особенности визуального программирования для проектирования мостовых сооружений на основе информационного и параметрического моделирования // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-5>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Технологии, используемые в области архитектуры, инжиниринга, строительства и эксплуатации (AECO), постоянно совершенствуются, но при этом также ускоряется и рост новых требований к ним. Крупные инфраструктурные проекты, такие как мосты, становятся все более распространенными, что требует разработки новых технологий для создания планов и документов, а также обработки изменений и поступающей информации в процессе проектирования.

Прежнее программное обеспечение для создания чертежей (например, AutoCAD) позволяло создавать проектную документацию, хранить ее в электронном виде и вносить необходимые изменения. Однако такой подход вытесняется информационным моделированием, которое предлагает значительные преимущества с точки зрения интеграции данных. В результате системы BIM генерируют объектно-ориентированную трехмерную модель, связанную с базой данных всех элементов и материалов. Архитектурный дизайн (геометрия строительных элементов, пространственные соотношения, связность), структурный дизайн (проектная документация, структурная схема) и информация о процессах строительства и технического обслуживания здания – все это включено в систему информационного моделирования [1].

Проектирование мостовых элементов является важнейшим аспектом развития инфраструктуры, требующим тщательного учета различных факторов, таких как целостность конструкции, долговечность, эстетика и воздействие на окружающую среду. Традиционный ручной процесс проектирования может быть трудоемким, подверженным ошибкам и приводить к длительным циклам проектирования. Обзор некоторых публикаций (например, [2]) показал, что параметрический подход к проектированию является одним из методов повышения эффективности этого процесса и функциональной совместимости.

Технологии информационного и параметрического моделирования все шире используются в проектировании инфраструктуры благодаря инструментам проектирования BIM [3]. Использование информационного и параметрического моделирования улучшает процесс проектирования за счет сокращения времени и усилий [4; 5]. Метод основан на введении параметров и численных зависи-

мости между элементами для создания гибких моделей. Геометрия реализована в параметрическом моделировании с использованием языка программирования, и большинство ситуаций параметрического моделирования сосредоточены вокруг визуальных сценариев [6].

Цель исследования – разработка параметрических мостовых элементов, способных генерировать все типы мостовых конструкций из одного параметрического файла.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методология. Преимущества параметрического моделирования

При параметрическом моделировании разработчик скрипта вводит параметры, которые служат основой для создания геометрии и последующего выполнения всех необходимых анализов и вычислений. Для упрощения процесса сложные конструкции могут быть разделены на управляемые компоненты, такие как главный мост, подъездные мосты и вспомогательные сооружения. Затем, объединив эти отдельные разделы, можно создать единую визуальную модель, обеспечивающую всестороннее представление об общей структуре.

Методология, описанная в этой статье, направлена на преодоление ограничений, возникающих в процессе проектирования, путем использования инструментов, доступных в среде Grasshopper, которая использует визуальные скрипты и не требует от проектировщика умения программировать.

В статье также рассмотрены примеры разработанных параметрических мостовых элементов, при использовании которых можно ускорить процесс создания и изменения параметрических моделей сооружения без необходимости в ручной настройке отдельных компонентов. Это нововведение направлено на оптимизацию процесса проектирования, повышение производительности работы и снижение вероятности ошибок. Параметрические элементы, необходимые в проекте, разрабатываются в среде BIM, а затем соединяются, образуя единый структурный организм. Прямая связь Grasshopper – Tekla Structures позволяет завершить весь процесс. Благодаря прямым связям между программным обеспечением, таким как Tekla Structures, и инструментами визуального программирования, такими как Grasshopper,

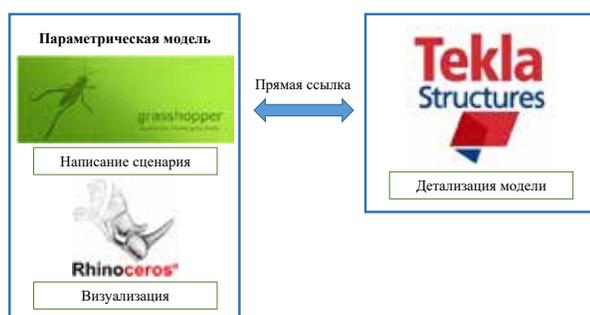


Рис. 1. Рабочий процесс между Grasshopper и Tekla Structures [выполнено автором].



Рис. 2. Простой скрипт Grasshopper для бетонных опор моста [выполнено автором].

проектировщики могут реализовать рабочий процесс без опыта программирования. Процесс взаимодействия между программами информационного моделирования и визуального программирования кратко представлен на рис. 1.

Этапы создания параметрических элементов

Применение алгоритмического проектирования в строительстве мостов открывает многообещающие возможности для инноваций. Чтобы проиллюстрировать этот потенциал, рассмотрим пример создания параметрических элементов для моста в Республике Мьянма.

Мост всегда строится с нуля, от опор до проезжей части [7]. Это хорошо подходит для моделирования. В среде Grasshopper пользователь может определить ось моста, указав три точки (координаты начальной, средней и конечной точек), или непосредственно извлечь кривую из оси моста, повторно проведя параметризацию геометрии, полученной в результате прямого моделирования с использованием элемента «curve». Затем пользователь может просто создать сценарий для строительства опор в соответствии с осью моста. Чтобы получить стабильную и удобную для проектировщика модель, пользователи могут разбить модель на несколько

подмоделей, связанных с каждым элементом моста (проезжей частью, опорами, ограждениями и т.д.). На рис. 2 показан сценарий, разработанный для опор моста.

Следующим этапом является проектирование элементов балок моста. Балки служат основной опорой для настила моста и передают вес на опоры. Поскольку форма «I» (двутавр) конструктивно эффективна, балки часто имеют эту форму. Верхний и нижний фланцы в форме буквы «I» обеспечивают горизонтальную поддержку и устойчивость к изгибу, в то время как вертикальная перемычка соединяет два фланца и обеспечивает устойчивость к давлению сдвига. В Grasshopper двутавровые балки создаются путем предварительного задания профиля, а затем используются различные элементы для построения геометрии. Балки сконструированы таким образом, чтобы пользователь мог изменять технические характеристики сечения по своему желанию.

Балка создается с использованием полилиний, которые затем сегментируются на основе точек соединения или спецификаций длины. В структурной модели могут быть определены области, в которых изменяются свойства балки, такие как эффективная ширина бетонных элементов или свойства поперечного сечения сплошной балки. Эти параметры можно изменять с помощью параметрического подхода. Например, параметриче-



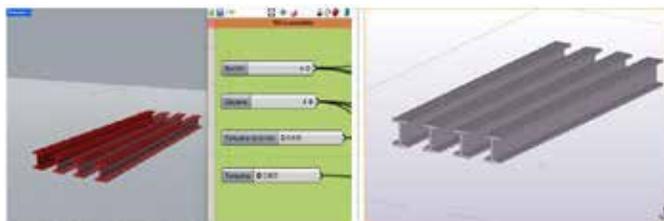


Рис. 3. Параметрические двутавровые балки в Grasshopper и Tekla Structures [выполнено автором].

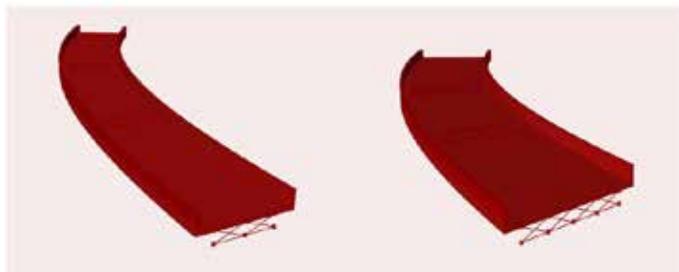


Рис. 4. Количество балок определяет изменение проезжей части моста [выполнено автором].

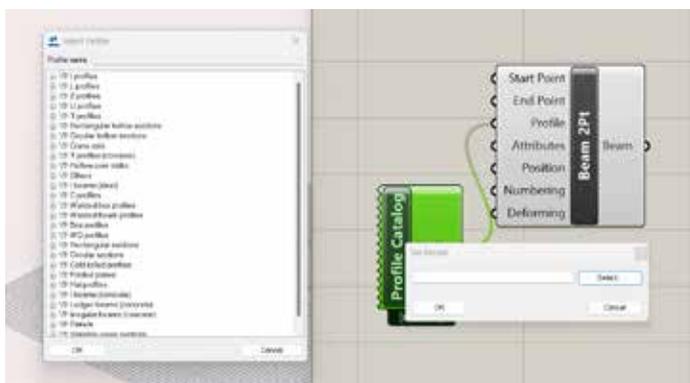


Рис. 5. Большое количество профилей в плагине Tekla в Grasshopper [выполнено автором].

ская двутавровая балка была создана с использованием алгоритма, основанного на BIM (рис. 3), что демонстрирует потенциал этого подхода.

Создание пролетного строения, как правило, один из сложных аспектов для проектировщиков из-за уникальности входных данных, которые представляют собой направляющую кривую для моста [8]. При расстановке опор учитывается длина моста и другие характеристики. Скрипт позволяет создавать опоры различной длины и соединять их с основными или поперечными балками [9]. В процессе моделирования можно выбирать различные типы профиля поперечных балок и их количество в зависимости от особенностей проекта. Чтобы подтвердить адаптивность к изменениям значений параметров и условий, процесс генерации геометрии проходит несколько этапов. Как только модель моста Grasshopper будет завершена, ее

можно использовать в качестве шаблона для других проектов, подключив ее к базе данных [10; 11]. Результат использования параметризации ширины проезжей части моста и то, как она изменяется при изменении параметра, связанного с количеством балок, показан на рис. 4.

С помощью прямых соединений между программным обеспечением BIM, таким как Tekla Structures, и инструментами визуального программирования, такими как Grasshopper, проектировщики могут реализовать параметрический рабочий процесс без предварительного опыта программирования [12].

При желании пользователю достаточно сгенерировать элемент на базе Grasshopper, добавить его в каталог компонентов Tekla, и с легкостью использовать. Поскольку Tekla предлагает обширную библиотеку профилей для различных секций (рис. 5), программное

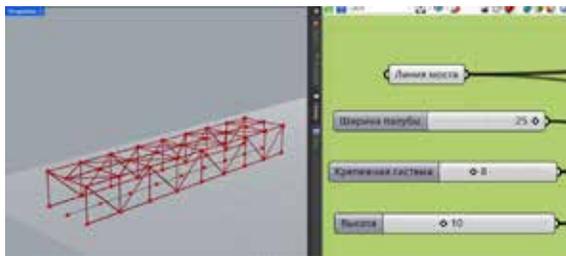


Рис. 6. Параметрическая секция фермы в Grasshopper [выполнено автором].

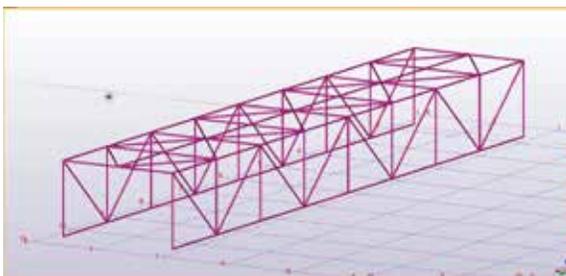


Рис. 7. Параметрическая секция фермы в Tekla Structures [выполнено автором].

обеспечение особенно эффективно при разработке параметрических деталей для мостов [13].

Работая над автоматизированным проектированием с использованием алгоритмов, проектировщики могут преодолеть ограничения стандартного программного обеспечения САПР и инструментов компьютерной 3D-графики, достигая степени сложности, превышающей способность человека взаимодействовать с цифровыми объектами [14]. Чтобы воспользоваться преимуществами этих возможностей, оператор должен быть знаком с основами языков программирования, таких как C# или Python.

Упрощенная параметрическая конструкция металлической фермы для моста показана в заключительном разделе этого исследования. Целью является разработка простого и эффективного процесса, полезного на этапе концептуального проектирования, ранних проверок и принятия решений, поскольку мы продолжаем работать над параметрическими элементами всех многочисленных типов мостов, которые предлагает Grasshopper.

Создание параметрического фрейма в Grasshopper предполагает использование различных элементов и инструментов для определения параметров, взаимосвязей и геометрии. Для создания такой конструкции необходимо определить ключевые параметры, установить алгоритмы или математические соотношения, управляющие геометрией кар-

каса и структурными элементами, и использовать элементы Grasshopper для преобразования этих правил в параметрическую трехмерную модель. Благодаря этому итеративному процессу проектировщики могут усовершенствовать и оптимизировать конструкцию в соответствии с поставленными целями и ограничениями. Конечным результатом является параметрическая ферма, которая легко адаптируется к меняющимся требованиям дизайна и автоматически обновляется в Tekla Structures (рис. 6; 7).

ВЫВОДЫ

Интеграция современных технологий в проектирование, строительство и эксплуатацию транспортной инфраструктуры позволяет находить эффективные и оптимальные решения на любом этапе жизненного цикла сооружения [15; 16]. Используя подключаемые модули для объединения специализированного программного обеспечения с информационным моделированием, операторы и проектировщики могут свести к минимуму вероятность ошибок и оптимизировать процесс проектирования. Внедрение дополнительных программ и подключаемых модулей облегчает создание информационной модели моста, а также выполнение необходимых вычислений на любом этапе эксплуатации объекта с учетом результатов мониторинга. Кроме того, параметрическое моделирование позволяет инженерам работать со сложной геометрией, автоматизировать повторяю-



щиеся задачи проектирования и создавать индивидуальные рабочие процессы, тем самым оптимизируя процесс проектирования и повышая общую эффективность.

В представленной работе параметрические элементы для мостов создаются с использованием дополнения Grasshopper, визуального языка программирования и среды, что позволяет создавать гибкую генеративную модель, готовую для тестирования в Tekla Structures. Алгоритм генерирует геометрию элементов моста на основе параметрических входных параметров, при этом каждый конструктивный элемент имеет свой собственный набор входных значений, которые определяют размеры геометрии. Изменяя эти входные значения, можно изменять ширину, высоту, длину и угол наклона отдельных конструктивных элементов. Запрос оператора определяет, какие значения необходимо параметризовать, что позволяет вносить эффективные и целенаправленные изменения в конструкцию. Предлагаемые визуальные сценарии демонстрируют улучшенную производительность с точки зрения вычислительных затрат и ресурсосберегающего проектирования и анализа, превосходя традиционные несовместимые процессы. Такой подход позволяет эффективно создавать мосты сложной геометрии и облегчает оптимизацию проектных параметров, что в конечном итоге сокращает время и ресурсы, необходимые для проектирования и анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Svoboda, L., Novák, J., Kurilla, L., Zeman, J. A framework for integrated design of algorithmic architectural forms. *Advances in Engineering Software*, 2014, Vol. 72, pp. 109–118. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.05.006.
2. Chokhachian, A. Studies on Architecture Design Procedure A Framework for Parametric Design Thinking. Thesis for: Master of Science in Architecture, Eastern Mediterranean University, 2014. [Электронный ресурс]: <http://i-rep.emu.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11129/1510/ChokhachianAta.pdf?sequence=1>. Доступ 27.12.2023.
3. Quispe, L., Ulloa, W. Application of BIM Tools in Parametric and Generative Design for the Conception of Complex Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, Vol. 1203, 022070. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/2/022070.
4. Смирнова О. В., Чжо З. А. Возможности адаптации программы Tekla при проектировании элементов металлических мостов // *Транспортное строительство*. – 2017. –

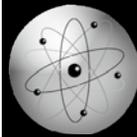
№ 10. – С. 20–21. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34957184>. EDN: XNZIMP.

5. Smirnova, O. V., Smirnov, K. V. Creating automation tools with BIM-programs for designing elements of metal bridges. *Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»*, IT and QM and IS 2017, St. Petersburg, 2017, pp. 773–775. DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085940.
6. Sardone, L., Greco, R., Fiore, A., Moccia, C., Tommasi De, D., Lagaros, N. D. A preliminary study on a variable section beam through Algorithm-Aided Design: A way to connect architectural shape and structural optimization. *Procedia Manufacturing*, 2020, Vol. 44, pp. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.264>.
7. Reis, A. J., Oliveira Pedro, J. J. *Bridge Design: Concepts and Analysis*. Wiley, 2019, 552 p. ISBN: 978–0–470–84363–5.
8. Girardet, A., Boston, C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis. *Automation in Construction*, 2021, Vol. 126, 103679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103679>.
9. Вин Ко Мьянт Ту. Возможности и преимущества использования параметрических скриптов в информационном моделировании мостовых сооружений // *Транспортное строительство*. – 2024. – № 2 – С. 27–29. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67972990>. EDN: AYYRUK.
10. Katz, C. Parametric Description of Bridge Structures. *Proceedings of the IABSE Conference on Information and Communication Technology for Bridges, Buildings and Construction Practice*, Helsinki, Finland, 2008. In: *IABSE Reports*, 2008, No. 94, pp. 17–27. DOI: 10.2749/22213780 8796105847.
11. Humppi, H. Algorithm-Aided Building Information Modeling: Connecting Algorithm-Aided Design and Object-Oriented Design. Tampere University of Technology School of Architecture Master's Thesis, 2015. [Электронный ресурс]: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/123456789/23492/3/Humppi.pdf>. Доступ 15.12.2023.
12. Preisinger, C. Linking Structure and Parametric Geometry. *Architectural Design*, 2013, Vol. 83, Iss. 2, Special Issue: Computation Works: The Building of Algorithmic Thought, pp. 110–113. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1564>.
13. Boretti, V., Sardone, L., Bohórquez Graterón, L. A., Masera, D., Marano, G. C., Domaneschi, M. Algorithm-Aided Design for Composite Bridges. *Buildings*, 2023, Vol. 13, Iss. 4, Special Issue Study on Building Simulation, 865. DOI: 10.3390/buildings13040865.
14. Ibrahim, R., Rahimian, F. P. Comparison of CAD and manual sketching tools for teaching architectural design. *Automation in Construction*, 2010, Vol. 19, Iss 8, pp. 978–987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.003>.
15. Ge Gao, Yu-Shen Liu, Pengpeng Lin, Meng Wang, Ming Gu, Jun-Hai Yong. BIMTag: Concept-based automatic semantic annotation of online BIM product resources. *Advanced Engineering Informatics*, 2017, Iss. 31, pp. 48–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.10.003>.
16. Xichen Chen, Chang-Richards, A., Pelosi, A., Yaodong Jia. Implementation of technologies in the construction industry: a systematic review. *Engineering Construction & Architectural Management*, 2021, Vol. 29, Iss. 8, pp. 3181–3209. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0172>. ●

Информация об авторе:

Вин Ко Мьянт Ту – аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Российского университета транспорта, Москва, Россия / Магуэ, Мьянма, winkomyinthu@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023, актуализирована 29.07.2024, одобрена после рецензирования 26.08.2024, принята к публикации 30.08.2024.



Влияние жидкого груза на частотные характеристики оболочки котла вагона-цистерны



Павел ГРИГОРЬЕВ



Сергей КОРЖИН



Шерзод ИБДУЛЛОВЕВ

Павел Сергеевич Григорьев¹, Сергей Николаевич Коржин², Шерзод Рустамович Ибодуллоев³

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

³ Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Ташкент, Узбекистан.

¹ ORCID 0000-0002-5841-341X; Scopus Author ID: 57966694500; РИНЦ SPIN-код: 2014-9531; РИНЦ Author ID: 841994.

² ORCID 0009-0003-4783-3413; Scopus Author ID: 57223093144; РИНЦ Author ID: 4350996.

³ ORCID 0000-0002-1436-3844; Scopus Author ID: 57982866900; РИНЦ SPIN-код: 8498-3972; РИНЦ Author ID: 947316.

✉ ¹ grigorev.p@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию влияния уровня заполнения жидким грузом на частотные характеристики оболочки котла вагона-цистерны.

В рамках работы применен подход, используемый для оценки частот и форм собственных колебаний стальных резервуаров под воздействием сейсмических нагрузок. Данный подход предполагает учет двух компонентов собственных частот: импульсивной и конвективной. Для определения перечисленных частот и форм собственных колебаний выбран метод конечных элементов с использованием акустических элементов FLUID21. Выбор

метода обоснован в ранее проведенных исследованиях авторов.

С использованием выбранного метода были исследованы конвективные собственные частоты колебаний свободной поверхности жидкости и импульсные частоты собственных колебаний с различным уровнем заполнения жидким грузом котла вагона-цистерны. Подтверждение достоверности результатов для импульсных частот оболочки, содержащей жидкость, обеспечивается согласованностью с данными, полученными авторами в предшествующих работах с использованием полубезмоментной теории оболочек.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, вагон-цистерна, котел вагона-цистерны, частоты колебаний, формы колебаний, свободная поверхность, конвективные частоты, импульсные частоты.

Для цитирования: Григорьев П. С., Коржин С. Н., Ибодуллоев Ш. Р. Влияние жидкого груза на частотные характеристики оболочки котла вагона-цистерны // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-6>.

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

ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки конструкций для железнодорожного подвижного состава основное внимание уделяется проведению всесторонних исследований, цель которых – тщательная оценка динамических характеристик. Такие исследования являются критически важными по причине специфических условий эксплуатации, в которых функционируют вагонные конструкции. В частности, анализ собственных частот колебаний и их модальных форм для грузовых вагонов становится неотъемлемым элементом проектирования¹, обеспечивающим безопасную и надежную работу конструкции вагона. Понимание частотных характеристик конструкций позволяет инженерам предотвращать опасные резонансные явления, которые способны привести к аварийным ситуациям.

Основная цель исследования – оценка собственных частот и форм колебаний оболочки котла вагона-цистерны. Одной из ключевых проблем, усложняющих процесс расчета этих параметров, является необходимость учета характеристик перевозимого груза. В связи с этим основной задачей исследования становится учет взаимодействия груза с конструкцией котла вагона-цистерны, которое, как показывают практика и теоретические исследования, оказывает заметное влияние на частотные характеристики системы. В практике расчетов учет жидкости в резервуарах, подвергающихся различного рода динамическим нагрузкам, требует особого внимания при проектировании для обеспечения безопасности и надежности конструкции.

ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ

Задачам подобного рода уделяется большое внимание в области расчетов стальных резервуаров на сейсмические воздействия. Основы расчетов математической модели системы «резервуар – жидкость» заложил в 1954 году в своей работе Дж. Хаузнер [1]. В этом подходе рассматривалась упрощенная математическая модель, состоящая из системы дискретных масс, что позволяло существенно облегчить процесс вычисления сил гидродинамики. Предложенная модель вклю-

¹ ГОСТ 33788-2016 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества». [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200137251>. Доступ 21.02.2024.

чала два вида кинематической свободы: импульсивную, которая относилась к движению оболочки резервуара вместе с основной массой его содержимого, и конвективную, связанную с движением волн на поверхности жидкости внутри. Основываясь на предположении, что стенки контейнера абсолютно недеформируемы, а жидкость идеально несжимаема и не имеет внутреннего трения, Хаузнер применил упрощенные вычислительные подходы для вывода формул, касающихся ряда различных типов контейнеров, включая цилиндрические. В настоящее время в ряде зарубежных стран для резервуаров с гибкими стенками используется модель Харуна и Хаузнера [2], а для резервуаров с жесткими стенками – модель Велетсоса и Янга [3]. В отечественной практике расчетов распространение получили рекомендации, предложенные И. И. Гольденблатом и Н. А. Николаенко [4].

Для рассматриваемой задачи представляет интерес выражение для определения частоты плескания свободной поверхности жидкости:

$$\omega_n = \frac{g}{R} \lambda_n \operatorname{th} \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right), \quad (1)$$

где λ_n – нули модифицированной функции Бесселя (для определения первой формы волны плескания λ_n принимается равной 1,84);

n – форма колебаний;

g – ускорение свободного падения;

H – высота цилиндрического резервуара;

R – внутренний радиус резервуара.

Несмотря на достаточно обширные исследования в области оценки частот резервуаров с жидкостью, учитывающих как конвективные, так и импульсивные частоты, применительно к оболочкам котлов вагонов-цистерн такие расчеты не выполнялись. В работах [5; 6] рассматриваются аналитические подходы к оценке частотных характеристик оболочек котлов вагонов-цистерн с учетом уровня заполнения их жидким грузом. Результаты этих расчетов показали удовлетворительное согласование с результатами, полученными исследователями ранее [6], и результатами, полученными на основе экспериментальных исследований [7; 8].

В статье [9] авторами были рассмотрены подходы к оценке собственных частот котлов вагонов-цистерн и различные способы оценки влияния жидкости на собственные колебания с использованием численных методов. К таким

методам относятся анализ собственных частот с применением расширения Acoustic body, учет жидкости как распределенной массы, моделирование жидкости в виде твердого тела, использование элемента FLUID80 и применение акустических элементов.

Согласно результатам проведенного исследования, наиболее приемлемым оказался подход, заключающийся в учете жидкости внутри цистерны с использованием акустических элементов.

В статье [10] показан пример расчета частотных характеристик, включая собственные частоты и формы колебаний квадратного резервуара методом конечных элементов с использованием акустических элементов FLUID221. Этот подход позволил оценить импульсивные и конвективные частоты резервуара при разных уровнях наполнения и различных условиях. Достоверность рассмотренного подхода подробно описана в работах [11; 12] путем сравнения различных аналитических и численных методов оценки частот собственных колебаний системы «механическая система – жидкость» или так называемого взаимодействия жидкости и конструкции (Fluid Structure Interaction, FSI).

В работе [11] рассматривалось несколько вариантов численного моделирования учета жидкости как акустического тела, в том числе как элемента жидкости FLUID80 и как различных типов акустического элемента жидкости FLUID30/220/221.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ FLUID80

Элемент FLUID80 представляет собой отдельный элемент жидкости, который использует такие свойства материала, как плотность (DENS) и модуль объемного сжатия (EX). Для моделирования взаимодействия жидкости и твердого тела на интерфейсе FSI используются отдельные, но совпадающие узлы. Эти узлы соединены с твердым телом таким образом, что они могут скользить в тангенциальном направлении относительно тела, но связаны в нормальном направлении. Достичь этого можно путем создания соответствующих сеток на границе раздела жидкости с твердым телом и на интерфейсе твердого тела с жидкостью. Затем совпадающие узлы соединяются в нормальном направлении. Эти элементы обладают степенями свободы UX, UY и UZ. В исследованиях [13; 14] данный

элемент применен при моделировании резервуаров для хранения жидкости. Отметим, что блочный решатель Ланцоша [15; 16] также подходит для этих элементов. Элемент может генерировать несколько низкочастотных плескающихся форм колебаний жидкости, которые могут возникать при незначительном движении твердых тел или даже при отсутствии движения. Поэтому рекомендуется пропускать или игнорировать низкочастотные моды жидкости при оценке импульсных частот собственных колебаний. Эти моды также могут быть идентифицированы по их малому коэффициенту массового участия.

FLUID30, FLUID220 и FLUID221

FLUID30 представляет собой элемент акустической жидкости, который имеет общие узлы с соседними твердотельными элементами. Этот элемент использует плотность жидкости (DENS) и скорость звука (SONC) для определения свойств материала. Ранее элемент FLUID30 использовал несимметричную матрицу, из-за чего требовался несимметричный решатель. Соответственно, модальный анализ не мог сопровождаться анализом вынужденного отклика и спектральной плотности мощности. Для моделирования взаимодействия жидкости и твердого тела (FSI) использовались два типа элементов FLUID30: жидкость, прилегающая к твердому телу, и жидкость, не соприкасающаяся с твердым телом. Жидкость, прилегающая к твердому телу, имеет степени свободы UX, UY, UZ и давление (PRES) для описания взаимодействия между твердым телом и жидкостью. Жидкость, которая не взаимодействует с твердым телом, имеет только степень свободы PRES для взаимодействия с другими элементами жидкости. Позже стали использоваться элементы FLUID30, позволяющие создавать симметричную матрицу. В отличие от элементов FLUID80, элементы FLUID30 менее чувствительны к плотности сетки.

FLUID220 и FLUID221 – это более высокопорядковые варианты FLUID30.

На основе проведенного анализа практических расчетов будем применять элемент FLUID221, который является трехмерным твердотельным 20-узловым элементом высшего порядка (см. рис. 1). Элемент FLUID221 используется для моделирования жидкой среды и границы раздела в задачах взаимодействия жидкости с конструкцией.



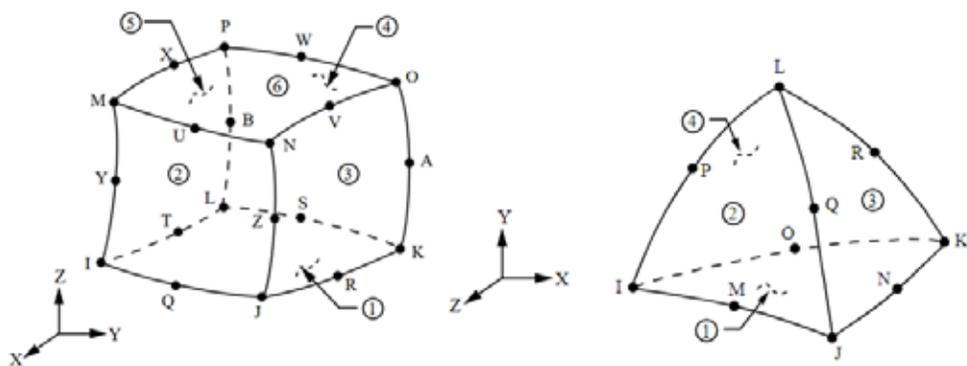


Рис. 1. Геометрия, расположение узлов и система координат элемента FLUID220 (слева) и FLUID221 (справа) [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_FLUID220.html; https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_FLUID221.html].

Исходные данные

Далее в расчетах будем использовать следующие исходные данные, представленные в таблице 1.

При дальнейших расчетах приняты следующие допущения:

- жидкость идеальная, несжимаемая;
- движение жидкости безвихревое;
- оболочка котла идеальной цилиндрической формы с эллиптическими днищами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 и 3 представлена исследуемая твердотельная модель.

Для наглядности на рис. 3 изображена модель, разрезанная в плоскости XOY, и показан уровень заполнения, соответствующий 90° (или коэффициенту заполнения, равному 0,5).

Разбиение модели на элементы выполнялось следующим образом: для твердого тела использовались элементы типа SOLID187, для жидкости – FLUID221, а контакт взаимо-

действия между твердым телом и жидкостью обеспечивался с помощью элементов CONTA174. Элемент CONTA174 необходим для создания контакта скольжения между элементами твердого тела и жидкости.

Первые формы колебаний импульсных и конвективных частот представлены на рис. 4 и 5 соответственно. В таблице 2 приведены результаты, полученные с использованием метода конечных элементов и на основе энергетического подхода [9], предложенного авторами с использованием полубезмоментной теории оболочек. При сравнении результатов расчетов было установлено, что они достаточно хорошо коррелируют между собой и находятся в одном диапазоне частот. Считаем эти результаты удовлетворительными.

Оценим влияние жидкости на частоты собственных колебаний самой оболочки, то есть на так называемые импульсные частоты. Из таблицы 2 ясно видно, что с увеличением уровня заполнения собственная частота коле-

Таблица 1

Исходные данные [выполнено авторами]

Обозначение	Название	Параметр	Размерность
E	Модуль упругости материала котла	210	ГПа
μ	Коэффициент Пуассона	0,3	–
g	Ускорение свободного падения	9,81	м/с ²
$\rho_{ст}$	Плотность материала оболочки	7850	кг/м ³
$\rho_{ж}$	Плотность материала жидкого груза	1000	кг/м ³
C	Скорость в акустической среде жидкого груза	1435	м/с ²
D	Диаметр цилиндрической части оболочки внутренний	3	м
h	Толщина оболочки котла	10	мм
$L_{ц}$	Длина цилиндрической части оболочки	17	м
$L_{эл}$	Длина вылета эллиптического днища	0,45	м
$\beta_{нал}$	Угол налива жидким грузом	0° – 180°	–

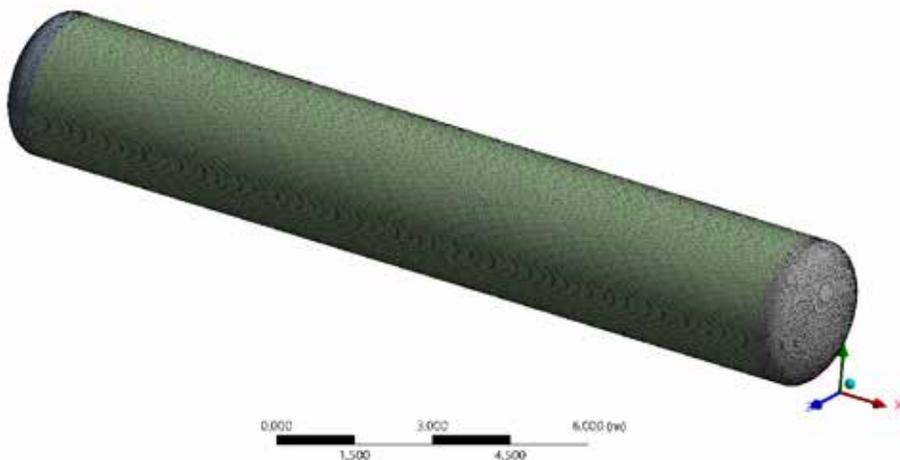


Рис. 2. Общий вид твердотельной модели [выполнено авторами].

F: Copy of Импульсн_17 м_10 мм_90 град
Solution
Frequency: N/A
15.01.2024 17:49

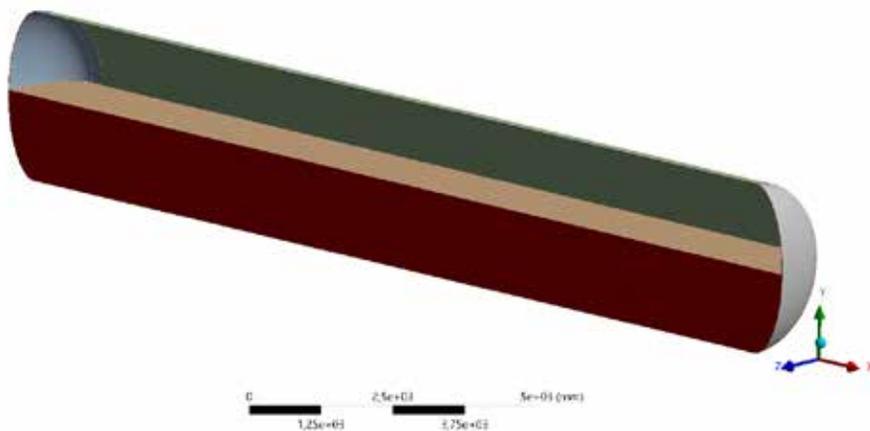


Рис. 3. Конечно-элементная модель оболочки котла [выполнено авторами].

E: Импульсн_17 м_10 мм_90 град
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 4,8051 Hz
Swirling Phase: 0, °
Unit: mm
22.02.2024 16:45

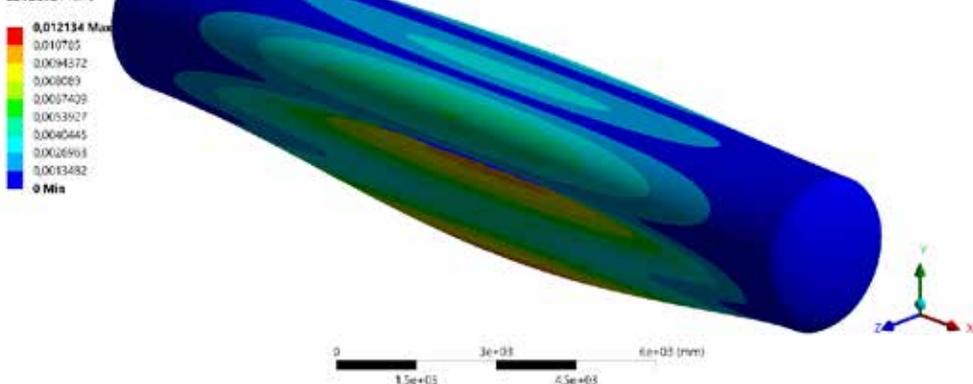


Рис. 4. Первая собственная форма импульсных колебаний оболочки котла вагона-цистерны, заполненной жидкостью [выполнено авторами].



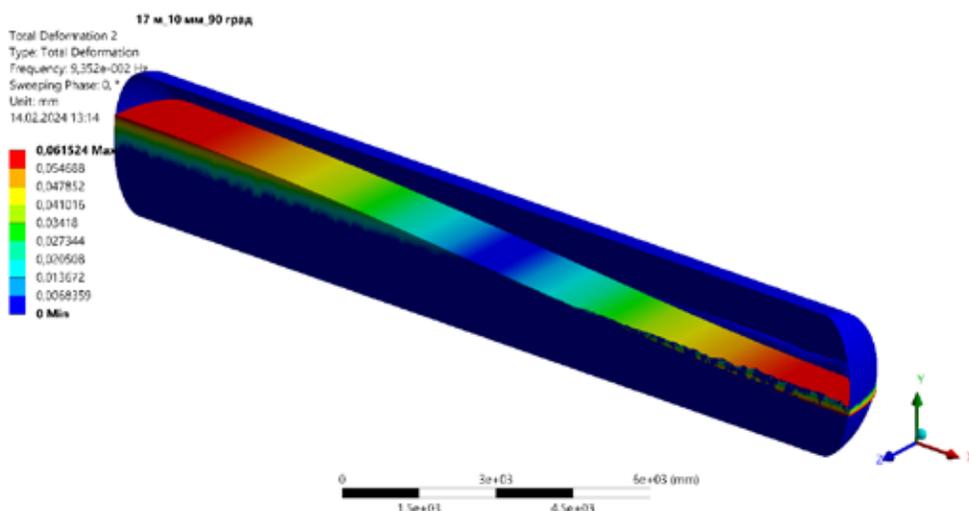


Рис. 5. Первая конвективная форма колебаний свободной поверхности жидкости [выполнено авторами].

баний снижается. Например, при изменении уровня заполнения с 0° до 171° собственная частота колебаний оболочки котла рассматриваемой модели уменьшается более чем на 50 %.

Отдельного внимания заслуживают конвективные частоты. Изучение плескания жидкости в котле вагона-цистерны является актуальной и достаточно сложной задачей. В таблице 2 напротив каждого уровня заполнения представлены две частоты импульсных колебаний свободной поверхности жидкости $f_{конв}$. Первая частота соответствует одной полуволне колебаний жидкости в продольном направлении; вторая – одной полуволне колебаний жидкости в поперечном направлении. По нашему мнению, эти виды колебаний жидкости легко возбуждаются при движении вагона-цистерны по неровностям пути. На-

пример, если котел вагона-цистерны заполнен на угол налива 153° и происходят вынужденные колебания с частотой галопирования 0,19 Гц, это может привести к движениям жидкости, оказывающим влияние на динамику вагона.

ВЫВОДЫ

Был проведен расчет частот и форм собственных колебаний оболочки котла вагона-цистерны с учетом различного уровня заполнения его жидким грузом. Расчет выполнялся с использованием метода конечных элементов, в котором применен элемент FLUID221. Такой подход позволил получить два вида собственных частот – импульсные и конвективные. Результаты расчетов показали удовлетворительную сходимость с подходами, предложенными авторами для решения по-

Таблица 2
Расчетные значения импульсных и конвективных частот [выполнено авторами]

Угол налива	Собственная частота оболочки с учетом жидкости (импульсная частота)		Собственная частота свободной поверхности жидкости (конвективная частота)	
	$f_{имп}, Гц$	МКЭ	$f_{конв}, Гц$	МКЭ
171°	4,12	4,24	0,32	–
153°	4,17	4,35	0,19	0,83
126°	4,15	4,52	0,13	0,59
90°	5,45	4,86	0,093	0,47
54°	7,69	6,21	0,057	0,42
0°	10,81	10,89	–	

добных задач в их предыдущих работах, основанных на энергетических подходах и теории оболочек.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- применение метода конечных элементов и энергетического подхода на основе теории оболочек дает схожие результаты при оценке импульсных частот собственных колебаний;
- применяемый в исследовании подход позволяет оценить конвективные собственные частоты свободной поверхности жидкости, которые значительно ниже импульсных частот;
- заполнение котла вагона-цистерны жидким грузом существенно снижает собственную частоту его оболочки (для рассмотренного случая заполнение жидкостью приводит к уменьшению собственной частоты котла более чем на 57 %);
- конвективная частота свободной поверхности жидкости увеличивается с ростом уровня заполнения жидким грузом;
- в расчетах котлов вагонов-цистерн на прочность следует уделять внимание изменению собственной частоты его оболочки при заполнении их жидким грузом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Housner, G. W. Earthquake Pressures on Fluid Containers. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1954, 42 p.
2. Haroun, M. A., Housner, G. W. Seismic design of liquid storage tanks. Journal of the Technical Councils of ASCE, 1981, Vol. 107, Iss. 1, pp. 191–207. DOI: <https://doi.org/10.1061/JTACAD9.0000080>.
3. Veletsos, A. S., Yang, J. Y. Earthquake response of liquid storage tanks. In: Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics, Second Annual Engineering Mechanics Division Specialty Conference, Raleigh, North Carolina, United States, May 23–25, 1977, 616 p., pp. 1–24.
4. Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Штоль А. Т., Тумасов В. Р. Рекомендации по расчету резервуаров и газгольдеров на сейсмические воздействия // Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1969. – 47 с.
5. Григорьев П. С., Суворова К. Е. Оценка частот собственных колебаний и динамических напряжений в оболочке котла цистерны // Изв. петербургского ун-та путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 637–643.

6. Чан Фу Тхуан, Григорьев П. С., Суворова К. Е. Расчетные зависимости и оценки частот и форм колебаний оболочки котлов цистерн // Мир транспорта. – 2018. – № 5 (78). – С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-5-7>.

7. Морзинова Т. Г. Колебания оболочек котлов цистерн с учетом их конструктивных особенностей / Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 1983. – 118 с.

8. Беспалько С. В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов / Дис. ... докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2000. – 427 с.

9. Григорьев П. С., Чан Фу Тхуан, Ибодуллоев Ш. Р. Подходы к оценке собственных частот котлов вагонов-цистерн с учетом влияния жидкости // Рахматулинские чтения: Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. / сост. А. Х. Закиров, Ш. Р. Ибодуллоев. – Ташкент: Нац. ун-т Узбекистана, 2023. – С. 51–52.

10. Anagha, B. V., Nimisha, P., Jayalekshmi, B. R. A study on effect of fluid on the modal characteristics of ground supported water tanks. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 936, Iss. 1, 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/936/1/012027>.

11. Rafatpanah, R. M., Yang, Jianfeng. Simulating fluid-structure interaction utilizing three-dimensional acoustic fluid elements for reactor equipment system model. Proceedings of the 23rd international conference on nuclear engineering, 2015, ICONE23–1732, pp. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2015.23._ICONE23-1_362.

12. Chiu, J., Brown, A. M. Characterization of the modal characteristics of structures operating in dense liquid turbopumps. In: ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 26–30, 2017, Charlotte, North Carolina, USA. Vol. 7B: Structures and Dynamics, ISBN: 978-0-7918-5093-0, paper No. GT2017-63633, V07BT36A008. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2017-63633> [Ограниченный доступ].

13. Kangda, M. Z. An approach to finite element modeling of liquid storage tanks in ANSYS: A review. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, Vol. 6, Iss. 4, 226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00589-8>.

14. Jhung, Myung-Jo; Yu, Seon-Oh; Lim, Yeong-Taek. Dynamic characteristics of a partially fluid filled cylindrical shell. Nuclear Engineering and Technology, 2011, Vol. 43, Iss. 2, pp. 167–174. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.2011.43.2.167>.

15. Вахидов У. Ш., Согин А. В., Шапкин В. А., Шапкина Ю. В. Численные исследования колебаний узлов автомобилей // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 3 (105). – С. 145–153. [Электронный ресурс]: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2014/03/145–153.pdf>. Доступ 19.02.2024.

16. Zhang, X., Zhao, Y., Li, Sh. FEM modal analysis of vehicle frame based on ANSYS. 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), Xianning, China, 2011, pp. 2237–2240. DOI: <https://doi.org/10.1109/CECNET.2011.5768490> [Ограниченный доступ]. ●

Информация об авторах:

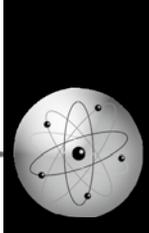
Григорьев Павел Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электропоездов и локомотивов Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта, Москва, Россия, grigorev.p@gmail.com.

Коржин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта, Москва, Россия, korjin@mit.ru.

Ибодуллоев Шерзод Рустамович – старший преподаватель кафедры механики и компьютерного моделирования Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Узбекистан, sherzod_uztmu@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 20.02.2024, одобрена после рецензирования 28.04.2024, принята к публикации 30.04.2024.





ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.371.21

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-7>

Анализ уровня патентной активности в области гоночных автомобилей



Роман НИКОЛАЕВ



Ольга ЖДАНОВИЧ

Роман Сергеевич Николаев¹,
Ольга Андреевна Жданович²

^{1, 2}Московский политехнический университет,
Москва, Россия.

²РИНЦ SPIN-код: 9956-6500; РИНЦ Author ID:
711591.

✉ ¹ r.s.nikolaev@mospolytech.ru.

✉ ² o.a.zhdanovich@mospolytech.ru.

АННОТАЦИЯ

Автоспорт является одной из наиболее быстроразвивающихся технологических сфер, а технические решения, касающиеся гоночных автомобилей, нередко впоследствии внедряются в гражданское автомобилестроение. Таким образом, развитие гоночных автомобилей оказывает прямое влияние на развитие автомобильной отрасли в целом.

В рамках исследования посредством обращения к патентным базам данных был проведен патентный поиск в области гоночных автомобилей, выполнен патентный анализ рынка, а также рассмотрены особенности патентования отдельных технических решений. Целью являлось выявление тенденций развития патентной активности в области технологий гоночных автомобилей. В числе задач

было выявление стран и организаций, занимающих лидирующие позиции по заявительской и патентной активности, установление общей для них тенденции касательно технологий гоночных автомобилей. По результатам анализа выявлена общая динамика развития технологий, характеризующаяся периодами уверенного роста и спада активности, а также определено абсолютное лидерство Китая и китайских организаций в отношении количества заявок и патентов. Данное исследование может быть применимо как для определения динамики развития технологий в области гоночных автомобилей, так и для установления уровня интереса отдельных стран, исследователей и организаций к данной области.

Ключевые слова: гоночный автомобиль, автоспорт, патентный анализ, автомобильный транспорт, болид.

Благодарность: данная статья была создана в процессе реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Для цитирования: Николаев Р. С., Жданович О. А. Анализ уровня патентной активности в области гоночных автомобилей // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-7>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Автоспорт – одна из самых быстроразвивающихся технологических областей, требующая, в силу соревновательного характера, постоянного совершенствования. Эта большая индустрия играет немаловажную роль в экономическом секторе, привлекая туристов и болельщиков со всего мира. Однако с ростом популярности автоспорта растут и проблемы, связанные, в том числе, с его технологической стороной. Например, опасность представляет воздействие данного вида спорта на экологию [1]. Для решения данной проблемы непрерывно происходит процесс модернизации технологий: например, в автоспорт интегрируются гибридные силовые установки. Таким образом, появляются новые технологии, нуждающиеся в юридической защите как результаты интеллектуальной деятельности.

Охрана результатов интеллектуальной деятельности в области гоночных автомобилей имеет свою особенную специфику. Часто изобретения в данной области не ограничиваются только рамками гоночных соревнований, но также применяются и в гражданском автомобилестроении. Результаты интеллектуальной собственности, касающиеся гоночных автомобилей, описывают не только сами гоночные болиды, но и устройства, необходимые для их функционирования, особенности конструкции, детали, системы управления и многое другое. Можно сказать, что автоспорт является своеобразным «полигоном» для автомобилестроительных компаний, желающих протестировать новейшие технологические достижения. Кроме того, гоночные соревнования являются сильным стимулом к развитию технологий, так как во многом автоспорт основывается на технологической гонке, вынуждающей участников постоянно модернизировать и развивать собственные разработки. В связи с этим актуальны научные исследования, например, касающиеся развития автоспорта в рамках отдельного муниципального образования [2], для которого автомобилестроение является градообразующей отраслью. Еще более распространены научные работы, анализирующие техническую сторону, в частности особенности конструкции гоночных автомобилей (например, [3–8]). Следует упомянуть и научные работы, описывающие различные электронные системы для гоночных автомобилей (например, [9–15]).

Целью предлагаемого исследования является анализ технологий гоночных автомобилей с помощью инструментов патентного поиска.

Патентный поиск осуществлялся с помощью патентной базы данных Espacenet¹ по ключевым словам (racing AND car OR racing vehicle; bolide AND car OR bolide AND vehicle; motorsport AND car OR motorsport AND vehicle; formula AND car OR formula AND vehicle), в ретроспективе 2012–2022 годов, с ограничением по МПК (Международная патентная классификация) (B60, B62, B65, B66, F16, G01, G05, G06, H01, H02, H08) и без ограничений по странам приоритетной заявки. При анализе патентной активности учитывались только патенты на изобретения и полезные модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Подходы к анализу показателей патентования

Главным отличием защиты интеллектуальной собственности, касающейся технологий гоночных автомобилей, является то, что сохранить тайну производства в рамках гоночных соревнований довольно затруднительно, так как согласно спортивному регламенту, строго запрещается покрывать какую-либо часть автомобиля экранами, крышками и другими частями, способными скрыть конструкцию как всего автомобиля, так и отдельных деталей (например, [16]). Конечно, конкуренты не имеют доступ к технической стороне конструкций (чертежи и другая техническая документация), но инженеры-специалисты в данной области способны различить изобретательское новшество даже со стороны.

Чаще всего авторы прибегают к фиксации авторских прав в отношении таких разработок с помощью публикации научных статей, в которых в той или иной степени описывается техническое решение, поскольку это во многих случаях быстрее и проще.

Поэтому можно заранее отметить довольно низкий уровень патентования в сфере гоночных автомобилей. На это есть несколько причин:

- Развитие отрасли настолько стремительно, что патентование новых технологий

¹ [Электронный ресурс]: <https://worldwide.espacenet.com/>.



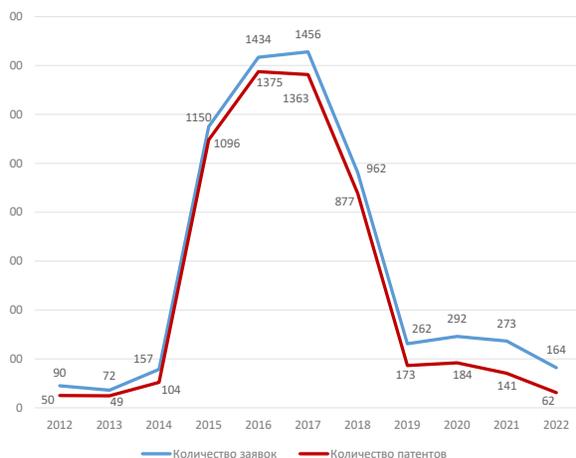


Рис. 1. Динамика заявок и патентов за период 2012–2022 годов [по данным патентной базы данных Espasenet¹].

становится бессмысленным. Техническое решение может потерять актуальность уже в течение 3–4 месяцев, а процедура получения патента занимает крайне продолжительное время, критическое для столь быстроразвивающейся отрасли.

- Конкуренты могут с легкостью подсмотреть не только внешнее выражение особенностей конструкции, но и суть технического решения.

- Судебные разбирательства по результатам интеллектуальной собственности в данной области довольно затратны и отнимают много времени и усилий компаний.

- Даже несмотря на то, что большая часть технических решений в данной области защищаются не патентными документами, а режимом коммерческой тайны, существует риск раскрытия технических решений конкурентами, например, при помощи сотрудников «перебежчиков» и др.

Данные нюансы создают особенную специфику патентной активности в отрасли гоночных автомобилей. Вероятно, большая часть технических решений из-за вышеперечисленных факторов остается вне поля видимости патентного анализа. Однако, уровень патентования, выявленный в ходе исследования, все равно достаточен, чтобы сделать выводы относительно состояния технической отрасли, темпов развития и будущих тенденций. Таким образом, главная задача настоящего исследования заключается в демонстрации развития патентования в отрасли гоночных автомобилей, выявлении особенностей патентования, а также лидеров среди стран и компаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Динамика патентования

Динамика заявок и патентов за период 2012–2022 годов (рис. 1) демонстрирует активный рост технологий гоночных автомобилей в 2014 году, продолжавшийся до 2017 года. За 2014–2017 года было зарегистрировано 4197 заявок и 3938 патентов, что составляет большую часть патентной активности за рассмотренный одиннадцатилетний период. Количество зарегистрированных заявок и зарегистрированных патентов приблизительно равно, что говорит о патентоспособности большей части представленных технических решений. В 2018 году наблюдался значительный спад заявительской и патентной активности. В дальнейшем динамика не достигла прежних пиковых показателей. Однако данный факт можно объяснить временным лагом патентной базы данных, вызванный тем, что большое количество патентных документов еще проходят процедуры экспертизы, в связи с чем не могут быть отражены в открытом доступе поисковой системы. Тем не менее, на данный момент результаты патентного анализа демонстрируют тенденцию снижения интереса к патентованию в период 2018–2022 годов¹.

Объекты патентования

Рынок технологий гоночных автомобилей довольно разнообразен и включает в себя множество технических решений, направленных на достижение таких технических результатов, как безопасность, эффективность и прочие показатели работоспособности автомобиля. Гоночный автомобиль представляет

собой сложную систему, которой необходимы как детали и устройства, так и электронные системы. Также, в зависимости от типа соревнований, требования, предъявляемые к конструкции автомобиля, очень сильно отличаются. В настоящем анализе, были рассмотрены все технические решения, касающиеся гоночных автомобилей в целом, без ограничений по типам соревнований.

В качестве примера таких технических решений следует рассмотреть патент CN108050173B Taiyuan University of Technology. Данное изобретение описывает тормозную систему бионической структуры для гоночного автомобиля Формулы-1 и, как заявлено в описании, решает проблемы низкой эффективности торможения и короткого срока службы существующих тормозных систем. Описываемая тормозная система включает в себя тормозной диск, четырехпоршневой суппорт, направляющий болт, два фрикционных блока и возвратную пружину. Данная тормозная система основана на бионическом принципе (имитации негладкой поверхности), что повышает износостойкость системы.

Также, следует рассмотреть патент KR102478299B1 Honam University Industry (University Cooperation Center). Данное изобретение описывает устройство подвески гоночного автомобиля, основанное на явлении качения, способствующее повышению устойчивости автомобиля на поворотах. Согласно описанию изобретения, когда транспортное средство делает резкий поворот, передние колеса поворачиваются в направлении, противоположном качению, тем самым улучшая устойчивость транспортного средства на поворотах.

Распределение заявительской и патентной активности по странам и организациям

В разрезе заявительской и патентной активности отдельных стран следует выделить абсолютное лидерство КНР. Китайские заявки составляют 93 % от общего массива технических решений, касающихся гоночных автомобилей, а патенты – 96 % (по данным патентной базы данных Espacenet¹). Такой большой отрыв активности организаций КНР от конкурентов является следствием того, что многие иностранные компании, занимающиеся гоночными автомобилями, отдают

разработку технических решений на аутсорсинг в китайские исследовательские центры и университеты в силу экономических соображений и быстрых сроков реализации работ, а те, в свою очередь закрепляют результаты разработок за собой с помощью патентов. Данный факт подтверждается тем, что некоторые патентные документы имеют приоритетную заявку из Китая, но публикуются в иностранном патентном ведомстве (например, в США, Японии, Италии и других странах).

Среди остальных стран имеются заявки из Японии, Южной Кореи, Германии, США, Франции, России и других государств. Но их доля, по сравнению с Китаем, в общем массиве настолько мала, что говорить о полноценной количественной конкуренции не приходится. Китайские патентные документы практически полностью заполнили рынок технологий гоночных автомобилей, причем не только на национальной территории.

Рейтинг топ-10 организаций-лидеров по количеству поданных заявок и патентов (рис. 2) также демонстрирует абсолютное лидерство китайских организаций. Только одна организация (TOSHIBA KK) является японской, остальные же позиции рейтинга представлены китайскими компаниями. Исходя из данных видно, что распределение поданных заявок и патентов неравномерно. Например, третье место рейтинга занимает Гуандунский технологический университет (Guangdong University of Technology, на рис. 2 – «UNIV GUANGDONG TECHNOLOGY»), имеющий 47 заявок и 23 патента. Однако, государственная электросетевая корпорация КНР («STATE GRID CORP CHINA») имеет меньше заявок, но больше патентов (31 заявка и 31 патент).

Исходя из данных патентного поиска следует, что из общего массива заявителей университетами являются 41 % организаций, частными организациями – 56 %, а физическими лицами – 2 %. Частные организации формируют большую часть заявительской и патентной активности в области гоночных автомобилей. Например, в рейтинге организаций-лидеров патентной активности пять из десяти организаций являются частными организациями, оставшиеся пять позиций представлены университетами. В числе частных организаций представлены как частные научные центры, так и крупные автомобилестро-



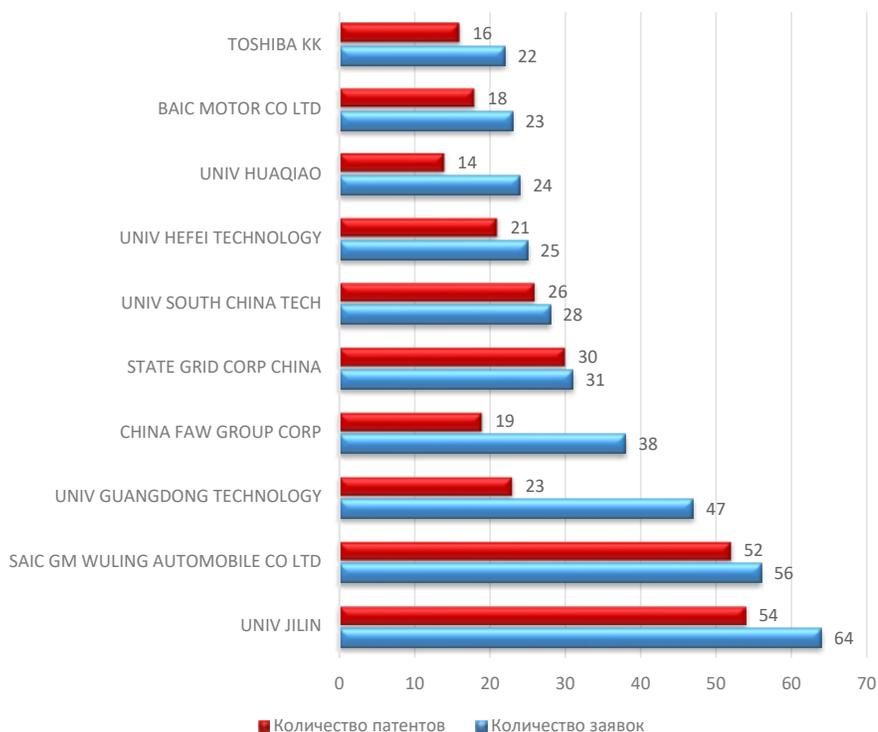


Рис. 2. Количество заявок и патентов по организациям за период 2012–2022 годов [по данным патентной базы данных Espacenet].

тельные компании. Например, в рейтинге организаций-лидеров (рис. 2) присутствуют такие крупные автомобилестроительные компании, как SAIC, FAW, BAIC.

При этом университеты также формируют значимую часть патентной и заявительской активности. Так, например, лидером заявительской и патентной активности (рис. 2) является Цилиньский университет (Jilin University), всего аффилированные с университетами структуры занимают пять позиций среди десяти лидеров.

Физические лица занимают наименьшую долю от общего массива заявительской и патентной активности. Выявленные патентные документы физических лиц описывают скорее технические решения для автомобилестроения в целом, применимые, в том числе, и для гоночных автомобилей, нежели специализированные устройства исключительно для гоночных автомобилей. В таком случае возрастает ценность патентов, так как расширяется их область применения, но одновременно с этим подтверждается тот факт, что изобретения, подлежащие использованию исключительно в гоночных автомобилях, патентуются достаточно редко ввиду быстрого устаревания технических решений. Продлить актуальность такого патента на рынке

технологий возможно лишь расширив его область применения, поэтому нередко защищенные технические решения в области гоночных автомобилей применимы и для общего автомобилестроения.

Публикационная активность

Отдельное внимание стоит уделить анализу публикационной активности по технологиям гоночных автомобилей. Патенты и научные публикации вместе дают полное представление о развитии технологий и научных исследований. Патенты показывают, какие технологии защищаются и могут быть коммерциализированы, тогда как научные публикации показывают, какие исследования ведутся и какие направления считаются перспективными в академической среде. Анализ публикационной активности проводился аналогичным с патентным поиском методом, по ключевым словам, с ограничением по типу научных статей (Articles) в базах данных публикаций Dimensions, CORE, при этом основной массив научных публикаций для анализа был взят из базы данных Open Alex.

Динамика публикаций научных статей за период 2012–2022 годов (рис. 3) демонстрирует относительно равномерный рост публикационной активности. За период 2012–

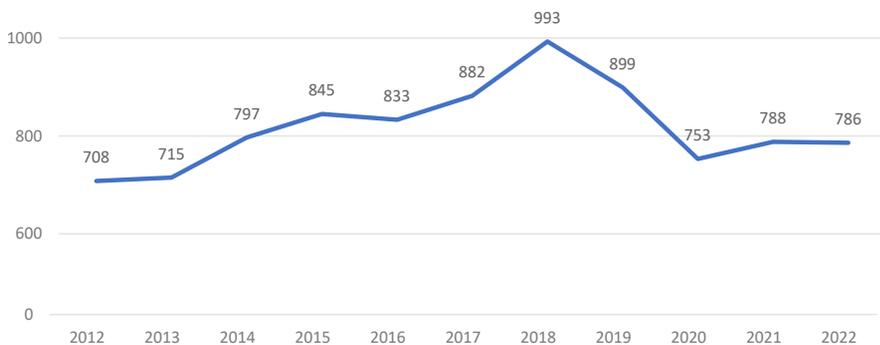


Рис. 3. Динамика публикаций научных статей за период 2012–2022 годов [по данным базы данных Open Alex].



Рис. 4. Количество публикаций научных статей по тематическим рубрикам за период 2012–2022 годов [по данным базы данных Open Alex].

2018 годов количество ежегодных публикаций увеличилось с 708 до 993 публикаций, что является пиковым значением за весь анализируемый период. Однако, начиная с 2019 и по 2022 год динамика начинает демонстрировать тенденции к падению. Так, за указанный период количество публикаций снизилось с 899 до 786, что, впрочем, не является сколько-нибудь критичным фактором.

Также были проанализированы тематические рубрики, к которым относятся рассмотренные публикации (рис. 4.). Наибольшее количество публикаций (358 публикаций) отмечено в категории, относящейся к передовым системам управления динамикой транспортных средств, что указывает на высокий интерес и активные исследования в данной области, возможно, из-за актуальности и значимости улучшения управляемости и безопасности транспортных средств. Также в данном рейтинге отмечены публикации по тематике «Моделирование и оптимизация композитных пружин транспортных средств» (238 публикаций), «Аэродинамика высокоскоростных поездов и транспортных средств» (213 публикаций).

Таким образом, публикационная активность демонстрирует относительно равномерную тенденцию развития. Стоит отметить, что отмеченный спад в период 2019–2022 годов не является критичным и не демонстрирует быстрые темпы снижения публикационной активности, однако при долгосрочном анализе отрасли его следует иметь в виду. При сравнении показателей патентной и публикационной активности заметно, что пиковые значения публикационной активности сильно уступают аналогичным значениям патентной активности. Тем не менее, темпы развития публикационной активности демонстрируют более стабильный характер.

ВЫВОДЫ

Из данных анализа патентной активности следует, что в целом уровень патентной активности в области гоночных автомобилей испытывал как уверенный подъем, так и значительный спад. Несмотря на то, что, вероятно, большая часть технических решений защищены в качестве ноу-хау и недоступны для открытого патентного анализа, удалось про-





следить непрерывный рост патентной активности в период 2014–2017 годов. Основной массив заявительской и патентной активности пришелся на вышеуказанный период, после которого наблюдается спад активности. Касаемо заявительской и патентной активности отдельных стран, было выявлено безусловное первенство мирового лидера – Китая, как по количеству заявок, касающихся гоночных автомобилей, так и по количеству патентов. Китай также лидирует и по количеству наиболее активных организаций и вряд ли уступит свою позицию в ближайшие годы. Ведущую роль в заявительской и патентной активности по технологиям гоночных автомобилей играют частные организации и университеты, предоставляющие большую часть технических решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ekanem, I., Икре, А., Абиа, Е. Evolution of formula one (F1) motorsports and its top-notch advancement in engineering innovations across the racing industry. In: Atlas. 11th International Congress on Advanced Scientific Studies and Interdisciplinary Research, Marrakesh, Morocco, January 16–18, 2024. Proceedings Book. Eds. Prof. Abuharris, A., Kidiryüz, M. Liberty Academic Publishers, 2024, pp. 107–127. ISBN: 978–1–955094–94–8.
2. Доронкин В. Г., Лямин А. С. Развитие автомобильного спорта в городе Тольяти: 1966–2016 гг. // Балтийский гуманитарный журнал. – 2017. – Т. 6. – № 1 (18). – С. 90–93. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28921917>. EDN: YIXJAF. Доступ 15.05.2023.
3. Бернацкий В. В., Красавин П. А., Мартин Г. К. К вопросу исследования жесткостных характеристик рам гоночных автомобилей // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2019. – № 3 (21). – С. 11. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41152477>. EDN: UQTYI. Доступ 15.05.2023.
4. Дегтев Д. Н., Лавренов С. В., Осипов А. А. [и др.]. Статический анализ переднего поворотного кулака гоночного автомобиля класса «Формула Студент» // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2021. – № 1. – С. 61–67. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46141472>. EDN: WZOEVN. Доступ 15.05.2023.
5. Сорокин П. А., Хряков К. С., Мишин А. В. Спектральный анализ вибраций переднего антикрыла гоночного автомобиля «Даллара T12» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 7–1. – С. 221–226. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25070439>. EDN: VCQAMN. Доступ 15.05.2023.
6. Хряков К. С. Проблемы эффективной работы аэродинамических элементов гоночных автомобилей // Известия

Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 11–2. – С. 193–196. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23050864>. EDN: TKKZCX. Доступ 15.05.2023.

7. Плетин Д. А. Особенности конструкции гоночных автомобилей класса Формула // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 1. – № 1 (19). – С. 63–66. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21834415>. EDN: SJUWHX. Доступ 15.05.2023.

8. Евсеев К. Б. Анализ механических свойств углепластиковых направляющих элементов подвески автомобиля класса «Формула студент» // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. – № 10. – С. 11.

9. Бикбулатов Р. И., Федоров С. В. Система телеметрии гоночного автомобиля // Достижения науки и образования. – 2019. – № 5 (46). – С. 14–21. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37347336>. EDN: YLSVOG. Доступ 15.05.2023.

10. Красин П. С., Вольченко Н. А. Экспериментальная калибровка датчиков гоночного автомобиля // Электронный сетевой политехнический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2015. – № 2. – С. 205–212. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23028910>. EDN: TJYUJB. Доступ 15.05.2023.

11. Туренко А. Н., Ужва А. В., Лукашов И. В. [и др.]. Использование навигационной спутниковой системы GPS для воспроизведения траектории движения гоночного автомобиля // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2013. – № 60. – С. 083–089. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21120196>. EDN: RUEMYH. Доступ 15.05.2023.

12. Суранович Д. И., Корухова Ю. С. Система автоматизированного выявления ошибок водителя в автогонках // Научный сервис в сети Интернет. – 2018. – № 20. – С. 454–458. [Электронный ресурс]: <https://keldysh.ru/abrau/2018/theses/51.pdf>. EDN: YPOHCX. Доступ 15.05.2023.

13. Shinde, T., Chavan, R., Savadekar, P. [et al]. Failure Analysis of a Wheel Hub of Formula Student Racing Car. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 2021, Vol. 102, Iss. 1, pp. 73–78. DOI: 10.1007/s40033-020-00244-z.

14. Susca, L., Mandorli, F., Rizzi, C., Cugini, U. Racing car design using knowledge aided engineering. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AI EDAM), 2000, Vol. 14, Iss. 3, pp. 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890060400143057> [Ограниченный доступ].

15. Manaf, M. Z. A., Latif, M. F. A., Razak, M. S. A. [et al]. Suspension kinematic analysis of UTeM's FV Malaysia electric vehicle racing car. International Review of Mechanical Engineering, 2016, Vol. 10, Iss. 4, pp. 294–300. DOI: 10.15866/ireme.v10i4.8626.

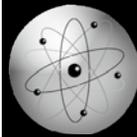
16. Камалая А. М. Охрана результатов научных исследований и научной информации в спорте высших достижений на примере «Формулы-1» // Актуальные проблемы российского права. – 2021. – Т. 16. – № 2 (123). – С. 175–182. DOI: 10.17803/1994-1471.2021.123.2.175-182.

Информация об авторах:

Николаев Роман Сергеевич – аналитик инженерно-методического центра передовой инженерной школы электротранспорта Московского политехнического университета, Москва, Россия, r.s.nikolaev@mospolytech.ru.

Жданович Ольга Андреевна – заместитель директора передовой инженерной школы электротранспорта Московского политехнического университета, Москва, Россия, o.a.zhdanovich@mospolytech.ru.

Статья поступила в редакцию 15.05.2023, актуализирована 15.03.2024, одобрена после рецензирования 05.06.2024, принята к публикации 29.06.2024.



Повышение эффективности ультразвукового контроля ободьев цельнокатаных колес при ремонте колесных пар вагонов



Александр ОТОКА



Олег ХОЛОДИЛОВ

Александр Генрикович Отока¹,
Олег Викторович Холодилов²

^{1,2} Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь.

¹ Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Гомель, Республика Беларусь.

¹ ORCID 0009-0003-9926-9439; РИНЦ SPIN-код: 2466-5708; РИНЦ Author ID 1220168.

² ORCID 0009-0005-5799-0097; РИНЦ SPIN-код: 1818-4103; РИНЦ Author ID 188646.

✉ ¹ otoka@mail.ru.

✉ ² olhol@tut.by.

АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности ультразвукового контроля на железнодорожном транспорте возможно за счет совершенствования и изменения существующей технологии. Одной из основных задач повышения эффективности является улучшение достоверности и информативности ультразвукового контроля ободьев колес при ремонте колесных пар.

Контактный способ ввода ультразвука для ободьев колес по-прежнему является преобладающим на предприятиях вагонного и локомотивного хозяйства железных дорог.

В статье освещаются технические приемы ультразвуковой дефектоскопии обода цельнокатаных колес при ремонте колесных пар вагонов в соответствии с существующими

нормативными техническими документами. Описаны проблемы выявления дефектов пьезоэлектрическими преобразователями с углами ввода 0°, 40°, 50° при контроле обода с боковой внутренней поверхности и 90° – со стороны поверхности катания.

Предложен вариант новой методики контроля обода колеса со стороны поверхности катания с использованием пьезоэлектрических преобразователей с углами ввода 65°–74°. Проведен сравнительный анализ по выявлению одновременно восьми отражателей в настроенном образце с использованием преобразователей 2,5Р65°69°74°, П121–2,5–70° РДМ и П121–0,4–90°.

Ключевые слова: цельнокатаные колеса, Рэлеевские волны, ультразвуковой контроль, поверхность катания, обод колеса, повышение эффективности.

Для цитирования: Отока А. Г., Холодилов О. В. Повышение эффективности ультразвукового контроля ободьев цельнокатаных колес при ремонте колесных пар вагонов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-8>.

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



ВВЕДЕНИЕ

Сегодня ультразвуковой контроль на железнодорожном транспорте занимает особое место в силу необходимости обеспечения безопасности перевозки грузов и пассажиров. Он является основой выявления внутренних дефектов, раскрытых по глубине поверхностных трещин в различных частях осей колесных пар, а также в ободьях и дисках цельнокатаных колес¹.

Для контроля ободьев цельнокатаных колес на наличие дефектов используют в качестве основного ввод ультразвука (УЗ) с внутренней грани колеса с углами ввода пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) 0° , 40° , 50° . Однако на практике при вводе УЗ с внутренней грани имеет место «мертвая» зона, в которой возможно возникновение дефекта. К примеру, нормируемая «мертвая» зона у ПЭП для углов ввода 40° , 50° составляет ≈ 6 мм, а для угла ввода 0° – $10...15$ мм. При этом контактный способ ввода УЗ может не обеспечить требуемую чувствительность метода в местах задиров и сколов, которые могут быть на внутренней грани колеса [1]. Толщина обода колес также влияет на выявление дефектов в случае с фиксированным положением ПЭП в составе устройства сканирования колеса УСК-5А. В нормативной технической документации основное внимание обращается на выявление отражателей определенных размеров в различных частях колеса, но не учитывается тот факт, что дефекты могут располагаться под различными углами по отношению к ПЭП и находиться в других зонах. Естественные дефекты (поры, трещины, расслоения и др.) отличаются от искусственных отражателей (отверстие, засверловка, пропилен и др.) аномальностью формы. Например, внутри дефектов могут быть оксиды и различные вещества, которые при УЗ-контроле способствуют, как правило, уменьшению амплитуды отраженного сигнала. Объемные дефекты типа пор, шлаковых включений различного вида дают рассеяние падающей волны, практически одинаковое по всем направлениям. Однако для плоскостных дефектов (трещина, расслоение и др.) рассеяние имеет очевидную направленность.

¹ ПР НК В.2. Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования. – М.: АО «Кодекс». – 2013. – 88 с.

Направление плоскости таких дефектов по отношению к плоскости, в которой распространяется УЗ-волна, может кардинально отличаться и напрямую зависит от технологии изготовления, условий и режимов дальнейшей эксплуатации колес. Представляют интерес для выявления трещины, выходящие из одной точки или имеющие паукообразный вид.

От плоскостных дефектов эхо-сигналы большой амплитуды наблюдают только при благоприятных условиях (зеркальное отражение). При незеркальном отражении появляются дифракционные волны от краев дефекта. Их амплитуда значительно меньше амплитуды при зеркальном отражении и определяется формой дефекта, направлением излучения и приема относительно плоскости дефекта, а также типом излучаемых и принимаемых волн [2–4].

На практике отмечается, что при контроле прямыми ПЭП изделий с неровностями поверхности от механической обработки может происходить возбуждение поверхностной волны Рэлея, которая распространяется перпендикулярно направлениям неровностей [5]. Такой эффект приводит к появлению ложных эхо-сигналов на развертке дефектоскопа и влияет на правильность оценки качества ободьев колес (бандажей). Так, например, при вводе УЗ с боковой внутренней поверхности колеса ложный сигнал может появляться от двугранного угла края обода (бандажа), противоположного гребню.

Необходимо отметить, что при контроле наклонным совмещенным ПЭП амплитуда эхо-сигнала дифракционной волны от края вертикальной полуплоскости при малой площади сечения приблизительно эквивалентна амплитуде отраженного сигнала от бокового цилиндрического отверстия диаметром ≈ 4 мм для продольной волны и 2 мм для поперечной (для расчета $d = \lambda/2\pi$, где λ – длина волны при частоте ПЭП 2,5 МГц).

Наблюдается также рассеяние на неровной поверхности дефекта. Рассеяние тем больше, чем больше параметр Рэлея ($R = 2k\sigma \times \cos \epsilon$, где k – волновое число, σ – среднеквадратическое значение высоты неровностей, ϵ – угол падения волны на дефект) [6].

На основании вышеизложенного видно, что существуют технологические ограничения, снижающие эффективность контактного УЗК.

Варианты методов ввода УЗ с внутренней грани обода колеса¹

<p>✓ DR2.1 (угол ввода 0°) контроль по окружности обода колеса продольными волнами при установке ПЭП ниже уровня поверхности катания</p> <p>✓ DR2.2 (угол ввода 0°) контроль по окружности обода колеса продольными волнами на расстоянии 30 мм от нижнего края обода (для колес повышенной твердости)</p>	<p>✓ DR3.1 (угол ввода 40°) контроль по окружности обода колеса поперечными волнами при установке ПЭП ниже уровня поверхности катания</p>	<p>✓ DR3.3 (угол ввода 50°) контроль по окружности обода колеса поперечными волнами при установке ПЭП выше уровня поверхности катания</p>
<p>Выявление в основном сечении обода продольных усталостных трещин, разрывающихся преимущественно перпендикулярно поверхности катания, расслоений, неметаллических включений и других внутренних несплошностей</p>	<p>Выявление поперечных усталостных трещин на внешней боковой грани обода в зоне сопряжения с поверхностью катания</p>	<p>Выявление поперечных трещин и внутренних несплошностей в гребне обода</p>

В настоящее время ведется постоянная работа по разработке направлений совершенствования существующих методик УЗ-контроля колесных пар подвижного состава, в том числе и технических средств контроля [7; 8].

Целью работы является совершенствование УЗ-контроля ободьев цельнокатаных колес на наличие разноориентированных трещиноподобных дефектов.

ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ

В соответствии с нормативным документом¹ УЗ-контроль цельнокатаных колес выполняют эхо-импульсным методом с целью выявления внутренних и поверхностных дефектов, которые расположены в ободьях и имеют характеристики, превышающие браковочные значения¹.

В табл. 1 показаны обязательные варианты метода контроля цельнокатаного колеса с внутренней боковой поверхности обода.

Одним из способов УЗ-контроля поверхности деталей цилиндрической формы является эхо-метод с использованием Рэлеевских волн. Достоинства этого метода контроля связаны с высокой производительностью за счет установки ПЭП в одну или несколько точек, позволяющих оценить состояние всей поверхности объекта контроля [9]. При этом не требуется сканирование по всей поверхности. Так как поверхностная волна обладает высокой чувствительностью к выявлению поверхностных дефектов, то и требования к состоянию поверхности детали предъявляются высокие.

В железнодорожной отрасли метод получил наиболее широкое применение для конт-

роля цельнокатаных колес и бандажей после обточка на колесотокарном станке. Контроль поверхностными волнами осуществляется в двух направлениях путем переставления ПЭП на расстояние $\frac{1}{4}$ длины окружности колеса (как правило, не менее одного переставления). Выявлению подлежат различные дефекты на поверхности катания и в приповерхностном слое обода на глубине до 1...2 мм (DR4).

Известно, что по закону Снеллиуса после падения УЗ-луча в призме ПЭП под углом 55–57° в среде преломленная волна существует только в виде поверхностной. Именно такой угол падения луча в призме используется в ПЭП железнодорожного назначения, промаркированного как П121–0,4–90°.

Однако использование данного ПЭП на практике осложнено влиянием на результаты таких факторов, как загрязнение, остатки или избыток контактной жидкости, наличие задиров, оставленных после обточка колеса и др. Следует учитывать, что в процессе работы с таким типом ПЭП достаточно сложно найти дефект по причине его способности принимать волны неосновным «задним» лепестком диаграммы направленности. Также амплитуда эхо-сигнала от дефекта изменяется неравномерно по причине таких явлений, как многократное переотражение волн от границ (фаска обода, галтельный переход к гребню) и дальнейшей их интерференции [10].

Контроль колеса поверхностной волной по варианту метода DR4 (90°) со стороны поверхности катания является недостаточным, так как дефекты могут залегать на разной глубине и не всегда будут выявляться и с внутренней стороны обода поперечной волной наклонным ПЭП по варианту





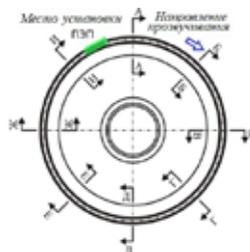
а



б



в



г

Рис. 1. Пример выявления эталонных отражателей в НО [фото авторов].
а – ПЭП П121–0,4–90° (со встроенными магнитами); б – ПЭП 2,5Р65°69°74°;
в – ПЭП П121–2,5–70–РДМ; г – расположение отражателей в НО по секторам.

DR3.1(40°), и продольной волной прямым ПЭП по DR2.1 (0°).

Для проведения экспериментальных исследований был выбран настроечный образец (НО) в виде сформированной колесной пары с восемью искусственными отражателями на цельнокатаном колесе диаметром 903 мм. Ввод УЗ проводился на НО со стороны поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани обода в одной точке колеса с использованием УЗ-дефектоскопа УД2–102ВД и комплекта преобразователей: П121–0,4–90° (РФ), П121–2,5–70° РДМ (РФ), П121–2,5–65° РДМ (РФ), 2,5Р65°69°74° (КНР). В качестве контактной жидкости применялось масло индустриальное И-20. При контроле обода колеса для П121–0,4–90° вызывалась типовая настройка завода-изготовителя (скорость УЗ $c = 2999$ м/с, амплитуда зондирующего импульса высокая, зоны временной селекции $BC1_{нач}$, $BC1_{кон}$, $BC2_{нач}$, $BC2_{кон}$ настраиваются автоматически, частота ПЭП 0,4 МГц, угол ввода 90°), а для всех остальных параметры контроля устанавливались самостоятельно в соответствии с длиной окружности колеса и характеристиками ПЭП ($BC1_{нач} = 133.6R$, $BC1_{кон} = 3000R$, скорость УЗ $c = 3260$ м/с, амплитуда зондирующего импульса высокая, частота ПЭП 2,5 МГц, угол ввода 65°, 69°, 70°, 74°).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представляло интерес изучение особенностей выявления отражателей с поверхности катания колеса при использовании традиционного ПЭП П121–0,4–90° (с помощью поверхностной волны) и наклонных ПЭП с большими углами ввода (с помощью поперечной волны) 2,5Р65°69°74° (трехэлементный ПЭП в одном корпусе), П121–2,5–70° РДМ, П121–2,5–65° РДМ (рис. 1).

Использование таких больших углов 65°–74° при контроле колесных пар в вагонном хозяйстве не предусмотрено. Однако данные ПЭП широко используются в дефектоскопии рельсов как в составе дефектоскопной тележки, так и при ручном подтверждающем контроле (70° – контроль головки рельса со стороны поверхности катания, 65° – контроль зон сварных стыков в области головки со стороны поверхности катания)^{2,3}. Стоит отметить, что такие углы ввода используются при контроле

² СТП БЧ 38.427–2021 Неразрушающий контроль рельсов и сварных стыков. Стандарт организации (утвержден приказом начальника Белорусской железной дороги от 18.06.2021 № 532НЗ). – 2021. – 127 с.

³ СТП БЧ 38.343–2016 Ультразвуковой контроль рельсов в пути дефектоскопом УДС2-РДМ-22. Стандарт организации (утвержден приказом начальника Белорусской железной дороги от 15.07.2016 № 665НЗ). – 2016. – 81 с.

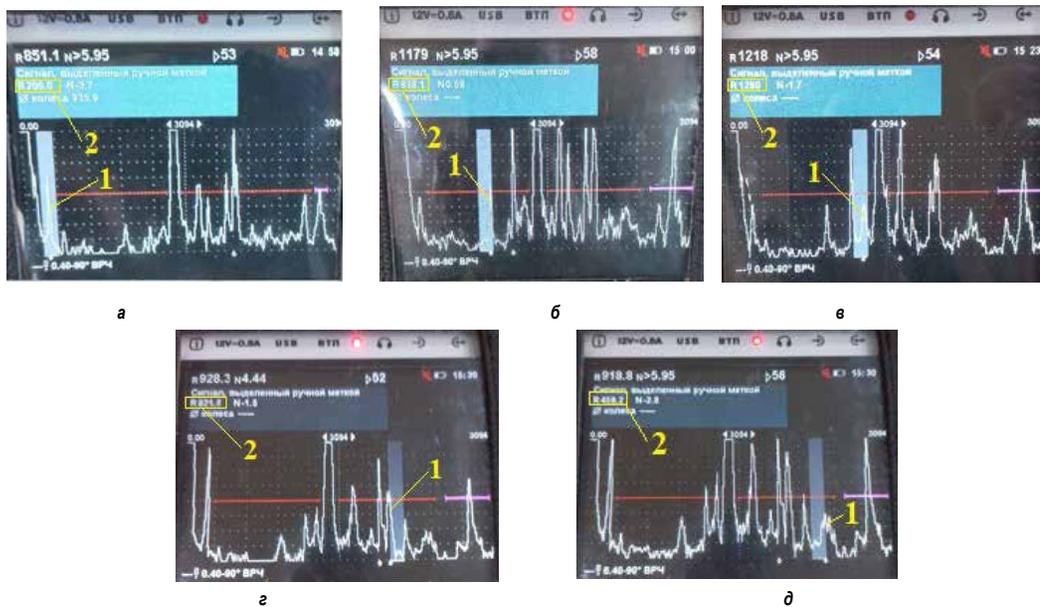


Рис. 2. Дефектограммы выявления отражателей в НО ПЭП П121–0,4–90°:

1 – сигнал от отражателя; 2 – расстояние по лучу до отражателя, мм; а – горизонтальное сверление диаметром 5 мм на глубине 10 мм от поверхности катания колеса (вне зоны контроля временной селекции ВС1); б – вертикальное сверление 5 мм в гребне на расстоянии 17,5 мм от внутренней грани колеса; в – вертикальное сверление 5 мм на поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани колеса; г – выявление пропила на фаске глубиной 3 мм и шириной 1 мм «задним» лепестком; д – выявление засверловки 4 мм глубиной 5 мм на внутренней грани колеса на расстоянии 50 мм от вершины гребня «задним» лепестком [фото авторов].

сварных соединений, что обеспечивает низкий уровень паразитных (ложных) сигналов и высокую выявляемость дефектов, залегающих на разной глубине [11–13].

Контроль поверхности катания ПЭП П121–0,4–90° (рис. 2) показал, что в зоне ВС1 были выявлены отражатели прямым лучом (по расстоянию от передней грани ПЭП) в сечении В–В, Г–Г, а в зоне ВС2 «задним» лепестком (по расстоянию от задней грани ПЭП) – в сечении Е–Е, Ж–Ж. Вне зоны ВС1 был выявлен отражатель прямым лучом (по расстоянию от передней грани ПЭП) в сечении А–А.

Идентифицировать остальные сигналы трудно, а в отдельных случаях не представляется возможным по причинам, описанным выше. При этом, появляющиеся дополнительные сигналы в зоне ВС2 могут дублировать сигналы зоны ВС1, но с пересчетом расстояния искусственно созданной настройки дефектоскопа.

Контроль поверхности катания ПЭП 2,5Р65⁰⁶⁹074⁰ (рис. 3) показал отличные результаты по выявлению всех отражателей последовательно друг за другом.

Очевидно, такая высокая чувствительность связана с конструкцией ПЭП, когда один пьезоэлемент может испускать УЗ-вол-

ну, а другой (находящийся в наиболее благоприятном месте для приема) ее принимать. Большие углы ввода, частота 2,5 МГц и широкая диаграмма направленности ПЭП способствуют тому, что дефекты, имеющие разные геометрические размеры и форму, могут быть классифицированы по сигналу.

При создании настройки в память дефектоскопа заносился угол 69°, один из трех, указанных в маркировке ПЭП.

Схема прозвучивания колеса представлена на рис. 4.

За счет многократного переотражения УЗ-луча от поверхности катания контроль становится эффективным по всей длине окружности колеса. В зависимости от диаметра колеса и угла ввода ПЭП участок переотражения УЗ-луча по протяженности будет различным и находится в диапазоне 160...260 мм. Можно отметить, что такой контроль со стороны поверхности катания позволит выявлять дефекты не только в приповерхностном слое обода, но и на глубине до 35 мм от поверхности катания. При такой схеме сканирования эффективность выявления дефектов – неметаллических включений, поперечных трещин, раковин, расслоений и других несплошностей – только увеличивается.



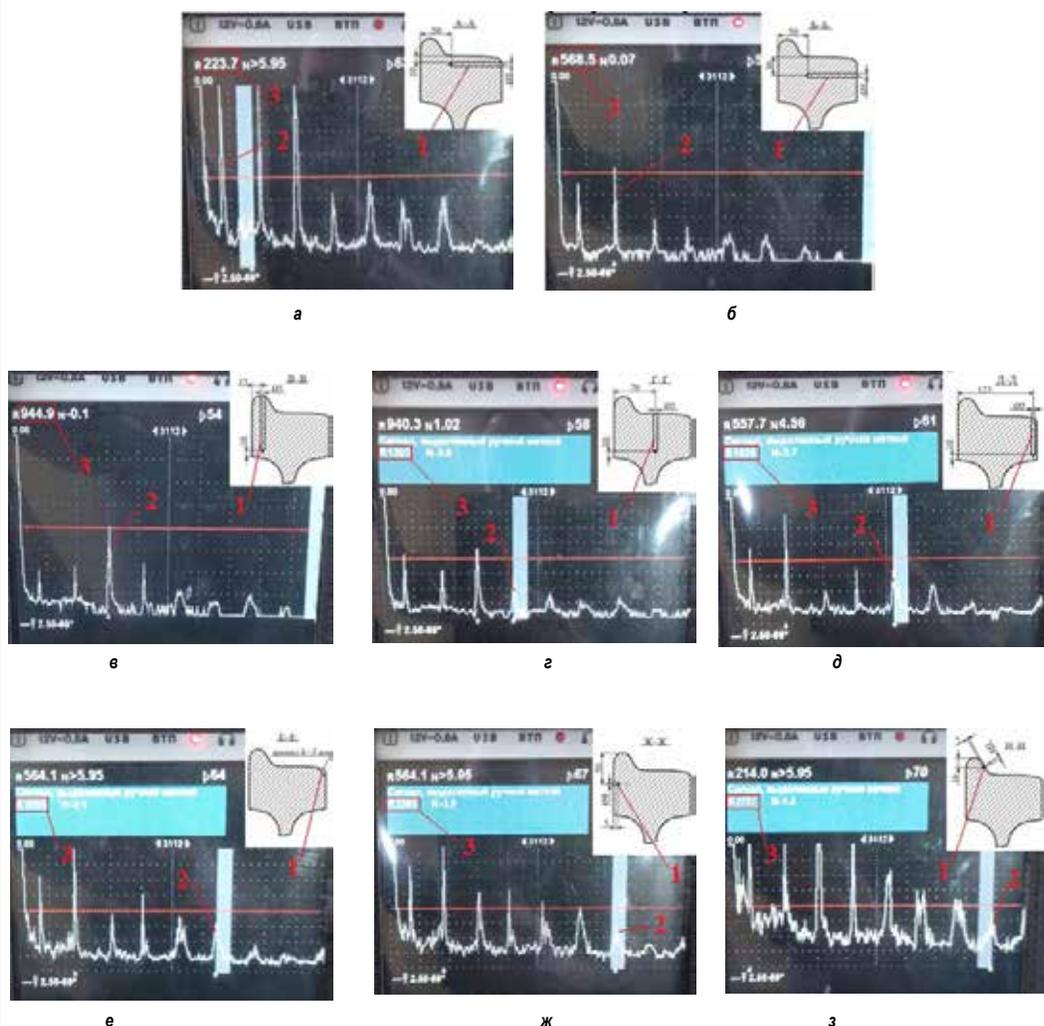


Рис. 3. Дефектограммы выявления отражателей в НО ПЭП 2,5Р65°69'74°:

1 – искусственный отражатель; 2 – сигнал от отражателя, мм; 3 – расстояние по лучу до отражателя; а – горизонтальное сверление диаметром 5 мм на глубине 10 мм от поверхности катания колеса; б – горизонтальное сверление 5 мм на глубине 30 мм от поверхности катания колеса; в – вертикальное сверление 5 мм в гребне на расстоянии 17,5 мм от внутренней грани колеса; г – вертикальное сверление 5 мм на поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани колеса; д – вертикальное сверление 5 мм в зоне фаски поверхности катания на расстоянии 125 мм от внутренней грани; е – пропил на фаске глубиной 3 мм и шириной 1 мм; ж – засверловка 4 мм глубиной 5 мм на внутренней грани колеса на расстоянии 50 мм от вершины гребня; з – засверловка 3 мм глубиной 2 мм на расстоянии 16 мм от вершины гребня колеса [фото авторов].

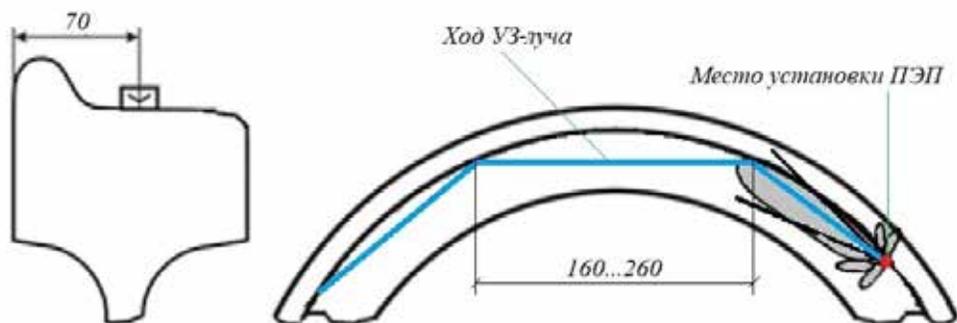


Рис. 4. Схема сканирования и направление прозвучивания [предложена авторами].



а



б

Рис. 5. Дефектограммы годного колеса колесной пары после обточки на колесотокарном станке, полученные ПЭП 2,5Р65° 69° 74° а – до установки ПЭП; б – после установки ПЭП на поверхность катания [фото авторов].

Сканирование требуется производить в нескольких точках, отклоняя луч ПЭП в обе стороны на 10–15°. При появлении в зоне контроля сигнала необходимо найти такое положение, при котором его амплитуда будет максимальной.

Для подтверждения того, что контроль эффективен и настройка создана правильно, была подобрана колесная пара после обточки колеса на колесотокарном станке с аналогичным диаметром 903 мм. Как видно на рис. 5, ложные индикации отсутствуют.

При использовании ПЭП П121–2,5–70° (рис. 6) также имеет место высокая чувствительность контроля при выявлении всех отражателей.

Однако контроль П121–2,5–70° РДМ из-за его геометрических размеров и малой площади контакта все же уступает по чувствительности трехэлементному ПЭП в части разброса показаний сигналов по амплитуде, так как излучателем и приемником является один пьезоэлемент.

Ультразвуковой контроль обода колеса при такой схеме прозвучивания подразумевает деление колеса на участки (контроль по точкам) или сканирование поверхности катания на расстоянии 300–400 мм в двух направлениях путем перемещения ПЭП посередине поверхности катания, отклоняя луч ПЭП в обе стороны на 10–15° через каждые 5 см пути.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований подтвердили высокую чувствительность нового варианта метода контроля со стороны поверхности



Рис. 6. Дефектограмма выявления отражателей в НО ПЭП П121–2,5–70-РДМ:

- 1 – горизонтальное сверление диаметром 5 мм на глубине 10 мм от поверхности катания колеса;
- 2 – горизонтальное сверление 5 мм на глубине 30 мм от поверхности катания колеса;
- 3 – вертикальное сверление 5 мм в гребне на расстоянии 17,5 мм от внутренней грани колеса;
- 4 – вертикальное сверление 5 мм на поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани колеса;
- 5 – вертикальное сверление 5 мм в зоне фаски поверхности катания на расстоянии 125 мм от внутренней грани;
- 6 – пропил на фаске глубиной 3 мм и шириной 1 мм;
- 7 – засверловка 4 мм глубиной 5 мм на внутренней грани колеса на расстоянии 50 мм от вершины гребня;
- 8 – засверловка 3 мм глубиной 2 мм на расстоянии 16 мм от вершины гребня колеса [фото авторов].

катания на расстоянии 70 мм от внутренней боковой поверхности обода.

При установке ПЭП в одну точку и отклонении луча в обе стороны на 10–15° отмечается выявление дефектов на примере искусственных отражателей в НО, различных по своим размерам, ориентации и форме. Высокая производительность такого контроля не снижает достоверность полученных результатов УЗ-дефектоскопии, и, благодаря широкой диаграмме направленности, эффективность выявления дефектов повышается в сравнении с вводом УЗ со стороны внутрен-



ней боковой поверхности обода. В связи с возможным переотражением от приободной зоны и с учетом того, что контроль эффективен на глубине до 35 мм, целесообразно использовать предложенный вариант метода для колес с толщиной обода до 40 мм.

В работах [14; 15] приводится информация, что оценка допустимости несплошностей по эталонным отражателям в НО можно выполнить только со значительной погрешностью, которую вносит разность загужания в колесе (материал Ст. 2, Ст. 2Г, Ст. 1, Ст. Т) и НО. Поэтому применение предложенного варианта контроля с применением ПЭП с углами ввода 65°–74° с поверхности катания колеса предусматривает возможность изменения технологии УЗ ободьев цельнокатаных колес в части использования его как основного метода совместно с комплексом DR3.1 (40°), DR3.3 (50°), DR 2.1 (0°), DR2.2 (0°), DR4 (90°) или как дополнительного (подтверждающего в спорных ситуациях).

Предложенный нами подход к УЗ-дефектоскопии ободьев цельнокатаных колес колесных пар при ремонте позволит повысить эффективность неразрушающего контроля и эксплуатационную надежность подвижного состава на железнодорожном транспорте.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Отока А. Г., Логунов В. Г., Холодилов О. В. Чувствительность контактного и иммерсионного способов ультразвукового контроля при выявлении эталонных отражателей в настроенном образце // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2023. – № 1. – С. 30–36. EDN: GVVYRPF.
2. Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В., Филинов В. Н., Аертс В., Бабаджанов Л. С. [и др.] *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник*. – М.: Изд-во Машиностроение, НИИИИ МНПО «Спектр», 2005. – 656 с. ISBN 5-217-03300-2.
3. Марков А. А., Максимова Е. А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2019. – Т. 22. – № 2. – С. 22–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-22-22-32.
4. Ермолов И. Н., Вopilкин А. Х., Бадалян В. Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. Краткий справочник. – М.: Изд-во ООО НПЦ НК «ЭХО+», 2002. – 109 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/1nsdfaY0ymWCu?ysclid=m3oa56dhny152857484>. Доступ 16.05.2024.

5. Лысак Д. В. Определение ложных эхо-сигналов отражения поверхностной волны при ультразвуковом контроле бандажей колесных пар подвижного состава железных дорог // *Технические науки – от теории к практике*. – 2013. – № 17–1. – С. 131–137. EDN: RMTSHB.

6. Кунина П. С., Дубов В. В., Поляков А. В., Терещенко И. А., Новгородский А. А., Степанов М. С. Целесообразность проведения ультразвукового контроля при диагностике бурового инструмента // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2018. – № 8. – С. 32–37. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-8-32-37.

7. Bernd, R., Walte, F., Kappes, W., Kroening, M. Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheel Set Axle. 17th World Conference on Nondestructive testing, 2008. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/26920462_Ultrasonic_and_Eddy-current_inspection_of_rail_wheels_and_wheel_set_axles. Доступ 16.05.2024.

8. Шевелев А. В. Методы и средства ультразвукового неразрушающего контроля цельнокатаных колес вагонов // *Дисс. канд. техн. наук*. – СПб.: ПГУПС, 2004. – 142 с. [Электронный ресурс]: <https://new-disser.ru/avtoreferats/01002621891.pdf>. Доступ 16.05.2024.

9. Отока А. Г., Холодилов О. В. Сравнительный анализ применения контактных жидкостей в дефектоскопии на примере ультразвукового контроля поверхности катания цельнокатаного колеса // *Транспортное машиностроение*. – 2024. – № 3. – С. 4–11. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-3-4-11.

10. Платунов А. В., Муравьев В. В., Муравьева О. В. Ультразвуковой контроль поверхности катания железнодорожных вагонных колес и бандажей локомотивов с использованием рзлеевских волн // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2023. – Т. 21. – № 2. – С. 41–48. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-41-48.

11. Cremona, C. Inspection of welded joints: reliability of ultrasonic inspection and inspection intervals. Conference Paper in IABSE Congress Report, 2012, pp. 597–604. DOI: 10.2749/222137912805110934.

12. Киреев А. Н., Склифус Я. К., Киреева М. А. Повышение достоверности и информативности ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 335–341. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341.

13. Jemec, V., Grum, J. Latest methods of non-destructive testing of railway vehicles. The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing in Engineering, 2005, pp. 69–79. [Электронный ресурс]: <https://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2005/PAPERS/08-NDTP05-70.pdf>. Доступ 16.05.2024.

14. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1991. – 283 с. ISBN 5-06-002038-X.

15. Киреев А. Н. Особенности ультразвукового контроля катаных колесных центров локомотивов в радиальном направлении // *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. – 2006. – № 12. – С. 133–137. EDN: VHWWD. ●

Информация об авторах:

Отока Александр Генрикович – магистр технических наук, аспирант Белорусского государственного университета транспорта; инженер-технолог (руководитель подразделения неразрушающего контроля) Гомельского вагонного депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Гомель, Республика Беларусь, otoka@mail.ru.

Холодилов Олег Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Белорусского государственного университета транспорта, Гомель, Республика Беларусь, olho1@tut.by.

Статья поступила в редакцию 08.05.2024, одобрена после рецензирования 10.09.2024, принята к публикации 12.09.2024.

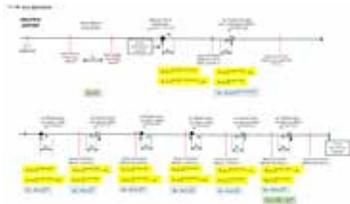
T



РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЦЕПИ ПОСТАВОК

68

Ресурсосберегающий подход: экономически целесообразное количество транспортно-логистических центров.

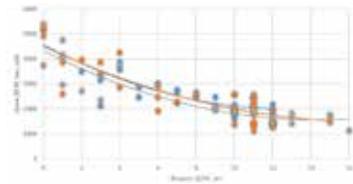


ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

80

Рациональное использование маневровых локомотивов.

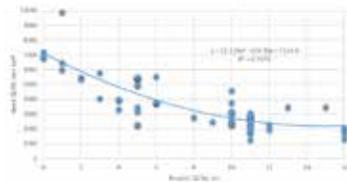
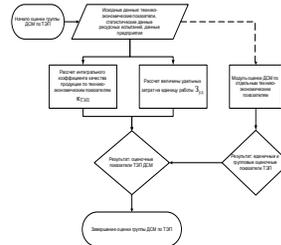
УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА



ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ТЕХНИКИ

92

Выбор дорожно-строительной техники в условиях информационной неопределенности.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 332.1

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-9>

Ресурсосберегающий подход к организации доставки грузов в региональных цепях поставок



Валерий ХАЙТБАЕВ



Владимир КОСТРОВ



Евгений ЧЕРНЯЕВ

*Валерий Абдурахманович Хайтбаев*¹, *Владимир Николаевич Костров*², *Евгений Васильевич Черняев*³

¹ Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия.

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия.

³ Вольский военный институт материального обеспечения, Вольск, Россия.

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

² ORCID 0000-0002-8703-6713; РИНЦ SPIN-код: 9368-6510; РИНЦ Author ID: 353523.

³ ORCID 0009-0003-9646-5995; РИНЦ SPIN-код: 3339-3490; РИНЦ Author ID: 1197150.

✉ ¹ vhaitbaev21@mail.ru.

✉ ² vnkostrov@yandex.ru.

✉ ³ ki-la@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Цель статьи заключается в выборе и обосновании подхода к формированию региональной ресурсосберегающей модели распределения грузов на основе определения экономически целесообразного количества транспортно-логистических центров (ТЛЦ), обеспечивающих снижение затрат на доставку.

В процессе исследования были использованы методы экономико-математического моделирования, статистического и сравнительного анализа, корреляционно-регрессионного, абстрактно-логического, теоретико-эмпирического и структурного анализа.

В работе проведены анализ научных подходов к уменьшению затрат при выборе экономически обоснованного количества объектов транспортно-логистической инфраструктуры с позиции более эффективной организации пространственного выбо-

ра инфраструктурных объектов транспортно-логистической сети, а также корреляционно-регрессионный анализ влияния количества объектов транспортно-логистических центров на транспортные затраты при распределении грузов в цепях поставок и рассчитана аналитическая зависимость между этими показателями; обосновано влияние уровня цен при доставке грузов на показатели ресурсосбережения в системе распределения грузов.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы при определении уровня логистических затрат и их влияния на цены конечных товаров и услуг, что является одним из способов реализации цели ресурсосбережения для коммерческих компаний и органов исполнительной власти.

Ключевые слова: ресурсосберегающая модель, склады, транспортно-логистические центры, инфраструктура, регион, ресурсы, корреляционно-регрессионный анализ.

Благодарность: исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства железнодорожного транспорта (Росжелдор) на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения. Проект «Проектирование ресурсосберегающей транспортно-логистической системы в экономике субъектов РФ». Интернет-номер/Регистрационный номер: 124040300020–8.

Для цитирования: Хайтбаев В. А., Костров В. Н., Черняев Е. В. Ресурсосберегающий подход к организации доставки грузов в региональных цепях поставок // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-9>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение в практику бизнеса инновационных подходов к формированию региональной ресурсосберегающей модели распределения грузов на основе определения экономически целесообразного количества транспортно-логистических центров (ТЛЦ), которые должны обеспечить снижение затрат, является очевидным приоритетом не только менеджмента компаний, но и органов исполнительной власти всех уровней управления. В этой связи в фокусе корпоративной и государственной экономической политики первоочередными задачами находятся разработка и внедрение ресурсосберегающих механизмов организации экономического пространства, причем одной из приоритетных целей является разработка подходов к формированию и, собственно, моделей сети доставки грузов с учетом их влияния на механизм ценообразования конечных товаров и услуг.

В качестве объекта анализа и оптимизации выбрана региональная логистическая цепь. Выбор такого объекта обусловлен целевой направленностью данной работы, которая является частью научного исследования в рамках государственного задания Федерального агентства железнодорожного транспорта.

Очевидно, что кроме региональных цепей поставок, существуют и другие, например, отраслевые, транснациональные или глобальные и т. д. Специфика каждой из них характеризуется, прежде всего, целевыми установками, масштабом вовлеченности участников доставки грузов и результатом, который может быть не только экономическим.

В качестве основы улучшения качества транспортно-логистической услуги, предполагающей, в том числе уменьшение ее стоимости, авторами предложен ресурсосберегающий подход, который предусматривает уменьшение использования совокупности экономических ресурсов на доставку грузов с использованием транспортно-логистической сети при неизменных требованиях заказчиков. В отличие от затратного подхода, ресурсосберегающий предусматривает уменьшение объема используемых ресурсов для достижения планируемых целевых показателей.

Поэтому задача уменьшения количества ТЛЦ в транспортно-логистических сетях, с одной стороны, предусматривает выбор

маршрута с меньшим их количеством, с другой – обеспечивает уменьшение затрат на доставку грузов.

Задача проектирования параметров указанных сетей достаточно тривиальна, однако недостаточный учет характеристик территорий их формирования, развитости сети транспортно-логистических центров, эффекта масштаба зачастую приводят к неудовлетворенным ожиданиям заказчиков и противоположным результатам, основными из которых являются дополнительные капитальные вложения и рост цен на конечные товары и услуги.

Анализ целого ряда региональных стратегий формирования сетей ТЛЦ показывает, с одной стороны, внимание, уделяемое их развитию, но, с другой, во-первых, не всегда высокий уровень их практической реализации, во-вторых, значительное превышение в ряде случаев запланированного бюджета на создание сетей ТЛЦ и, наконец, рост затрат на логистику в цене товаров и услуг.

Так, например, разработанная стратегия формирования сети ТЛЦ Самарской области¹ не была выполнена в полном объеме. Стратегия социально-экономического развития Саратовской области до 2025 года и ее новая редакция со сроками реализации основных мероприятий до 2030 года² предполагает создание сети транспортно-логистических центров – Саратовского, Ртищевского, Петровского, Хвалынского, Балаковского, Озинского, Красноармейского и в этой части пока не полностью выполнена. В прогнозе социально-экономического развития Оренбургской области³, несмотря на наличие государственной программы «Развитие транспортной системы», отсутствует развернутый раздел, касающийся транспорта и логистики. В стра-

¹ Постановление Правительства Самарской области от 23 сентября 2010 года № 422 «О Концепции развития региональной транспортно-логистической системы Самарской области на 2011–2015 годы». [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/945029027>. Доступ 05.05.2024.

² Стратегия социально-экономического развития Саратовской области до 2030 года. [Электронный ресурс]: <https://investinsaratov.ru/files/docs/321-p.pdf>. PDF. Доступ 05.05.2024.

³ Прогноз социально-экономического развития Оренбургской области на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов. [Электронный ресурс]: <https://mineconomy.orb.ru/documents/active/11493/>. Доступ 05.05.2024.



тегии социально-экономического развития Пензенской области⁴ есть раздел «транспорт», где основное внимание уделяется перевозке пассажиров, но плана развития транспортно-логистического комплекса в виде кластера или сети нет. В отличие от указанных стратегий, стратегия социально-экономического развития Республики Татарстан⁵ предусматривает пространственное развитие производительных сил, промышленных кластеров, в том числе транспортно-логистического, что показывает понимание и заинтересованность руководства республики в развитии этой отрасли региональной экономики. Анализ стратегии социально-экономического развития Ульяновской области⁶ показывает, что в силу важности транспортного комплекса выделены в отдельный раздел цели и задачи его развития. Однако в стратегии не рассматриваются задачи формирования единой транспортной системы региона и роль транспортно-логистической услуги в региональном социально-экономическом развитии. Очевидно, это не полный перечень региональных стратегий, которые, имея достаточно высокий уровень проработки, не лишены вместе с тем и недостатков с точки зрения детализации планов развития транспортно-логистических систем (далее – ТЛС).

Вместе с тем запрос на формирование эффективных ресурсосберегающих ТЛС со стороны населения и бизнеса ставит перед органами власти задачу создания интегрированных с другими отраслями экономики товаропроводящих систем со сбалансированными параметрами транспортной и терминальной инфраструктуры. В этих условиях поиск новых источников экономии расходов на транспортно-логистические услуги становится приоритетной задачей при относительно небольшом количестве альтернатив снижения затрат и обеспечения конкурентоспособности отрасли.

⁴ Стратегия социально-экономического развития Пензенской области на период до 2035 года. [Электронный ресурс]: <https://pnzreg.ru/open-government/nekommercheskie-organizatsii/etnokonfessionalnye-etnosheniya/Стратегия%202035.pdf>. Доступ 05.05.2024.

⁵ Стратегия социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 года. [Электронный ресурс]: <https://eco.tatarstan.ru/strategiya-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya.htm>. Доступ 05.05.2024.

⁶ Стратегия социально-экономического развития Ульяновской области до 2030 года. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/463710828>. Доступ 05.05.2024.

Задачу ресурсосбережения достаточно часто ассоциируют с общепризнанным понятием «бережливое производство». Однако границы ресурсосбережения выходят за рамки отдельно взятого предприятия или группы предприятий, в то время как о «бережливом производстве» принято говорить, как о концепции уменьшения затрат в границах предприятия.

Недооценка реализации программ ресурсосбережения на уровне корпораций, отраслей и региональных экономик, очевидно, уменьшает не только эффективность экономической деятельности, но и качество товаров и услуг как результат использования ресурсов в производственной деятельности.

Вместе с тем, только понимания важности внедрения технологий ресурсосбережения, которые могут обеспечить снижение затрат и увеличение преимуществ, недостаточно. Само внедрение технологий ресурсосбережения требует значительных затрат для перехода к более эффективной организации производства, которая может обеспечить повышение производительности труда и уменьшение затрат ресурсов.

В границах предлагаемого исследования в качестве технологий ресурсосбережения, как указано выше, использованы модели расчета количества объектов ТЛЦ, что в совокупности обеспечивает уменьшение затрат ресурсов на функцию доставки грузов.

Вместе с тем существуют и другие способы ресурсосбережения в ТЛС, которые в большей или меньшей степени доказали свою эффективность. Так, нужно отметить подход, основанный на методологии управления запасами в цепях поставок, при котором, в каждом последующем ТЛЦ системы предусматривается расчет параметров запасов с учетом таких же параметров, как на предыдущем ТЛЦ. Это способствует уменьшению затрат на содержание и иммобилизацию инвестиций в запасы, увеличению скорости оборачиваемости капитала и, следовательно, минимизации объемов неотгруженных товаров. Поэтому при таком встраивании ТЛЦ в систему основным показателем ресурсосбережения будет не столько величина складских запасов во всех звеньях, сколько учет методов управления ими на предыдущих ТЛЦ.

Кроме перечисленных подходов, условиями ресурсосбережения в ТЛС также являются применяемые технологии грузопере-

работки и уровень автоматизации логистических процессов. Очевидно, например, что высокий уровень автоматизации логистических процессов одного ТЛЦ в системе не даст общего системного эффекта, поскольку в данном случае эффект ресурсосбережения предусматривает сбалансированность и гармонизацию используемых технологий грузопереработки во всех ТЛЦ системы.

В этой связи рациональный выбор дислокаций размещения и расчет количества инфраструктурных объектов транспортно-логистической системы как раз является одной из таких альтернатив для снижения затрат на транспортно-логистические услуги.

Соответственно *целью* исследования, результаты которого излагаются в статье, является обоснование подхода к формированию региональной ресурсосберегающей модели распределения грузов на основе определения экономически целесообразного количества транспортно-логистических центров, обеспечивающих минимизацию логистических затрат поставщика и минимизацию стоимости транспортно-логистической услуги для потребителя.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ИССЛЕДОВАНИЙ

ТЛЦ, играющие ключевую роль в системе доставки и распределения больших объемов грузов и формирующие логистическую цепь поставок, как правило, не обеспечивают требуемый уровень эффективности реализации функций доведения грузов до конечного потребителя. Сформированные системы ТЛЦ в границах «поставщик – заказчик» по замыслу проектировщиков должны обеспечивать уменьшение затрат на транспортировку, грузопереработку и распределение в условиях консолидации больших объемов грузов. Однако, большое (излишнее) количество ТЛЦ на маршруте от поставщика к заказчику приводит к росту затрат на транспортно-логистические услуги, что влечет за собой увеличение стоимости конечных товаров и услуг. В этом случае имеет место нелинейная параболическая зависимость, для которой требуется проведение расчетов влияния количества ТЛЦ на логистические затраты, где доля транспортных затрат наиболее велика.

Анализ научных трудов, посвященных концепциям снижения транспортно-логистических затрат, показывает их большое разнообразие и по количеству, и по функциональ-

ным областям. Так, в базе данных eLibrary.ru работ по этой проблематике насчитывается свыше одной тысячи, в международных базах данных, таких как Web of Science и Scopus, – свыше 2,5 тыс. Однако работ, в которых исследуется влияние количества ТЛЦ и порядок закрепления за ними потребителей, существенно меньше.

Тем не менее, можно выделить ряд работ, которые заслуживают внимания в контексте выбранной темы исследования. Так, в работе Д. Бауэрсокса и Д. Клосса [1] проводится анализ влияния количества складов на суммарные транспортные издержки и предлагается пример определения территорий обслуживания ТЛЦ по критерию наименьших общих издержек. Исследование доказывает, что при первоначальном увеличении количества ТЛЦ в цепи поставок транспортные издержки уменьшаются, и затем по мере роста их числа происходит увеличение затрат. Однако такая зависимость наблюдается при достаточно большом грузопотоке.

Кроме того, порядок закрепления потребителей за определенным ТЛЦ обосновывается способностью обеспечить поставку груза с минимальными общими затратами на логистику.

Тем не менее, при фокусировании усилий на перестройку логистической системы и стремлении минимизировать затраты авторы не показывают связь между задачами расчета оптимального количества ТЛЦ и закрепления экономически обоснованного количества потребителей за соответствующими объектами. Поэтому задачи ресурсосбережения решаются локально, без учета влияния текущего результата на следующий.

В исследовании Д. Уотерса [2] приводятся примеры достаточно тривиальных способов принятия решений по выбору лучшего места дислокации логистического объекта, который должен обеспечить лучшие условия доступа потребителей по сравнению с другими уже существующими. Подробно раскрывается технология планирования мест размещения инфраструктурных логистических объектов, однако нет оценки и сравнения суммарных логистических затрат при переприкреплении потребителей к другим центрам обеспечения. Так же, как и в работе [1], автор обосновывает зависимость затрат на перевозку от количества элементов инфраструктуры, но оценка основывается на экспертном анализе.



Джеффри Г. Шатт в своей работе [3] исследует проблемы планирования товарного потока, дает оценку современным логистическим технологиям управления товаропотоками, таким как Materials requirements planning (планирование потребности в материалах, MRP), Distribution requirements planning (планирование потребностей в распределении, DRP), Just-in-time («точно в срок», JIT), Theory of Constraints (теория ограничений, TOC). В основе анализа, предложенного автором, находятся потоки материалов, которые в основном оцениваются на производстве в различных отраслях промышленности с позиции их возможного прогнозирования и планирования традиционными и современными методами. Усовершенствованные планировочные решения и способы их внедрения в практику бизнеса составляют методологическую основу работы. Очевидно, проблема затрат на логистику – одна из центральных, однако пространственное сетевое планирование грузопотока в контексте привязки к точкам консолидации и распределения, а также количественные параметры инфраструктурных объектов не рассматриваются.

В аналогичных трудах похожие концепции и подходы представлены исследованиями, направленными на методологические аспекты планирования, в том числе товаропотоков в логистике, с использованием математического аппарата, и раскрываются в виде последовательных стадий преобразования имеющегося научного инструментария в новые методы и подходы. К таким работам относятся труды А. Кларка и Г. Скарфа [4], С. Синго [5], С. Тэйюра, Р. Гэнешэна и М. Мэгэзина [6], Дж. М. Рива [7] и других авторов.

Основой проектирования систем распределения грузопотоков является экономико-математическое моделирование, поэтому значительное число работ посвящено возможностям использования математического аппарата при решении локальных и системных задач управления цепями поставок. Так, например, в работе Дж. Шапиро [8] предлагаются способы планирования и моделирования цепей поставок, начиная от этапа выбора конфигурации цепей поставок и до их формирования и управления. По содержанию работа является научным пособием с выраженной методологической направленностью, в которой анализируются и оцениваются используемые на практике различные информа-

ционные технологии, а также модели и методы принятия решений управления цепями поставок. В работе предлагаются методы интегрированного подхода к управлению цепями поставок на примере компаний и корпораций. Тем не менее, проблемы, сформулированные в цели настоящего исследования, в прямой постановке не рассматриваются.

Следует отметить ряд других работ, в которых даются математические подходы к управлению и оптимизации функций и операций в цепях поставок. К таким исследованиям относятся работы Д. Тернера [9], В. С. Лукинско⁷, П. М. Симонова⁸, Г. И. Просветова⁹, О. О. Замкова, А. В. Толстопятенко, Ю. Н. Черемных¹⁰, Н. Ш. Кремера¹¹ и других авторов.

Значительно меньше работ относятся к разработанным методологическим подходам проектирования логистических систем, где основными параметрами являются количество ТЛЦ и экономическая целесообразность прикрепления потребителя к тому или иному ТЛЦ. Очевидно, задача ресурсосбережения здесь является центральной. К этим исследованиям относятся работы А. Леша [10], Д. Дж. Бауэрсокса [1], Е. В. Болговой, М. В. Курниковой [11], Б. А. Аникина, А. П. Тяпухина¹² [12] и другие.

Проблемы рационального размещения производительных сил находят свое отражение при формировании государственной социально-экономической политики. Так, в Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 февраля

⁷ Модели и методы теории логистики: Учеб. пособие. 2-е изд. / Под ред. В. С. Лукинско. – СПб.: Питер, 2007. – 448 с.

⁸ Симонов П. М. Экономико-математическое моделирование [Электронный ресурс]: Учеб. пособие: в 2 ч. – Пермь, 2019. – Ч. 1. – 230 с.

⁹ Просветов Г. И. Математические методы в логистике: задачи и решения: Учебно-практ. пособие. – М.: Изд-во «Альфа-Пресс», 2014. – 304 с.

¹⁰ Замков О. О., Толстопятенко А. В., Черемных Ю. Н. Математические методы в экономике: Учебник. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, Изд-во «ДИС», 1998. – 368 с.

¹¹ Кремер Н. Ш. Исследование операций в экономике: Учеб. пособие. – М.: ЮНИТИ, 2005. – 407 с.

¹² Аникин Б. А., Тяпухин А. П. Коммерческая логистика: Учебник. – М.: ТК «Велби», Изд-во «Проспект», 2005. – 432 с.

2019 года № 207-р¹³, сформулированы основные проблемы, тенденции, вызовы, цели и задачи, как на уровне федеративного устройства, так и на региональном уровне. Главной задачей этого документа является обеспечение сбалансированного и устойчивого развития социально-экономического пространства Российской Федерации. Предусматриваются направления на уменьшение межрегиональных различий в части экономики, социальной сферы, технологий и элементов системы национальной безопасности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для проведения исследования послужили научно-методический и методологический аппараты, которые были проанализированы в разделе «Обзор литературы и исследований» данной работы, а также результаты реализации стратегий и программ формирования пространственных моделей сетей ТЛЦ органов государственной власти и бизнеса. Методологический подход, предложенный в исследовании, заключается в использовании аналитических моделей и зависимостей определения количественных и географических параметров создания систем распределения грузов в цепях поставок на основе использования сети ТЛЦ. С этой целью для получения эффекта ресурсосбережения потребовались решения задач по расчету и обоснованию системы распределения грузов с минимально достаточным и экономически целесообразным количеством объектов ТЛЦ. Это позволило добиться более эффективной модели доставки грузов, что обеспечило уменьшение затрат на транспортировку в контексте планируемых позитивных ожиданий от предлагаемых мероприятий.

В качестве приоритета теоретической базы в статье использованы математические методы, в частности положения регрессионно-корреляционного анализа. Обоснование использования данного вида анализа основывается на выборе достаточно сложного объекта оптимизации – региональной транспортно-логистической сети и универсальности и доступности самого способа анализа

и оптимизации – регрессионно-корреляционного анализа. В виду своей относительной простоты и универсальности используемый математический аппарат для выбранного объекта исследования имеет ряд недостатков, основными из которых являются принимаемые допущения по объему перерабатываемого и перевозимого груза, неполная структура логистических затрат, используемая в расчетах, и присущие данному методу погрешности. Кроме того, в модели не предусмотрено при вывозе грузов из ТЛЦ для каждой партии выбор вида и типа транспорта, что можно отнести к определенным ограничениям используемой в статье модели. Тем не менее, определив целевую функцию, систему ограничений и допущений данный метод может использоваться для решения подобных задач.

Кроме того, в работе использована теория формирования и развития отраслевой и региональной экономики. Для анализа и оценки систем распределения грузов были использованы труды российских и зарубежных ученых.

Эмпирическую основу исследования составили отчеты по затратам компаний, выполняющих функции транспортировки и грузопереработки грузов, отраслевые статистические отчетные документы, документы регионального и федерального планирования основных социально-экономических показателей.

Аналитическими предпосылками использования предлагаемых методов исследования для формирования механизма ресурсосбережения при распределении грузов являются необходимость использования специального математического аппарата, адекватного специфики решаемой задачи в условиях преобладания случайных величин. Поскольку транспортные затраты в системе распределения грузов изменяются нелинейно, учет такой зависимости требует расчета экономически выгодного количества ТЛЦ.

Нормативные предпосылки исследования составляют положения ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации»¹⁴. Практика отраслевых стратегий развития ТЛС сво-

¹³ Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ № 207 (ред. от 16.12.2021) 13.02.2019. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318094/. Доступ 05.05.2024.

¹⁴ Федеральный закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации». Принят Государственной Думой 20 июня 2014 года. Одобрен Советом Федерации 25 июня 2014 года



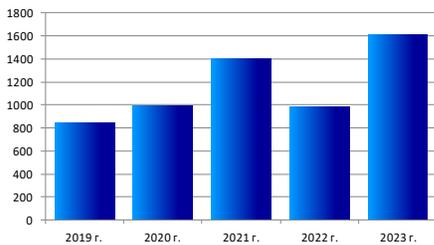


Рис. 1. Динамика объема ввода складских площадей в регионах России, тыс. кв. м.

[Источник: разработано авторами с использованием данных Электронного справочника «Гид Склады РФ 2024»¹⁹].

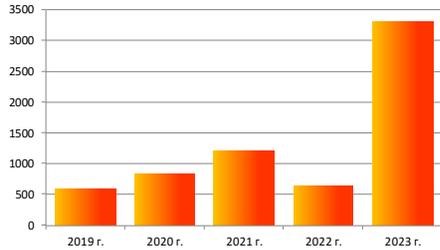


Рис. 2. Динамика объема сделок со складской недвижимостью в регионах России, тыс. кв. м.

[Источник: разработано авторами с использованием данных Электронного справочника «Гид Склады РФ 2024»¹⁹].

дится к разработке и реализации пакета документов в составе: Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года¹⁵; Стратегии развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года¹⁶; Стратегии развития автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта (проект)¹⁷, а также Федерального проекта «Транспортно-логистические центры» (структурного компонента раздела 1 «Транспортная инфраструктура» Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры)¹⁸.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ отчетных данных по объектам ТЛС по регионам и федеральным округам и их сравнение с динамикой изменения региональных транспортных показателей не отвечает на вопрос зависимости затрат на транспортировку от количества ТЛЦ. Такая связь видна при анализе спроектированной системы распределения грузов через сеть ТЛЦ для определенной номенклатуры и объемов доставки грузов.

Тем не менее, анализ отчетных документов, например справочника «Гид Склады

РФ»¹⁹ по складской недвижимости, в сравнении с динамикой транспортных затрат условного региона, взятого из отчетов Федеральной службы государственной статистики²⁰, представляет очевидный научно-практический интерес.

На рис. 1 и 2 показаны динамика объемов ввода складских площадей и динамика объемов сделок со складской недвижимостью в регионах России.

Анализ данных на диаграммах показывает линейный характер динамики показателей. Динамика показателя на рис. 1 в целом повторяет динамику рис. 2. Это повторение обусловлено зависимостью объема ввода от возрастающих величин объемов сделок, худшим показателем является 2022 год. Наблюдается почти двукратное превышение объема ввода над объемами сделок, за исключением 2023 года. В 2023 году объемы сделок более чем в два раза превысили объемы ввода. То есть возрастающие объемы сделок стимулируют увеличение предложений на рынке складской недвижимости и строительства новых объектов. Кроме того, наблюдается значительное уменьшение значений показателей в 2022 году, и резкий рост в 2023 году, в связи с процессом импортозамещения. Сопоставление показателей на рис. 1 и 2 с затратами на транспортировку и вводом новых объектов²⁰, на примере Самарской области, указанные в табл. 1, показывает наличие вроде бы очевидной корреляции между этими временными рядами.

Однако, более детальный анализ этой связи может показать отрицательную корреляцию, поскольку анализ зависимости затрат

¹⁵ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. [Электронный ресурс]: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf>. Доступ 05.05.2024.

¹⁶ Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 года № 877-р. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92060. Доступ 05.05.2024.

¹⁷ Стратегия развития автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта. Проект. [Электронный ресурс]: <https://www.mintrans.ru/documents/7/9306>. Доступ 05.05.2024.

¹⁸ Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года. Утвержден Распоряжением Правительства РФ от 30.09.2018 г. № 2101-р. <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>. Доступ 05.05.2024.

¹⁹ Электронный справочник «Гид Склады РФ 2024». [Электронный ресурс]: <https://гидсклады.рф>.

²⁰ Регионы России: социально-экономические показатели. 2023: статистический сборник. – М.: Росстат. – 2023. – 1126 с.

Агрегированные региональные экономические показатели Самарской области
[разработано авторами на основе ²⁰]

Показатели	Годы					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Строительство (к предыдущему году %)	104,5	80,7	116,2	86,8	121,8	102,1
Транспортировка и хранение (к предыдущему году %)	104,0	103,0	100,8	92,1	104,2	105,2

на транспортировку от количества объектов логистической инфраструктуры (ТЛЦ, склады) и порядка прикрепления потребителей к ТЛЦ следует оценивать по группам номенклатур товаров и их объемам при доставке потребителям в цепях поставок.

Разработанный подход, основанный на определении зависимости между транспортными затратами и количеством ТЛЦ, позволяет сформировать более экономичную конфигурацию системы доставки грузов с минимально-необходимым количеством ТЛЦ. Подход основан на формируемой модели: «дислокация поставщика – дислокация ТЛЦ – дислокация получателя». Способ расчета этой зависимости включает несколько этапов.

В первую очередь, оцениваются способы доставки груза без ТЛЦ (прямой) и с ТЛЦ. Для прямой доставки используем формулу (1):

$$R^I = R_T + R_{\text{прп}} + R_{\text{уп}} + R_X, \quad (1)$$

где R^I – транспортные расходы на перевозку груза;

R_T – расходы на транспортировку;

$R_{\text{прп}}$ – расходы на погрузо-разгрузочные работы;

$R_{\text{уп}}$ – расходы на упаковку груза;

R_X – расходы на хранение груза в начальной и конечной точке.

Для доставки с использованием ТЛЦ расходы будут рассчитываться по формуле (2):

$$R^2 = R_T + R_{\text{прп}} + R_{\text{уп}} + (n * R_X), \quad (2)$$

где n – количество ТЛЦ.

Принципиально для способа доставки грузов учитывать ограничение (3) [1]:

$$\Sigma \frac{P_V + T_V}{N_{\bar{X}}} + W_{\bar{X}} + L_{\bar{X}} \leq \Sigma P_{\bar{X}} + T_{\bar{X}}, \quad (3)$$

где P_V – расходы на грузопереработку консолидированной грузовой отправки;

T_V – расходы на транспортировку консолидированной грузовой отправки;

$W_{\bar{X}}$ – расходы на хранение средней грузовой отправки;

$L_{\bar{X}}$ – расходы на местную доставку средней грузовой отправки;

$N_{\bar{X}}$ – число средних отправок в консолидированной отправке;

$P_{\bar{X}}$ – расходы на грузопереработку средней отправки;

$T_{\bar{X}}$ – транспортные расходы на прямую доставку средней отправки.

То есть объемы перевозок должны быть достаточно большими – настолько, чтобы их величина позволила получить эффект масштаба с возможностью покрывать затраты на грузопереработку в ТЛЦ.

Затем методом простого перебора выбираются маршруты доставки с учетом географии и количества ТЛЦ для каждого варианта цепи поставок. В табл. 2 указаны примеры расчетов для двух условных маршрутов.

В табл. 3 указываются результаты расчетов по выбранным маршрутам.

По рассчитанным усредненным значениям по каждому маршруту с использованием таблицы Excel строятся графики зависимости затрат на транспортировку от количества ТЛЦ.

Далее проводится анализ чувствительности прироста количества ТЛЦ к изменению затрат на транспортировку. Для определения характера этой зависимости проводят вычисления. Очевидно, эта зависимость – нелинейная параболического типа, где уравнение нелинейной регрессии параболического типа имеет вид (4)²¹:

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (4)$$

где a, b, c – коэффициенты регрессии.

После расчета коэффициентов регрессии и оценки исследуемой зависимости рассчитываются индексы корреляции и детерминации²¹.

Для проведения вычислительного эксперимента была выбрана организация доставки медикаментов в несколько регионов

²¹ Задорожный В. Н., Зальмеж В. Ф., Трифонов А. Ю., Шаповалов А. В. Высшая математика для технических университетов. Линейная алгебра: Учеб. пособие. – Томск. – Изд-во ТПУ, 2009. – 310 с.





Таблица 2

Выбор маршрутов и расчет стоимости по каждому маршруту

Маршрут	П-А-Д-Л-К-И-Б1								
Отправка	Получение	L, км	R _T , р	R _X , р	R _{уп} , р	Пог, р	Раз, р	R _{ппр} , р	R, р
П	А	L ₁	R _{T1}	R _{X1}	R _{уп1-5}	Пог ₁	Раз ₁	R _{ппр1}	R ₁
А	Д	L ₂	R _{T2}	R _{X2}		Пог ₂	Раз ₂	R _{ппр2}	R ₂
Д	Л	L ₃	R _{T3}	R _{X3}		Пог ₃	Раз ₃	R _{ппр3}	R ₃
Л	К	L ₄	R _{T4}	R _{X4}		Пог ₄	Раз ₄	R _{ппр4}	R ₄
К	И	L ₅	R _{T5}	R _{X5}		Пог ₅	Раз ₅	R _{ппр5}	R ₅
								Итог	Σ

Маршрут	П-А-Д-Л-К-И-Б1								
Отправка	Получение	L, км	R _T , р	R _X , р	R _{уп} , р	Пог, р	Раз, р	R _{ппр} , р	R, р
П	А	L ₁	R _{T1}	R _{X1}	R _{уп1-6}	Пог ₁	Раз ₁	R _{ппр1}	R ₁
А	Д	L ₂	R _{T2}	R _{X2}		Пог ₂	Раз ₂	R _{ппр2}	R ₂
Д	Л	L ₃	R _{T3}	R _{X3}		Пог ₃	Раз ₃	R _{ппр3}	R ₃
Л	К	L ₄	R _{T4}	R _{X4}		Пог ₄	Раз ₄	R _{ппр4}	R ₄
К	Б1	L ₆	R _{T6}	R _{X6}		Пог ₆	Раз ₆	R _{ппр6}	R ₆
								Итог	Σ

где П – поставщик, Б1 – заказчик № 1; А, Д, Л, К, И – ТЛЦ на выбранных маршрутах доставки, R – транспортные расходы на перевозку груза; R_T – расходы на транспортировку; R_{ппр} – расходы на погрузо-разгрузочные работы; R_{уп} – расходы на упаковку груза; R_x – расходы на хранение груза.
 Источник: разработано авторами.

Таблица 3

Результаты расчетов на доставку грузов по маршруту П-Б1 с учетом системы ТЛЦ [разработано авторами]

Маршрут	R, руб
П-А-Д-Л-К-И-Б1	R ₁
П-А-Д-Л-К-Б1	R ₂
П-А-Д-Л-Б1	R ₃
П-Д-Л-Б1	R ₄
П-Д-Б1	R ₅
П-Г-Д-Ж-И-Б1	R ₆
П-Д-Ж-И-Б1	R ₇
П-Д-Ж-Б1	R ₈
П-Ж-Б1	R ₉

Российской Федерации – Самарскую, Саратовскую и Оренбургскую области от одного из производителей Ярославской области (г. Ярославль). На рис. 3 и 4 показаны схемы доставки медикаментов напрямую без ТЛЦ и с использованием системы ТЛЦ соответственно.

После выбора маршрутов рассчитывается стоимость прямой доставки для различных заказчиков от одного из производителей Ярославской области.

Используя данные табл. 2, рассчитаем затраты на транспортировку по нескольким выбранным для примера маршрутам доставки с использованием ТЛЦ. В табл. 4 указаны результаты расчетов (фрагмент).

Аналогично проводятся расчеты по оставшимся маршрутам.

В табл. 5 показаны рассчитанные значения на перевозку по маршруту П-Б4 с учетом системы ТЛЦ.

На рис. 5 показаны результаты расчетов зависимости затрат на транспортировку от количества ТЛЦ.

Очевидно, что между затратами на перевозку и количеством ТЛЦ есть зависимость, характер которой нелинейный параболический. С помощью корреляционно-регрессионного анализа определим тесноту связи между этими показателями с выводом уравнения нелинейной регрессии.

В табл. 6 показаны требуемые значения для расчета матриц регрессии.

Полученное уравнение нелинейной регрессии имеет вид:

$$Y = 2375,64x^2 - 11794,14x + 55977,78. \quad (5)$$

Индексы корреляции и детерминации равны соответственно $r = 0,99$ и $R^2 = 0,98$. На рис. 6 показаны результаты, полученные с помощью уравнения регрессии.

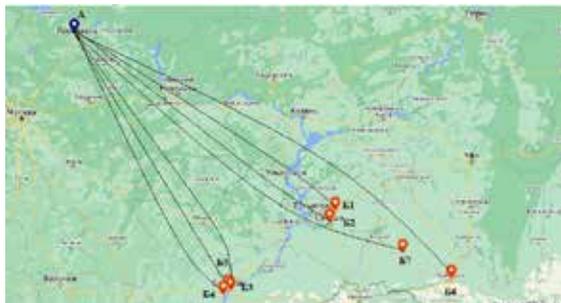


Рис. 3. Доставка грузов напрямую от производителя.



Рис. 4. Доставка грузов от производителя с использованием ТЛЦ.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Таким образом, вычислительный эксперимент подтвердил предположение о нелинейной параболической зависимости между транспортными затратами и количеством ТЛЦ. Индексы корреляции и детерминации подтверждают тесноту связи между эмпирическими и теоретическими значениями, которые не опускались ниже значения 0,89. Это подтверждает, что теоретическая модель с допустимой точностью соответствует реальной ситуации. Следовательно, подход возможно использовать для расчетов и прогнозирования зависимости величин транспортных затрат от количества ТЛЦ на маршруте, что имеет существенное практическое значение как для поставщиков, так и для потребителей.

Результаты проведенного исследования, в границах которого решалась задача поиска подхода уменьшения затрат на организацию доставки грузов в контексте ресурсосберегающей парадигмы, помогли подтвердить выдвинутое предположение об очевидной зависимости затрат на транспортировку, включая расходы на хранение и погрузочно-разгрузочные работы в ТЛЦ, от количества ТЛЦ на маршрутах. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при формировании стратегий развития региональных транспортно-логистических систем в части выбора методологии определения рациональных количественных параметров указанных объектов.

Кроме того, удалось выявить проблему не учета этой зависимости органами государ-

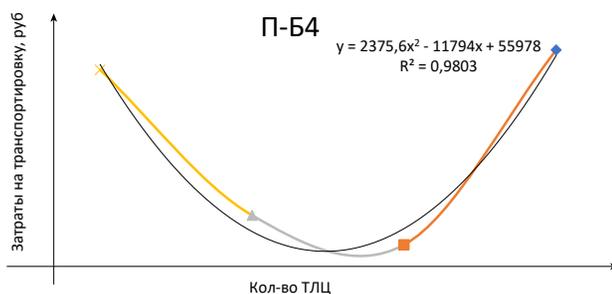


Рис. 5. Зависимость затрат на транспортировку от количества ТЛЦ при перевозке груза по маршруту П-54 [разработано авторами].





Таблица 4

Результаты расчетов стоимости доставки грузов по нескольким маршрутам П-Б4 с учетом системы ТЛЦ [разработано авторами]*

Маршрут П-Г-Д-М-Н-Б4									
Отправка	Получение	L, км	Rt, р	Rx, р	Руп, р	Пог, р	Раз, р	Рппр, р	R, р
П	Г	405	8 100	156	8 437	2 230	948	3 178	19 871
Г	Д	417	8 340	669		948	1 450	2 899	11 908
Д	М	256	5 120	223		1 450	1 394	2 788	8 131
М	Н	31	622	145		1 394	836	1 673	2 439
Н	Б4	22	432			836	3 345	4 181	4 613
								Итого	46 962
Маршрут П-Г-Д-М-Б4									
Отправка	Получение	L, км	Rt, р	Rx, р	Руп, р	Пог, р	Раз, р	Рппр, р	R, р
П	Г	405	8 100	156	8 437	2 230	948	3 178	19 871
Г	Д	417	6 255	134		948	1 450	2 899	9 288
Д	М	256	3 840	223		1 450	1 394	2 788	6 851
М	Б4	52	776			1 394	3 345	4 739	5 514
								Итого	41 524
Маршрут П-Д-М-Б4									
Отправка	Получение	L, км	Rt, р	Rx, р	Руп, р	Пог, р	Раз, р	Рппр, р	R, р
П	Д	807	16 140	669	8 437	2 230	1 450	3 680	28 926
Д	М	256	5 120	223		1 450	1 394	2 843	8 186
М	Б4	52	1 034			1 394	3 345	4 739	5 773
								Итого	42 885
Маршрут П-Г-М-Б4									
Отправка	Получение	L, км	Rt, р	Rx, р	Руп, р	Пог, р	Раз, р	Рппр, р	R, р
П	Г	405	8 100	781	8 437	2 230	948	3 178	20 495
Г	М	609	12 180	446		948	1 394	2 342	14 968
М	Б4	52	1 603			1 394	3 345	4 739	6 341
								Итого	41 804

* Стоимостные показатели затрат взяты на конец 2023 года.

Таблица 5
Рассчитанные значения на перевозку по маршруту П-Б4 с учетом системы ТЛЦ [разработано авторами]

Маршрут	R, руб
П-Г-Д-М-Н-Б4	46 962
П-Г-Д-М-Б4	41 524
П-Д-М-Б4	42 885
П-Г-М-Б4	41 804
П-Г-Б4	43 808
П-М-Б4	49 009

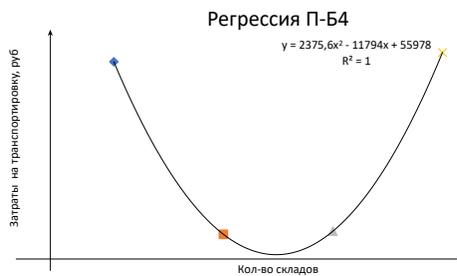


Рис. 6. Расчет исследуемой зависимости с помощью уравнения регрессии [разработано авторами].

Таблица 6
Необходимые значения для расчета матриц регрессии П-Б4 [разработано авторами]

№	X	Y	x ²	x ³	x ⁴	xy	yx ²	y	(Y-y) ²	(Y-ycp) ²
1	1	46408,45	1	1	1	46408,45	46408,45	46559,28	22750,44	4404699,09
2	2	42344,55	4	8	16	84689,10	169378,20	41892,05	204753,99	3861863,65
3	3	41523,6	9	27	81	124570,80	373712,40	41976,10	204753,99	7762422,86
4	4	46962,25	16	64	256	187849,00	751396,00	46811,42	22750,44	7035955,19
Σ	10	177238,85	30	100	354	443517,35	1340895,05	177238,85	455008,86	23064940,80

**Экономический эффект использования предлагаемого подхода
[разработано авторами]**

Маршруты доставки	Снижение затрат, руб.	Экономический эффект, %
П-Б1	25286,7	5,1
П-Б2	22 126,6	8,8
П-Б3	16 146,7	26,9
П-Б4	28 017,9	10
П-Б5	23 121,1	16
П-Б6	14 084,5	5,6
П-Б7	7 257,5	6,1

ственной власти и сообществом предпринимателей. Отсутствие должного внимания к проблеме больших затрат при прямой доставке по сравнению с доставкой через систему ТЛЦ значительно уменьшает эффективность экономической деятельности предприятий, предоставляющих транспортно-логистические услуги.

Знание и реализация предлагаемого подхода в рамках стратегии ресурсосбережения может способствовать уменьшению себестоимости указанных услуг, что является экономически выгодным для всех участников логистической цепочки.

К основным результатам исследования относятся разработанный научно-практический подход уменьшения затрат в контексте стратегии ресурсосбережения, в основу которого положен принцип рациональной организации пространственного выбора инфраструктурных объектов транспортно-логистической сети и полученный экономический эффект по сравнению с прямой доставкой, показанный в табл. 7.

Разработанный подход с обоснованием рационального количества и дислокации ТЛЦ, обеспечивающий уменьшение затрат в системе доставки грузов, может быть использован при принятии управленческих решений и расчете затрат на доставку при разной конфигурации сети ТЛЦ с их различным количеством.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бауэрсокс Д. Дж., Клосс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2001. – 640 с. ISBN 5-901028-22-8.
2. Уотерс Д. Логистика. Управление цепью поставок: Пер. с англ. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 503 с. ISBN 5-238-00569-5.
3. Шатт Дж. Г. Управление товарными потоками: рук. по оптимизации логистических цепочек; пер. с англ. С. В. Кривошеин; науч. ред. А. Н. Тарашкевич. – Минск: Гревцов Паблицер, 2008. – 352 с. ISBN 978-985-6569-18-3.
4. Clark, A., Scarf, H. Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem. Management Science, INFORMS, 1960. Vol. 6, Iss. 4, pp. 475–490. DOI: 10.1287/mnsc.6.4.475.
5. Shingo, S. Non-Stock Production. The Shingo System of Continuous Improvement. Cambridge, MA: Productivity Press. 1988.
6. Tayur, S. R., Ganeshan, R., Magazine, M. J. Quantitative Models for Supply Chain Management. Norwell, MA: Kluwer Academic. 1999. [Электронный ресурс]: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-4949-9> [ограниченный доступ]. ISBN 978-0-7923-8344-4.
7. Reeve, J. M. The financial advantages of the lean supply chain. Supply Chain Management Review, 2002, March/April, pp. 42–49.
8. Шапиро Дж. Моделирование цепи поставок / Пер. с англ. под ред. В. С. Лукинского – СПб.: Питер, 2006. – 720 с. ISBN 5-272-00183-4.
9. Тернер Д. Вероятность, статистика и исследование операций / Пер. с англ. Е. З. Демиденко, В. С. Занадворова; Под ред. А. А. Рывкина. – М.: Статистика, 1976. – 432 с.
10. Леш А. Пространственная организация хозяйства: пер. с нем. / под ред. акад. А. Г. Гранберга. – М.: Наука, 2007. – 663 с. ISBN 978-5-02-035367-1.
11. Bolgova, E. V., Kurnikova, M. V. Modeling the spatial organization of the higher education system in the regional economy. Sustainable Growth and Development of Economic Systems: Contradictions in the Era of Digitalization and Globalization, 2019, pp. 43–61. DOI: 10.1007/978-3-030-11754-2_4.
12. Тяпухин А. П. Устойчивость систем поставок ресурсов // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 6. – С. 142–165. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-142-165>. ●

Информация об авторах:

Хайтбаев Валерий Абдурахманович – доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и логистики на транспорте Самарского государственного университета путей сообщения, Самара, Россия, vhaitbaev21@mail.ru.

Костров Владимир Николаевич – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой логистики и маркетинга Волжского государственного университета водного транспорта, Нижний Новгород, Россия; vnkostrov@yandex.ru.

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

Статья поступила в редакцию 05.05.2024, одобрена после рецензирования 26.08.2024, принята к публикации 28.08.2024.





Методика определения рационального порядка использования маневровых локомотивов на пассажирской станции



Екатерина КУЛИКОВА



Павел МИНАКОВ

Екатерина Борисовна Куликова ¹,
 Павел Андреевич Минаков ²

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

¹ ORCID 0000-0002-2904-0626; Scopus Author ID:
 57214271685; РИНЦ SPIN-код: 9454-4823; РИНЦ
 Author ID: 360594.

² ORCID 0000-0002-1194-2621; РИНЦ SPIN-код:
 2484-3100; РИНЦ Author ID: 1057564.

✉ ¹ iuit_kulikova@inbox.ru.

АННОТАЦИЯ

Железнодорожный транспорт является одним из важнейших перевозчиков пассажиров в Российской Федерации. На его долю в 2023 году пришлось более 35 % всех пассажирских перевозок. При этом на дальнее сообщение – почти 37 % от общего объема перевозок железнодорожным транспортом. Анализ динамики изменения пассажирооборота и объемов перевозок говорят о том, что рынок не только восстановился после беспрецедентного падения 2020 года, но продолжает уверенно расти. Рост объемов пассажирских перевозок влечет за собой увеличение объемов работы пассажирских и пассажирских технических станций. Увеличивается нагрузка на вокзальные комплексы (особенно в периоды массовых перевозок). Перевозчики постоянно работают над формированием новых транспортных продуктов, отличающихся скоростью и уровнем комфорта. Например, только АО «ФПК» сегодня предлагает своим клиентам порядка 90 комбинаций предложений, отличающихся не только категорией поезда, типом вагона, но и набором услуг в пути следования. При этом, очевидно, ключевым требованием, независимо от класса, явля-

ется высокое качество подготовки составов в рейс и слаженная работа всех подразделений пассажирского комплекса.

В настоящее время большинство исследований пассажирской инфраструктуры железнодорожного транспорта посвящено исследованию ее отдельных объектов, например, особенностям проектирования и эксплуатации транспортно-пересадочных узлов, технологии работы пассажирских и пассажирских технических станций. При этом мало внимания уделяется комплексному функционированию «пассажирской станции – пассажирской технической станции – транспортно-пересадочного узла» как единой системы. В статье предлагается математическая формализация процесса рациональной последовательности обслуживания пассажирских поездов с использованием методов линейного программирования, позволяющая решать целый ряд эксплуатационных задач и проводить исследования по оценке уровня влияния различных факторов на показатели работы пассажирских и пассажирских технических станций.

Ключевые слова: транспортно-пересадочный узел, пассажирская станция, пассажирская техническая станция, занятость приёмно-отправочных путей, загрузка маневрового локомотива, ритмичность работы станции.

Для цитирования: Куликова Е. Б., Минаков П. А. Методика определения рационального порядка использования маневровых локомотивов на пассажирской станции // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-10>.

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

ВВЕДЕНИЕ

В основе функционирования комплекса «пассажирская станция – пассажирская техническая станция – транспортно-пересадочный узел (далее – ТПУ)» как единой системы, прежде всего, лежит технология обслуживания пассажирских поездов [1–5]. Порядок обслуживания пассажирских поездов на станциях принципиально отличается от грузовых.

Так при определенной загрузке «обслуживающих станционных устройств» и неравномерности поступления грузовых поездов на обслуживание появляется очередь, зависящая от «мощности» устройств, обеспечивающих переход грузовых вагонов из одной системы обслуживания в следующую. Время нахождения грузовых вагонов (составов грузовых поездов) на станции, в отличие от пассажирских, зависит от «мощности» обслуживающих устройств, величины вагонопотоков и чаще не привязано к конкретным ниткам графика.

В пассажирском движении, исходя из графика оборота, составы привязаны к определенным ниткам графика движения поездов по отправлению и их обслуживание подчинено главной цели – отправлению готового состава с пассажирами в фиксированное время, по расписанию. В этих условиях загрузка обслуживающих устройств (маневро-

вых локомотивов, приемо-отправочных путей, путей экипировки и пр.) не должна определяться формально как доля времени непосредственно выполняемой работы по отношению к рассматриваемому периоду времени (сутки или величина интенсивного периода работы). Подготовка и подача составов к отправлению по расписанию будет предполагать определенные интервалы между окончанием работы с одним составом и началом работы с другим. В случае если эти интервалы такой продолжительности, что не могут быть использованы для выполнения локомотивом другой работы, они также должны быть отнесены ко времени работы, увеличивая загрузку локомотивов [6].

Тогда при фиксированном графике отправления, например, пассажирских поездов дальнего следования и учете фактического объема работы станционных устройств загрузка маневрового локомотива будет представлять некоторую зависимость от числа составов, выводимых за определенный период времени (рис. 1).

Анализ работы маневровых локомотивов на пассажирских станциях показал [7]:

– в их работе есть периоды (период интенсивного прибытия и отправления поездов, период до и после проведения технического обслуживания (далее – ТО) локомотива, операций по смене локомотивных

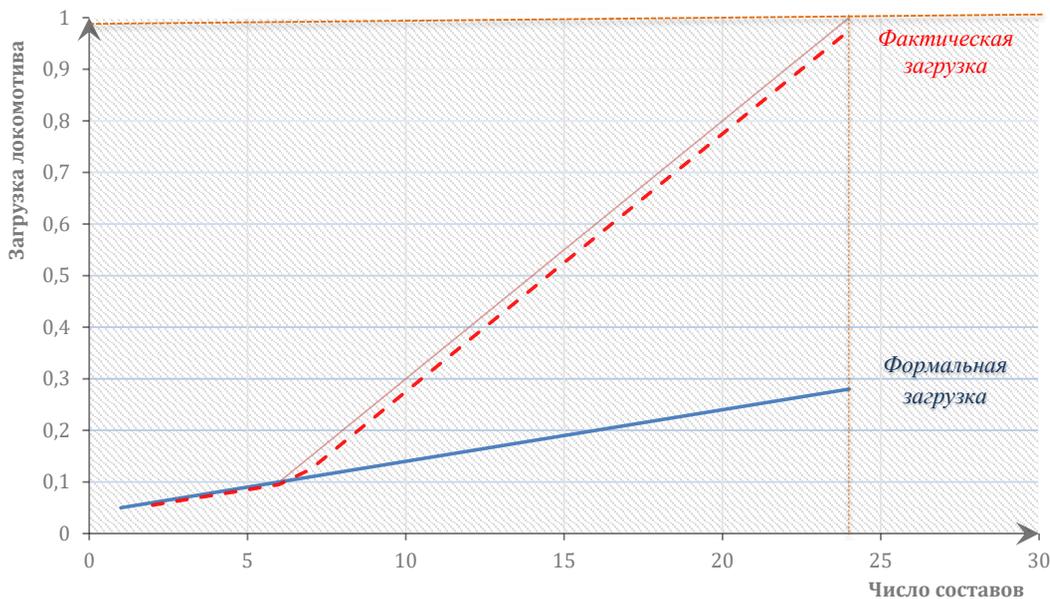


Рис. 1. Общий характер изменения загрузки маневрового локомотива в зависимости от количества обслуживаемых составов пассажирских поездов на станции [выполнено авторами].



бригад), когда загрузка локомотива практически равна единице. Так на станции Москва-пассажирская Казанская первый локомотив при среднесуточной загрузке 0,72 имеет два периода по 3,5 часа, когда даже небольших перерывов в его работе нет. Второй локомотив при среднесуточной загрузке 0,65 имеет также два таких периода продолжительностью шесть и пять часов. Причем резервов для увеличения объемов работы у локомотивов практически нет.

– для снижения загрузки локомотивов в такие периоды практикуется «преждевременный» вывод составов на приемо-отправочные пути или более поздний вывод составов с них для последующей работы с составами в соответствии с технологическим процессом (по технологической линии). Что, в свою очередь, приводит к увеличению продолжительности занятости приемо-отправочных путей.

На практике, как правило, необходимо одновременно отвечать на два вопроса:

1. Справится ли маневровый локомотив с заданным объемом работы?

2. Возможно ли реализовать «преждевременный» вывод составов на приемо-отправочные пути и/или вывод составов с них с задержкой относительно технологического времени, уменьшив непроизводительные простои маневрового локомотива при выполнении заданного объема работы, исходя из имеющегося числа приемо-отправочных путей и расписания прибытия/отправления пассажирских поездов (заданного числа составов пассажирских поездов)?

Ответ на эти вопросы фактически является решением задачи проверки устойчивости работы маневровых локомотивов при заданном объеме работы, технико-технологических возможностях станции и фиксированном расписании прибытия и отправления пассажирских поездов на станцию.

Рассмотрим условия возможности выполнения маневровым локомотивом заданного объема работы.

Формально среднесуточную загрузку маневрового локомотива можно определить по формуле (1):

$$\Psi_{\text{лок}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\text{раб}}}{(1440 - T_{\text{пер}}) \cdot K_n \cdot \alpha_{\text{вр}}}, \quad (1)$$

где $t_i^{\text{раб}}$ – время работы локомотива с i -м номером состава, который определен на вре-

менной оси при условии возрастания технологически обоснованных времён начала работы с ним (исходя из времён прибытия и отправления пассажирских поездов и почтово-багажных поездов, а также времён начала операций по ТО и смене бригад);

n – общее число поездов, прибывающих и отправляющихся за сутки, с которыми работает маневровый локомотив (переставляя составы между ПОП и путями отстоя/экипировки/ремонта/...);

$T_{\text{пер}}$ – перерывы во времени работы маневрового локомотива (время, которое локомотив не находится в рабочем парке в течение суток);

K_n – коэффициент, учитывающий возможные перерывы в маневровой работе из-за отказов технических средств (коэффициент надёжности инфраструктуры)¹;

$\alpha_{\text{вр}}$ – коэффициент враждебности передвижений, который учитывает продолжительность операций, вызывающих перерывы в выполнении маневровой работы, в общей продолжительности суток.

В грузовом движении на проведение работ выстраивается очередь из составов. Она может быть больше или меньше в зависимости от периода суток и интенсивности работы с составами. В любом случае при загрузке локомотива меньше 1,0 (а в интенсивные периоды может быть и больше 1,0) локомотив в среднем за сутки выполняет заданный объем, лишь увеличивая из-за очередей среднее время прохождения составов по технологической линии [8; 9].

В пассажирском движении составы привязаны к временам прибытия и отправления, и во всех случаях эти расписания надо выполнять. Поэтому условие $\Psi_{\text{лок}} \leq 1$ является необходимым (далее – НУ), но не достаточным.

Определим достаточные условия (далее – ДУ) выполнения работы для маневрового локомотива с пассажирскими поездами при условии заданного фиксированного расписания выполнения работ.

Пусть определены:
 $t_i^{\text{нач. раб}}$ – технологически обоснованные времена начала работы маневрового локомотива с пассажирскими, почто-багажными поездами по прибытию, отправлению (осно-

¹ Методика оценки и контроля эффективности использования локомотивов маневрового движения: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 01 декабря 2017 г. № 2485/р.

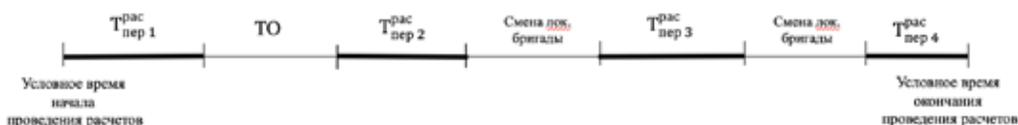


Рис. 2. Периоды занятости маневрового локомотива в течение суток [выполнено авторами].

ванные на расписании прибытия-отправления этих поездов);

i – порядковый номер работы маневрового локомотива с составами, определяемый в возрастающем порядке времен расположенных на временной оси.

Тогда суточный временной отрезок будет разбит на $(n + 1)$ отрезки, границами которых будут смежные на временной оси времена начала работ, включая время начала и конца суток.

Сгруппируем времена начала работы маневрового локомотива с составами по отдельным непересекающимся расчётным периодам времени $T_{пер}^{рас}$ (рис. 2), границами которых будут:

- времена начала и окончания общего (совокупного) периода – сутки;
- времена начала и окончания периодов проведения маневровым локомотивом работ, не относящихся к работе с составами (технический осмотр, экипировка, смена локомотивных бригад).

В приведенном на рис. 2 примере в сутках четыре расчетных периода:

1. от 0 мин (условно) до времени начала ТО локомотива;
2. от времени окончания ТО локомотива до времени начала первой смены локомотивной бригады;
3. от времени окончания первой смены локомотивной бригады до времени начала второй смены локомотивной бригады;
4. от времени окончания второй смены локомотивной бригады до 1440 мин (условно) – времени окончания расчетных суток.

Времена начала работы ($t_i^{нач. раб}$), находящиеся на отрезках временной оси, которым не хватает технологически обоснованного рабочего времени маневрового локомотива в данном расчётном периоде ($T_{пер}^{рас}$) (либо они приходятся на нерабочий для локомотива отрезок времени), переносятся на другие расчетные периоды в соответствии со следующими правилами:

- времена работы с составами по прибытию – в следующий (за нерабочим периодом) расчетный период: $t_{i.приб}^{нач. раб} = T_{пер}^{нач}$;

– времена работы с составами по отправлению – в предыдущий (перед нерабочим периодом) расчетный период:

$$t_{i.отпр}^{нач. раб} = T_{пер}^{кон} - t_i^{раб}.$$

НУ выполнения маневровым локомотивом заданного объема работы при безусловном обеспечении графика прибытия и отправления пассажирских поездов следует считать соблюдение неравенств для каждого из таких расчетных периодов ($T_{пер}^{рас}$) (2):

$$\frac{\sum_{i=1}^k t_i^{раб}}{T_{пер}^{раб}} \leq 1, \quad (2)$$

где k – общее количество времён работы локомотива, находящихся на временном отрезке расчетного периода, включая перенесенные на данный расчетный период;

i – порядковый номер работы локомотива на временном отрезке расчетного периода, определенный в возрастающем порядке расположения на временной оси.

ДУ заключаются в том, чтобы в рамках каждого расчетного периода ($T_{пер}^{рас}$) были использованы все свободные от работы промежутки времени путем смещения технологически обоснованных времён начала работ маневровым локомотивом с составами ($t_i^{нач. раб}$) в рамках разрешенного интервала времени, расположенных левее или правее на временной оси от технологически обоснованного времени начала работ в зависимости от характера работы (по прибытию или отправлению).

ДУ должны быть выполнены для всех расчетных периодов. В противном случае следует провести пересчет с учетом переноса первых времён начала работ (по отправлению) в смежный предшествующий расчетный период и последних времён начала работы (по прибытию) в смежный последующий расчетный период. Этим можно добиться перераспределения объемов работы локомотива в расчетные периоды, но в ущерб суммарному времени занятия составами прямо-отправочных путей.

Аналитически ДУ для расчетного периода (без разрешенного смещения технологически обоснованного времени начала работы с со-



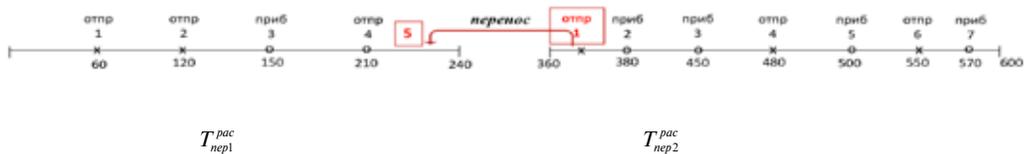


Рис. 3. Пример выполнения НУ и ДУ для смежных расчетных периодов в общем временном отрезке [выполнено авторами].

ставом) принимает вид (3):

$$\frac{t_n^{раб}}{t_{n+1}^{нач. раб} - t_n^{нач. раб}} \leq 1 \quad \forall n = k, k-1, \dots, 1, \quad (3)$$

где $t_{k+1}^{раб} = T_{пер}^{рас}$

Рассмотрим примеры выполнения НУ и ДУ при $t_i^{раб} = 30$ мин² для двух смежных расчётных периодов на общем временном отрезке в 600 мин (рис. 3).

Первый расчётный период ($T_{пер1}^{рас}$):

$k=5$, необходимое условие $\psi = \frac{150}{240} = 0,625$

$n=5$, $\frac{30}{240 - 210} = 1$;

$n=4$, $\frac{30}{210 - 210} = \infty$, ДУ не выполняется;

$n=3$, $\frac{30}{210 - 150} = 0,5$;

$n=2$, $\frac{30}{150 - 120} = 1$;

$n=1$, $\frac{30}{120 - 60} = 0,5$

Второй расчётный период ($T_{пер2}^{рас}$):

$k=7$, необходимое условие $\psi = \frac{180}{240} = 0,75$

$n=6$, $\frac{30}{600 - 570} = 1$;

$n=5$, $\frac{30}{570 - 550} = 1,5$; ДУ не выполняется;

$n=4$, $\frac{30}{550 - 500} = 0,6$;

$n=3$, $\frac{30}{500 - 480} = 1,5$; ДУ не выполняется;

$n=2$, $\frac{30}{480 - 450} = 1$;

$n=1$, $\frac{30}{450 - 380} = 0,467$.

Невыполнение ДУ (без разрешенного смещения технологически обоснованного времени начала работы с составом) не означает, что

маневровый локомотив не выполнит работу в данном расчетном периоде. Это будет возможно, если разрешить смещение при условии увеличения времени занятия ПОП составами.

Предположим (в рамках данной локальной задачи), что допустимо неограниченное увеличение времени занятия приемо-отправочных путей составами (т.е. их загрузка небольшая и не является лимитирующей).

Использование (или невозможность использования) свободных интервалов времени для выполнения маневровым локомотивом работы в расчетный период зависит от:

- заданного расписания прибытия и отправления пассажирских поездов на / со станции;
- последовательности работы в этот период с поездами по прибытию и отправлению, т.к. возможность смещения от технологически обоснованного времени работы с составом в этих вариантах различно (вправо или влево на временной оси).

Тогда задача о выполнении маневровым локомотивом своей работы сводится к решению задачи нахождения минимума линейной функции при заданных ограничениях в виде равенств и неравенств. Поставим эту задачу.

Условные обозначения:

n – количество пассажирских поездов в рассматриваемом периоде времени;

m – количество прочих поездов, требующих обслуживания маневровым локомотивом;

t_i^{np} – время прибытия i -го пассажирского поезда на станцию (отсчет времени может вестись с любой временной точки). Длительность расчетного периода может быть любой (i – порядковый номер (условный) поезда в расчетном периоде);

t_i^{om} – время отправления i -го пассажирского поезда со станции по расписанию;

t_i^{yb} – время уборки (перестановки) состава i -го пассажирского поезда с приемо-отправочных путей на пути экипировки (отстоя), включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки, время на перестановку почтово-багажных вагонов

² Для решения примера принимается случайное время с целью проверить ход расчетов.

к местам погрузки и выгрузки (при необходимости) и время на подформирование состава при постановке на простой;

$t_i^{под}$ – время подачи (перестановки) состава i -го пассажирского поезда с путей отстоя на приемо-отправочные пути, включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки, включая время на прицепку почтовых и багажных вагонов в состав пассажирского поезда и подформирование состава при его перестановке с путей отстоя;

$t_i^{раб пр н-б}$ – время работы локомотива с прибывающим почтово-багажным составом, включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки по прибытию поезда;

$t_i^{пр н-б}$, $t_i^{отпр н-б}$ – расписание соответственно прибытия и отправления i -го почтово-багажного поезда;

$t_i^{нач раб н-б по приб}$ – наименьшее на числовой оси (самое раннее) технологически обоснованное время начала работы с i -м почтово-багажным поездом после его прибытия (4):

$$t_i^{нач раб н-б по приб} = t_i^{пр н-б} + t_i^{техн приб н-б}, \quad (4)$$

где $t_i^{техн приб н-б}$ – технологически необходимое время от момента прибытия i -го почтово-багажного поезда до момента начала работы с ним маневрового локомотива;

$t_i^{раб от н-б}$ – время работы локомотива с почтово-багажным составом, включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки при отправлении поезда;

$t_i^{нач раб н-б по отпр}$ – наибольшее на числовой оси (самое позднее) технологически обоснованное время начала работы с i -м почтово-багажным поездом по его отправлению (5):

$$t_i^{нач раб н-б по отпр} = t_i^{отпр н-б} - t_i^{техн отпр н-б}, \quad (5)$$

где $t_i^{техн отпр н-б}$ – технологически необходимое время от момента окончания работы с i -м почтово-багажным поездом до момента его отправления;

$t_i^{нач раб приб}$ – наименьшее на числовой оси (самое раннее), технологически обоснованное время начало работы с составом i -го пассажирского поезда при перестановке его с ПОП (6):

$$t_i^{нач раб приб} = t_i^{пр} + t_i^{высад}, \quad (6)$$

где $t_i^{высад}$ – время высадки пассажиров из состава i -го пассажирского поезда (при условии, что оно является лимитирующим по отношению к параллельно выполняемым с составом техническими операциями);

$t_i^{нач раб отпр}$ – наибольшее на числовой оси (самое позднее) технологически обоснованное время начала работы с составом i -го пассажирского поезда по перестановке его на приемо-отправочные пути (7):

$$t_i^{нач раб отпр} = t_i^{от} - t_i^{посад} - t_i^{техн}, \quad (7)$$

где $t_i^{посад}$ – время посадки пассажиров в состав i -го пассажирского поезда;

$t_i^{техн}$ – технологически необходимое время от момента окончания посадки пассажиров до момента отправления.

Кроме того, если на станции могут быть враждебности при перемещении составов с приемо-отправочных путей и обратно, их необходимо учитывать в качестве дополнительного времени ожидания (8):

$$T_{ож} = M[n_{оч}^{перес}] \cdot t_{зан}^{перес}. \quad (8)$$

Например, при $t_{зан}^{перес} = 0,2$ час ,

$$M[n_{оч}^{перес}] = \left(0,075 + \frac{0,1}{0,2}\right) \Psi_{перес} = 0,575 \Psi_{перес}$$

Если $\Psi_{перес} = 0,8$, то $M[n_{оч}^{перес}] = 0,46$, $T_{ож} = 0,092$ час = 5,5 мин.

Если $\Psi_{перес} = 0,7$, то $M[n_{оч}^{перес}] = 0,4025$, $T_{ож} = 0,08$ час = 4,8 мин.

Если $\Psi_{перес} = 0,76$, то $M[n_{оч}^{перес}] = 0,437$, $T_{ож} = 0,087$ час = 5,2 мин.

Данное время в случае необходимости следует учитывать при расчете общего времени перемещения составов.

Показатели работы отдельно взятой «системы обслуживания», под которой понимается передвижение составов с приемо-отправочных путей и обратно при значительной загрузке маршрутов движения, могут быть рассчитаны по методике, изложенной в [10–12] дифференцированно для различных временных периодов в зависимости от загрузки мест пересечения маршрутов, включая периоды «сверх загрузки», т.е. когда потребности в использовании таких мест превышают их пропускную способность (9):

$$M[n_{оч}^{перес}] = \begin{cases} 0,1(1 + 0,75 \frac{t_{зан}^{перес}}{t_{зан}}) \Psi_{перес}, \text{ при } 0 \leq \Psi_{перес} \leq 0,8 \\ \frac{2(\Psi_{перес}^2 - \Psi_{перес} + 0,2)(1 + 0,75 \frac{t_{зан}^{перес}}{t_{зан}})}{t_{зан}^{перес}}, \text{ при } 0,8 \leq \Psi_{перес} \leq 1 \\ \frac{20(\Psi_{перес}^2 - 1,75 \Psi_{перес} + 0,77)}{t_{зан}^{перес}} + 15(\Psi_{перес}^2 - 2,3 \Psi_{перес} + 1,32), \text{ при } 1 < \Psi_{перес} \leq 1,2 \end{cases}, \quad (9)$$

где $M[n_{оч}^{перес}]$ – математическое ожидание (среднее количество) составов пассажирских поездов, ожидающих дополнительное время, связанное с враждебностью;

$\Psi_{перес}$ – коэффициент загрузки «системы обслуживания» (враждебных маршрутов передвижения составов);



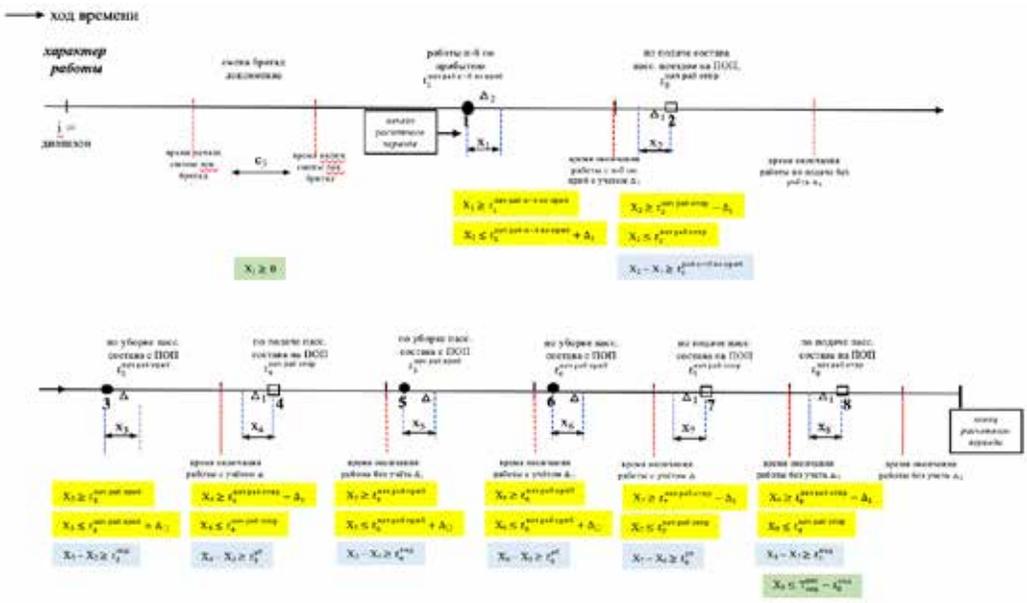


Рис. 4. Фрагмент размещения искомых величин на временной оси [выполнено авторами].

$t_{зан}^{перес}$ – среднее время занятия враждебного маршрута при передвижении составов, час. Длительность периодов дифференцированного расчета продолжительности ожидания перестановки может быть меньше расчетных периодов работы маневровых локомотивов в зависимости от изменения интенсивности занятости маршрутов с враждебностями и определяется для конкретных пассажирских станций.

Поставим задачу для одного маневрового локомотива.

Локомотив должен за рассматриваемый период времени выполнить работу по уборке (перестановке) (n) пассажирских составов на пути экипировки (отстоя), по подаче (перестановке) их на приемо-отправочные пути, выполнить работу с (m) почтово-багажными поездами по прибытию и отправлению.

При этом сумма отклонений фактически реализуемых времён начала работы с составами от диктуемых технологическими процессами работы с составами пассажирских и почтово-багажных поездов и расписаниями их прибытия и отправления должны быть минимальными, что обеспечит оптимальный баланс занятости приемо-отправочных путей и путей отстоя при безусловном выполнении заданного объема работы.

Таким образом, данная задача является задачей линейного программирования по нахожде-

нию минимума целевой функции при ограничениях типа равенств и неравенств [13; 14].

Отсутствие решения этой задачи при заданных исходных данных будет говорить о невозможности выполнения заданного объема работы для локомотива при фиксированном расписании.

Представим задачу математически при приведенных выше обозначениях.

Введем нумерацию времён начала работы с прибывающими и отправляющимися пассажирскими и почтово-багажными поездами [15]. Здесь и далее под i -м прибывающим (отправляющимся) поездом будем понимать не конкретный состав поезда, который прибывает на станцию (отправляется со станции), а поезд, который прибывает на станцию (отправляется со станции) по i -ой «нитке» и обслуживается на станции в соответствии с принятой технологией работы с поездом, прибывающим на станцию (отправляющимся со станции) по конкретному назначению i -ой «нитки» графика движения. Отсчет можно вести с любого момента в соответствии с течением времени.

Неизвестными (исковыми) величинами в задаче будут являться фактически рекомендованные времена начала работы с составами пассажирских и почтово-багажных поездов (рис. 3).

Общее минимальное число неизвестных равно $(2m + 2n)$ в зависимости от величины

рассматриваемого периода времени, то есть $x_i, i = 1, \dots, 2(m+n)$ (здесь принята нумерация, определенная выше).

Ограничениями в задаче будут:

1. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива по уборке составов пассажирских поездов с прямо-отправочных путей (10):

$$t_i^{\text{нач раб приб}} \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб приб}} + \Delta, \quad (10)$$

где Δ – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, в течение которого состав должен освободить прямо-отправочные пути. Эта величина может быть установлена дифференцировано для различных временных отрезков или для каждого поезда в зависимости от фактической занятости путей отстоя в те или иные периоды времени.

2. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива по подаче состава пассажирского поезда на прямо-отправочные пути (11):

$$t_i^{\text{нач раб отпр}} - \Delta_1 \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб отпр}}, \quad (11)$$

где Δ_1 – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, допускающий заблаговременную перестановку состава с пути отстоя (экипировки) для последующего отправления со станции. Эта величина также может быть установлена дифференцировано в зависимости от фактической занятости прямо-отправочных путей, а также расписания прибытия и отправления поездов, в первую очередь транзитных.

Принятое при расчетах значение $\Delta = 0$ и или $\Delta_1 = 0$ означает, что ввиду плотной занятости прямо-отправочных путей (путей отстоя) отклонение от технологического графика работы с составами пассажирских поездов не допускается.

3. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива с прибывшим почтово-багажным поездом (12):

$$t_i^{\text{нач раб п-б приб}} \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб п-б приб}} + \Delta_2, \quad (12)$$

где Δ_2 – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, в течение которого должна быть начата работа с почтово-багажным поездом по прибытию.

4. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива по формированию, перестановке состава поч-

тово-багажного поезда при его отпращивании на станции (13):

$$t_i^{\text{нач раб п-б отпр}} - \Delta_3 \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб п-б отпр}}, \quad (13)$$

где Δ_3 – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, допускающий заблаговременное начало работы с почтово-багажным поездом по отпращиванию. Пояснения к величинам Δ и Δ_1 в полной мере могут относиться и к величинам Δ_2 и Δ_3 .

5. Для всех времён, определяющих начало технического обслуживания, смены бригад маневрового локомотива (14):

$$t_i^{\text{ок обл}} = t_i^{\text{нач обл}} + C_j, \quad (14)$$

где C_j – фиксированное время выполнения технического обслуживания, смены локомотивных бригад для j -ой операции.

Эти величины переменными не являются, заданы как исходная информация: $t_i^{\text{нач обл}}$.

В некоторых случаях может быть допущено незначительное смещение во времени значений $t_i^{\text{нач обл}}$ и длительности самого обслуживания.

Следующая группа ограничений касается обеспечения возможности начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом.

6. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом по уборке (перестановке) пассажирского состава с прямо-отправочных путей на пути экипировки (отстоя) (15):

$$x_i + t_{\text{уб}} \leq x_{i+1}. \quad (15)$$

7. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом по подаче (перестановке) пассажирского состава с путей отстоя на прямо-отправочные пути (16):

$$x_i + t_{\text{под}} \leq x_{i+1}. \quad (16)$$

Ограничения 6, 7, 8 и 9 обеспечивают необходимую «разреженность» в работе локомотива.

8. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом (почтово-багажным) по прибытию (17):

$$x_i + t_i^{\text{раб п-б приб}} \leq x_{i+1}. \quad (17)$$

9. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со





Таблица 1

Решение при $\Delta = 10$	
$x_1 \geq 0, x_1 \leq 10$	$x_1 = 0,$
$x_2 \geq 65 - 10, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20;$	$x_2 = 60,$
$x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + 10, x_3 - x_2 \geq 20;$	$x_3 = 80,$
$x_4 \geq 110 - 10, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20;$	$x_4 = 100,$
$x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + 10, x_5 - x_4 \geq 20;$	$x_5 = 120,$
$x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + 10, x_6 - x_5 \geq 20;$	$x_6 = 140,$
$x_7 \geq 175 - 10, x_7 \leq 175, x_7 - x_6 \geq 20;$	$x_7 = 170,$
$x_8 \geq 190 - 10, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20;$	$x_8 = 190,$
$x_8 \leq 240 - 20 = 220.$	

следующим составом после завершения работы с предыдущим составом (почтово-багажным) по отправлению (18):

$$x_i + t_i^{раб\ n-б\ отпр} \leq x_{i+1}. \quad (18)$$

10. Для всех времён, определяющих время перед началом технического обслуживания (смены бригад) локомотива (ф-ла 19):

$$x_i + t_i^{раб\ (приб)\ отпр} \leq T_{пер}^{рас}. \quad (19)$$

Ограничение 10 аналогичным образом (как и все ограничения этой группы) определяет возможность завершения работы с составами до начала технологического перерыва в работе локомотива.

Рассмотрим конкретный пример, соответствующий общей схеме прибытия и отправления поездов, приведённой на рис. 4.

Исходные данные:

$$t_i^{nod} = t_i^{уб}, i = 2, \dots, 8 \rightarrow 20 \text{ мин.}$$

Расчет приведен при $\Delta = \Delta_1 = 0, 5, 10$ мин.

$$t_1^{раб\ пр\ n-б} = 60 \text{ мин.}$$

$$T_{пер}^{рас} = 240 \text{ мин.}$$

При этом формальная загрузка маневрового локомотива равна 0,83, а время непосредственной работы 200 мин.

Аналитически критерий данной задачи имеет следующий вид (20):

$$f(x_i, i = 1, \dots, 2(m+n)) = \min \left[\sum_{i \in M_{под}} (-x_i + t_i^{нач\ раб\ отпр}) + \sum_{i \in M_{ис}} (-t_i^{нач\ раб\ пр} + x_i) \right], \quad (20)$$

где $M_{под}$ – подмножество натуральных чисел, определяющих в числовой последовательности номера работ маневрового локомотива по подаче составов пассажирских поездов на приемо-отправочные пути и работ с почтово-багажными поездами по отправлению за

расчетный период;

$M_{уб}$ – подмножество натуральных чисел, определяющих в числовой последовательности номера работ маневрового локомотива по уборке составов пассажирских поездов с приемо-отправочных путей и работ с почтово-багажными поездами по прибытию за расчетный период.

В данном примере (21):

$$f(x_i, i = 1, \dots, 8) = \min \left[\sum_{i=2,4,7,8} (-x_i + t_i^{нач\ раб\ отпр}) + \sum_{i=1,3,5,6} (-t_i^{нач\ раб\ пр} + x_i) \right], \quad (21)$$

$$t_1^{нач\ раб\ приб} = 0; t_2^{нач\ раб\ отпр} = 65; t_3^{нач\ раб\ приб} = 80;$$

$$t_4^{нач\ раб\ отпр} = 110; t_5^{нач\ раб\ приб} = 120; t_6^{нач\ раб\ приб} = 140;$$

$$t_7^{нач\ раб\ отпр} = 175; t_8^{нач\ раб\ отпр} = 190.$$

$$T_{пер}^{рас} = 240 \text{ мин.}$$

Ограничения при $\Delta = 10$:

$$\begin{aligned} &x_1 \geq 0; \\ &x_1 \geq 0, x_1 \geq 0, x_1 \leq \Delta; \\ &x_2 \geq 65 - \Delta, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20; \\ &x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + \Delta, x_3 - x_2 \geq 20; \\ &x_4 \geq 110 - \Delta, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20; \\ &x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + \Delta, x_5 - x_4 \geq 20; \\ &x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + \Delta, x_6 - x_5 \geq 20; \\ &x_7 \geq 175 - \Delta, x_7 \leq 175, x_7 - x_6 \geq 20; \\ &x_8 \geq 190 - \Delta, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20; \\ &x_8 \leq 240 - 20 = 220. \end{aligned}$$

Критерий:

$$(65 - x_2) + (110 - x_4) + (175 - x_7) + (190 - x_8) + (-0 + x_1) + (-80 + x_3) + (-120 + x_5) + (-140 + x_6).$$

Приведённый вид критерия и ограничений (при фиксированном значении величины Δ и конечных значениях константы):

$$\min: x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + x_5 + x_6 - x_7 - x_8 + 200.$$

Таблица 2

Решение при $\Delta = 10$.	
$x_1 \geq 0, x_1 \leq 10$	$x_1 = 0,$
$x_2 \geq 65 - 10, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20;$	$x_2 = 60,$
$x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + 10, x_3 - x_2 \geq 20;$	$x_3 = 80,$
$x_4 \geq 110 - 10, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20;$	$x_4 = 100,$
$x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + 10, x_5 - x_4 \geq 20;$	$x_5 = 120,$
$x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + 10, x_6 - x_5 \geq 20;$	$x_6 = 140,$
$x_7 \geq 170 - 10, x_7 \leq 170, x_7 - x_6 \geq 20;$	$x_7 = 160,$
$x_8 \geq 190 - 10, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20;$	$x_8 = 180,$
$x_8 \leq 200 - 20 = 180.$	

Решение приведено в таблице 1.

Минимальное значение критерия: $\min f = 20$.

Достаточное условие без разрешения сдвиги ($\Delta = 0$) не выполняется. При разрешенной сдвиге $\Delta = 5$ решение задачи при заданных исходных данных также отсутствует.

Изменим исходные данные, а именно уменьшим расчетный период: $T_{\text{пер}}^{\text{рас}} = 200$ мин и сдвинем начало работы с составом отправляющегося пассажирского поезда $t_7^{\text{нач раб отпр}} = 170$ мин.

Решение приведено в таблице 2.

Минимальное значение критерия: $f = 35$.

В этом случае $\psi_{\text{ман}} = 1$. Локомотив работает в режиме максимальной загрузки и любое опоздание поезда может «сломать» весь график прибытия-отправления пассажирских поездов, а время дополнительного занятия приемо-отправочных путей пассажирскими составами возрастает на 75 %.

При работе нескольких локомотивов необходимо распределить работу между ними согласно следующему алгоритму:

1. Предварительно определить необходимое (потребное) число маневровых локомотивов (22):

$$M_{\text{лок}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\text{раб}} + \sum T_{\text{пер}}^{\text{сум}}}{1440}, \quad (22)$$

где n – количество всех работ маневровых локомотивов за сутки;

$t_i^{\text{раб}}$ – продолжительность i -ой работы локомотива;

$\sum T_{\text{пер}}^{\text{сум}}$ – суммарное время (за сутки) перерывов в работе маневровых локомотивов, связанных с операцией их технического осмотра и сменой бригад (возможно потребуются варианты расчетов, т.к. технический осмотр проводится не каждые сутки).

2. Все времена начала работ разметить на суточной временной шкале и осуществить их перенос применительно к расчетным периодам для первого маневрового локомотива (см. ранее указанные правила).

3. Для каждого расчетного периода первого маневрового локомотива на основании аналитического достаточного условия (формула 3) провести изъятие и размещение работы локомотива с временной шкалы первого на временную шкалу второго по условию (23):

$$t_{\text{перенос } i}^{\text{раб}} = \max_{i=2, \dots, k} (t_{i-1}^{\text{нач раб}} + t_{i-1}^{\text{раб}} - t_i^{\text{нач раб}}). \quad (23)$$

Таким образом, осуществляется перенос работ, находящихся в наиболее «стесненных» условиях. Такое перемещение для каждого расчетного периода (отдельно) производить до тех пор, пока не будет выполнено аналитически достаточное условие.

4. Итерационно производить перемещение с временной оси локомотива на временную ось последующего локомотива до тех пор, пока работы не будут размещены относительно равномерно на всех временных осях всех используемых локомотивов.

5. Распределение работы необходимо подтверждать решением задачи для каждого локомотива и для каждого его расчетного периода по определенному разрешенному смещению времени начала работ, связанное с дополнительным занятием приемо-отправочных путей.

В условиях обязательного выполнения маневровыми локомотивами работы по выводу прибывших на приемо-отправочные пути станции пассажирских поездов и перестановке пассажирских поездов на приемо-отправочные пути на отправление при высокой среднесуточной нагрузке приходится прибегать к:



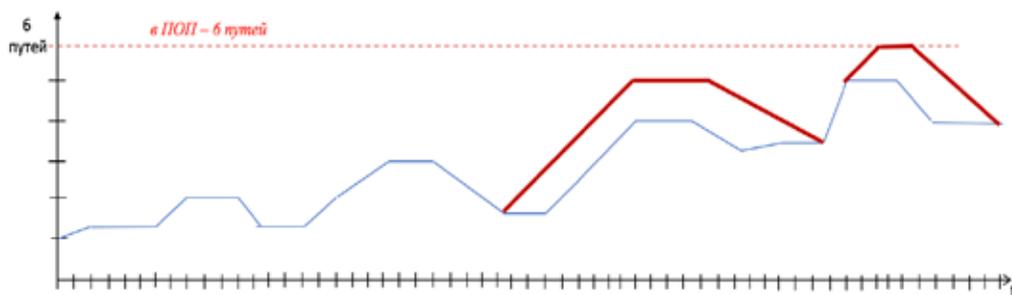


Рис. 5. Временная ось.

- Линия соответствует занятости путей без разрешенного смещения (локомотив не выдерживает график);
- Линия соответствует занятости путей с разрешенным смещением (локомотив выдерживает график).

– более позднему времени уборки составов (по отношению к технологически обоснованному) с приемо-отправочные пути;

– более раннему времени подачи составов (по отношению к технологически обоснованному) на приемо-отправочных путей.

Это приводит к увеличенному (за сутки) времени суммарного занятия составами приемо-отправочных путей.

Такое увеличение в отдельные периоды времени может привести к нехватке приемо-отправочных путей для выполнения графика прибытия и отправления как конечных, так и проходящих (транзитных) поездов.

Поэтому после определения времён начала работы маневровых локомотивов с конечными составами необходимо проводить проверку достаточности емкости приемо-отправочных путей, для выполнения общего графика прибытия и отправления пассажирских поездов на станции.

Исходными данными для такой проверки являются:

1. Для факта увеличения числа занятых путей:

– время прибытия транзитных (проходящих) и конечных пассажирских поездов, скорректированное на время подготовки маршрута приема поезда на путь $t_i^{прох пр}$, $t_i^{кон пр}$;

– время фактического начала работы маневрового локомотива по выводу состава на приемо-отправочных путей, скорректированное на время заезда локомотива под выводимый состав:

$$t_i^{кон отпр} (x_i + t_{заезд}).$$

2. Для факта уменьшения числа занятых путей:

– время отправления проходящих и конечных пассажирских поездов, скорректированное на время освобождения пути после трогания поезда $t_i^{прох отпр}$, $t_i^{кон отпр}$;

– время фактического начала работы маневрового локомотива по уборке состава конечного пассажирского поезда с приемо-отправочных путей, скорректированное на время заезда локомотива под выводимый состав: $t_i^{кон пр} (x_i + t_{заезд})$ и на время освобождения пути после трогания поезда.

Все указанные времена наносятся на временную ось (на сутки или на расчетный период) в возрастающем порядке и на графике отображается изменение числа занятых путей во времени (с шагом $t = 6$ мин), временная ось приведена на рис. 5.

Если в отдельные промежутки времени превышает заданное число путей (в данном примере – 6), тогда график тоже не будет соблюдаться и значит надо менять расписание прибытия-отправления пассажирских поездов.

ВЫВОДЫ

Предложенная в работе методика направлена на математическую формализацию процесса определения рациональной последовательности в работе маневровых локомотивов с составами пассажирских поездов на станциях. Она может быть использована при решении целого ряда эксплуатационных задач, в том числе:

- при корректировке результатов расчёта количества маневровых локомотивов на пассажирской технической станции в условиях их предельных загрузок;

- при совершенствовании и корректировке расписания прибытия и отправления пассажирских поездов при назначении пассажирских дополнительных поездов в периоды массовых перевозок;

- повышения эффективности работы маневровых локомотивов с учётом использования дополнительных резервов, заложенных в периодах отсутствия занятости приемо-отправочных путей;

- определения резервов в работе маневровых локомотивов при возможных опозданиях прибытия пассажирских поездов на станцию.

Методика позволяет решать данные задачи как фрагментарно в отдельные периоды времени, так и для «суточного отрезка».

В работе формализованы понятия: необходимое условие и достаточное условие выполнения маневровыми локомотивами заданного объема работы, как в целом, так и для отдельных наиболее загруженных периодов в прибытии и отправлении поездов.

Использование аппарата линейного программирования позволяет решать как конкретные задачи, так и проводить исследования по оценке уровня влияния различных факторов на показатели работы пассажирских и пассажирских технических станций, определению резервов использования маневровых локомотивов и их рациональному использованию в условиях проблемы дефицита локомотивов маневрового движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абдуллаев И. С. Перспективы пассажирских железнодорожных станций в мегаполисах // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 5 (60). – С. 160–164. EDN: VMBQDL.

2. Анисимкова Н. И. Краткий анализ развития отечественных и зарубежных пассажирских станций // Аллея науки. – 2021. – Т. 1. – № 1 (52). – С. 281–286. EDN: VDIGRV.

3. Метёлкин П. В., Лебедева Ю. А., Мурашев В. А. Состояние и перспективы развития перевозок пассажиров дальнего следования в Московском железнодорожном узле // Вестник транспорта. – 2007. – № 6. – С. 21–26. EDN: PWKURP.

4. Персианов В. А., Скалов К. Ю., Усков Н. С. Моделирование транспортных систем. – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.

5. Пехтерев Ф. С. Пути улучшения взаимодействия транспортных систем «Пространства 1520» // Евразия-Вести. – 2012. – № 4. [Электронный ресурс]: <http://eav.ru/pub11.php?publid=2012-04a21&ysclid=m4k08d724c10966456>. Доступ 15.03.2024.

6. Кочнев Ф. П., Максимович Б. М., Тихонов К. К., Черномордик Г. И. Организация движения на железнодорожном транспорте. – 3-е, изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1969. – 472 с.

7. Коробкин С. Е. Модернизация станционной инфраструктуры пассажирского комплекса ОАО «РЖД» // Вестник университета. – 2013. – № 2. – С. 52–56. EDN: PUKUX.

8. Вентцель Е. С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 522 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/drARRZJ8UHtCU>. Доступ 22.12.2024.

9. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения / пер. с фр. В. И. Неймана и В. П. Швальба; под ред. И. Н. Коваленко – М.: Мир, 1965. – 302 с.

10. Минаков П. А. Использование дифференциальных уравнений для определения технико-технологических параметров работы сортировочной станции // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 3. – С. 19–24. EDN: PBUCAL.

11. Минаков П. А. Взаимодействие технологических линий в парке приема сортировочной станции // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 9. – С. 23–25. EDN: PEMRKV.

12. Минаков П. А. Обоснование комплекса технико-технологических параметров работы сортировочной станции в условиях высоких загрузок / Автореф... дис... канд. техн. наук. – М.: МГУПС (МИИТ), 2012. – 24 с. EDN SVCXTV.

13. Данциг Дж. Линейное программирование, его обобщения и применения / Пер. с англ. Г. Н. Андрианова [и др.]; Общая ред. и предисл. Н. Н. Воробьева. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/nk9t97fW562M2?ysclid=m4k0p85hmk63162567>. Доступ 15.03.2024.

14. Нестеров Е. П. Транспортные задачи линейного программирования. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 171 с.

15. Чередников И. К. Особенности работы пассажирских станций с грузовыми и почтово-багажными вагонами // Молодежная наука: Труды XXV Международной научно-практ. конференции, Красноярск, 22–24 апреля 2021 года. Том 2. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС, 2021. – С. 252–255. EDN: UOZDIK. ●

Информация об авторах:

Куликова Екатерина Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры управления транспортным бизнесом и интеллектуальными системами, директор Фонда целевого капитала Российского университета транспорта, Москва, Россия, iui_kulikova@inbox.ru.

Минаков Павел Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, pavelminakovrtc@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023, одобрена после рецензирования 19.03.2024, принята к публикации 22.03.2024.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.025.4

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-11>

Методика выбора дорожно-строительной техники в условиях недостатка информации



Петр СМІРНОВ



Борис СУББОТИН



Олег ПИКАЛЕВ

Петр Ильич Смирнов¹, Борис Сергеевич Субботин², Олег Николаевич Пикалев³

^{1,3} Вологодский государственный университет, Вологда, Россия.

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0002-9405-7248; Web of Science Researcher ID: AEN-5042-2022; Scopus Author ID: 57209334364;

РИНЦ SPIN-код: 4575-7032; РИНЦ Author ID: 715866.

² ORCID 0000-0003-1685-082X; Scopus Author ID: 57210937421; РИНЦ SPIN-код: 5281-7511;

РИНЦ Author ID: 677084.

³ ORCID 0000-0002-7328-5073; Scopus Author ID: 57218557725; РИНЦ SPIN-код: 3411-3297;

РИНЦ Author ID: 408420.

✉ ¹ smirnovpi@vogu35.ru.

АННОТАЦИЯ

В концепции оценки эффективности техники в рамках полного жизненного цикла (ЖЦ) выбор модели – один из определяющих факторов.

Цель данной работы обосновать применение усовершенствованной авторами методики оценки конкурентоспособности и качества техники применительно к дорожно-строительным машинам, предлагаемой к использованию для выбора машин в условиях частичной неопределенности и недостатка информации.

В статье методологически обоснованы блоки оценки

техники на стадии выбора, приводятся результаты исследований изменения стоимости дорожно-строительных машин на вторичном рынке в Российской Федерации, предлагаются оценочные подходы к определению качества и работоспособности продукции, а также приводится итоговый алгоритм с формированием интегральной оценки по единичным показателям конкурентоспособности. Методологически предлагаемый метод может быть интересен при оценке других типов и классов техники при аналогичных условиях оценки.

Ключевые слова: транспортно-технологические машины, дорожно-строительная техника, оценка качества, конкурентоспособность машин.

Для цитирования: Смирнов П. И., Субботин Б. С., Пикалев О. Н. Методика выбора дорожно-строительной техники в условиях недостатка информации // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 92–100. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-11>.

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

ВВЕДЕНИЕ

В современной отечественной и зарубежной научно-исследовательской литературе достаточно широко рассматриваются частные вопросы оценки качества, производительности и конкурентоспособности техники в целом и дорожно-строительных машин (ДСМ) в частности.

В работе [1] сравниваются экономические показатели использования гидравлических и канатных экскаваторов в шахтах России. Установлено, что стоимость владения канатным экскаватором ЭКГ-12К меньше по сравнению с гидравлическими экскаваторами. В работе [2] разработаны показатели эффективности копания гидравлическим экскаватором и создано программное обеспечение для их расчета. В [3] исследуется стратегия эксплуатации группы машин для балансировки расхода топлива и производительности, а также определены оптимальные параметры для минимизации эксплуатационных расходов. В работе [4] анализируется применение ДСМ для завершения крупных государственных проектов, таких как проект ирригационной системы Kaleswaram Lift и проект Polavaram. Результаты мониторинга работы с каменными дробилками и карьерами, а также анализ технических характеристик машин, помогают оптимизировать маркетинговые стратегии продажи экскаваторов и погрузчиков. В [5] выбираются наиболее эффективные модели землеройно-транспортных машин для условий грунтов Республики Казахстан. Исследование [6] анализирует эволюцию методов оценки конкурентоспособности машин и оборудования, выявляя их применимость в современных рыночных условиях.

В исследовании [7] описывается опыт компании PT Citra Mitra Sehati, занимающейся добычей полезных ископаемых открытым способом в районе Улок Купай, Бенгкулу, Индонезия. Используемое оборудование, включая экскаватор Dossan Dх 500 и десять самосвалов Hino 700, имеет высокий уровень износа, что снижает производительность и увеличивает эксплуатационные расходы. Исследование направлено на сравнение использования старого и нового оборудования с учетом экономических параметров. Результаты показывают, что новое оборудование более эффективно в производстве, при этом имеются значительные различия в стоимости

обслуживания и производства продукции между старым и новым оборудованием. В работе [8] обсуждается важность диагностики состояния оборудования и управления его жизненным циклом для минимизации дополнительных затрат и времени, связанных с непредвиденными поломками. Анализ стоимости жизненного цикла экскаватора 320С за период с 2010 по 2017 год позволяет определить оптимальное время замены оборудования и его стоимость владения.

В статье [9] освещены результаты анализа текущего состояния и направлений развития сектора дорожно-строительного оборудования в России на рубеже 2023 года. Исследование базируется на изучении статистической информации, а также на разработках, реализованных Институтом проблем транспорта Российской академии наук, Научно-производственной компанией «НТМТ» и кафедрой автомобильных дорог Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета в различные периоды, дополненных сведениями, полученными из интернета. В статье подчеркивается, что ключевая проблема отечественной отрасли дорожного строительства кроется в значительном износе оборудования, достигающем 50 %, главной причиной чего является недостаточно высокий уровень его обновления.

Авторы работы [10] обсуждают важность производительности дорожных машин как критерия, связывающего все этапы жизненного цикла дорог и машин. Исследование направлено на определение связи между объемами работ и производительностью дорожных машин, используемых на объектах. Цель статьи заключалась в анализе технической, эксплуатационной и фактической производительности машин при эксплуатации на конкретных объектах.

В статье [11] рассматривается вопрос об эффективности эксплуатации дорожных машин, основной акцент делается на системе технической эксплуатации. В качестве основного недостатка текущего подхода отмечается отсутствие учета объемов выполняемых работ при поддержании технического состояния машин, что считается необходимым для более эффективной эксплуатации машин. Статья [12] нацелена на выявление связи между жизненными циклами машин и дорог. Обсуждаются факторы, влияющие на формирование парков дорожных машин с учетом



особенностей эксплуатации и обновления техники. Предлагается новый подход к формированию парков машин на основе обратной связи между жизненным циклом дороги и машины, что может улучшить эффективность и рациональность использования оборудования.

В современной практике эксплуатации дорожной техники многие прежние задачи потеряли свою научную значимость [13]. Это обусловлено внедрением новейших нормативов, развитием CALS-технологий, внедрением передовых систем мониторинга и усилиями по автоматизации процессов работы. В этой связи возникает необходимость в переоценке и структурировании научных вопросов, связанных с изучением жизненного цикла дорожных машин. Для анализа применяются математическое моделирование, анализ влияющих факторов и оценки экспертов. В области дорожного строительства активно используются отраслевые методики и система ЭРА-ГЛОНАСС. Проведенное исследование подчеркивает ключевые аспекты современной системы жизненного цикла дорожной техники и выделяет специфику их изучения. Рекомендации и внедрение мониторинговых систем в дорожной технике способствуют научным разработкам. В статье предложены методы решения актуальных научных проблем, учитывающие новые тренды в эксплуатации дорожной техники, что способствует более точному и обоснованному формулированию научных задач.

Статья [14] исследует изменения в потребительских качествах дорожно-строительных машин с 1993 по 2018 годы. В исследовании, основанном на экспертных оценках различных источников, отмечается, что за последние 25 лет изменились требования к машинам, особенно под воздействием экономических кризисов. В начале рассматриваемого периода больше ценились характеристики, связанные с формированием парков машин и обеспечением работоспособности. С развитием рынка стали важнее качества, определяющие эффективность использования машин при растущих объемах строительства.

Статья [15] обсуждает необходимость оценки эффективности эксплуатации автомобилей в агропромышленном комплексе (АПК) и предлагает многокритериальную модель для этой цели. Основное свойство

модели – объективность, которая достигается без использования экспертных оценок. В статье [16] также представлено «дерево решений» для системы оценки качества автотранспортных средств, которое помогает упорядочить поиск решений.

В статье [17] описывается новый подход к определению предпочтений потребителей при выборе дорожно-строительной техники среди доступных на рынке вариантов. Он основан на применении одной из математических стратегий для многокритериальной оптимизации – метода районирования – и заключается в анализе всех возможных комбинаций приоритетов по оценочным характеристикам. Использование данной методики значительно улучшает понятность и точность оценок. Эффективность метода демонстрируется на примере анализа технического уровня бульдозеров и сравнении полученных данных с оценками, сделанными с помощью одного из классических подходов, – экспертного кластерного анализа по значимым эксплуатационным характеристикам.

В связи с этим нами ставится следующая *цель* данного исследования: предложить усовершенствованную методику оценки ДСМ по технико-экономическим показателям, пригодную для применения как для техники с близкими до степени смешения техническими характеристиками, так и в случае частичной или ограниченной информации о результатах эксплуатации (новые или свежие модели), также относительно свободную от субъективных оценок лица, принимающего решения.

РЕЗУЛЬТАТЫ. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДОЛОГИЯ

За основу методики оценки ДСМ по технико-экономическим показателям были взяты методологические подходы для легковых автомобилей, рассмотренные в диссертационной работе П. И. Смирнова [18] и апробированные для лесозаготовительной и грузовой техники [19; 20]. Процесс покупки дорожно-строительной машины аналогичен инвестированию в производственные активы, что отражает ключевые интересы коммерческих структур, нацеленных на приобретение ДСМ для своих операционных потребностей.

Этот подход позволяет рассматривать выбор, приобретение и эксплуатацию ДСМ с учетом экономических принципов и крите-

риев, которые обычно используются при оценке эффективности инвестиционных проектов. При определении наиболее подходящей модели ДСМ для конкретных условий эксплуатации основное внимание уделяется технико-экономическим параметрам машин. К этой категории относятся технические характеристики, влияющие на эффективность использования техники, а также показатели, связанные с затратами на ее эксплуатацию.

В начальной фазе оценки ДСМ эти параметры группируются по критериям, позволяющим собрать их в единую аналитическую категорию (по типу, назначению, наличию дополнительного оборудования и прочим характеристикам).

При выборе дорожно-строительной машины для коммерческого применения внутри организации критическим аспектом, наряду с соответствием технических параметров установленным стандартам, является сравнение «полезного эффекта от использования» с затратами на его получение в течение всего жизненного цикла (ЖЦ) оборудования.

Этот принцип является ключевым для оценки уровня конкурентоспособности ДСМ с точки зрения предлагаемого набора технико-экономических характеристик.

1. *Эффективность использования*: относится к способности машины выполнять требуемые работы с максимальной производительностью и минимальными временными затратами.

2. *Эксплуатационные расходы*: включают в себя все затраты на обслуживание, ремонт, смазочно-заправочные материалы в течение всего ЖЦ техники.

3. *Надежность и долговечность*.

4. *Остаточная стоимость*: представляет собой оценку стоимости машины по окончании ее эксплуатационного периода, которая может существенно влиять на общую экономическую выгоду от ее использования.

5. *Удобство и безопасность эксплуатации*: подразумевают оценку того, насколько удобно и безопасно работать с данной машиной, что также может повлиять на производительность труда и затраты на обучение персонала.

Выбор ДСМ с учетом этих параметров позволяет организациям максимизировать возврат инвестиций и обеспечить высокую конкурентоспособность на рынке.

Это условие определяет оценку уровня конкурентоспособности по технико-экономическим показателям:

$$P_{\Sigma} / Z_{\Sigma} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где P_{Σ} – полезный эффект от эксплуатации ДСМ на всем ЖЦ;

Z_{Σ} – совокупные затраты на достижение полезного эффекта на всем ЖЦ.

В дальнейшем это отношение будем обозначать как интегральный показатель качества продукции по технико-экономическим показателям – $\kappa_{\text{ТЭП}}$.

$$\kappa_{\text{ТЭП}} = P_{\Sigma} / Z_{\Sigma}. \quad (2)$$

Для оценки экономической выгоды от использования дорожно-строительных машин в качестве основы используется методика, разработанная С. В. Репиным. Этот подход предполагает не только применение интегрального показателя для сравнения ДСМ по их технико-экономическим характеристикам, но и расчет удельных затрат на выполнение определенного объема работы. Такие затраты выражаются через удельные расходы на единицу транспортной работы, обозначаемые как $Z_{\text{уд}}$, с предпочтением использования показателя в рублях за час работы машины.

Расчет удельных затрат на единицу работы может осуществляться на основе реального жизненного цикла машины, либо на основе условного ЖЦ при условии, что отсутствуют эксплуатационные данные, например, предполагая 10000 часов работы машины. Этот подход позволяет более объективно сравнивать различные модели ДСМ и принимать взвешенные решения при выборе наиболее подходящего оборудования с учетом его экономической эффективности в долгосрочной перспективе.

Наш подход к анализу дорожно-строительных машин на этапе сравнения их по технико-экономическим показателям включает возможность применения дополнительного аналитического модуля. Этот модуль предназначен для детализированной оценки по отдельным специфическим критериям, которые могут быть критически важны в определенных условиях эксплуатации или для конкретных предпочтений потребителя. К таким критериям относятся, например, параметры двигателя, тяговые характеристики, особенности рабочей зоны, грузоподъемность, уровень удобства и эргономичности рабочего места оператора,



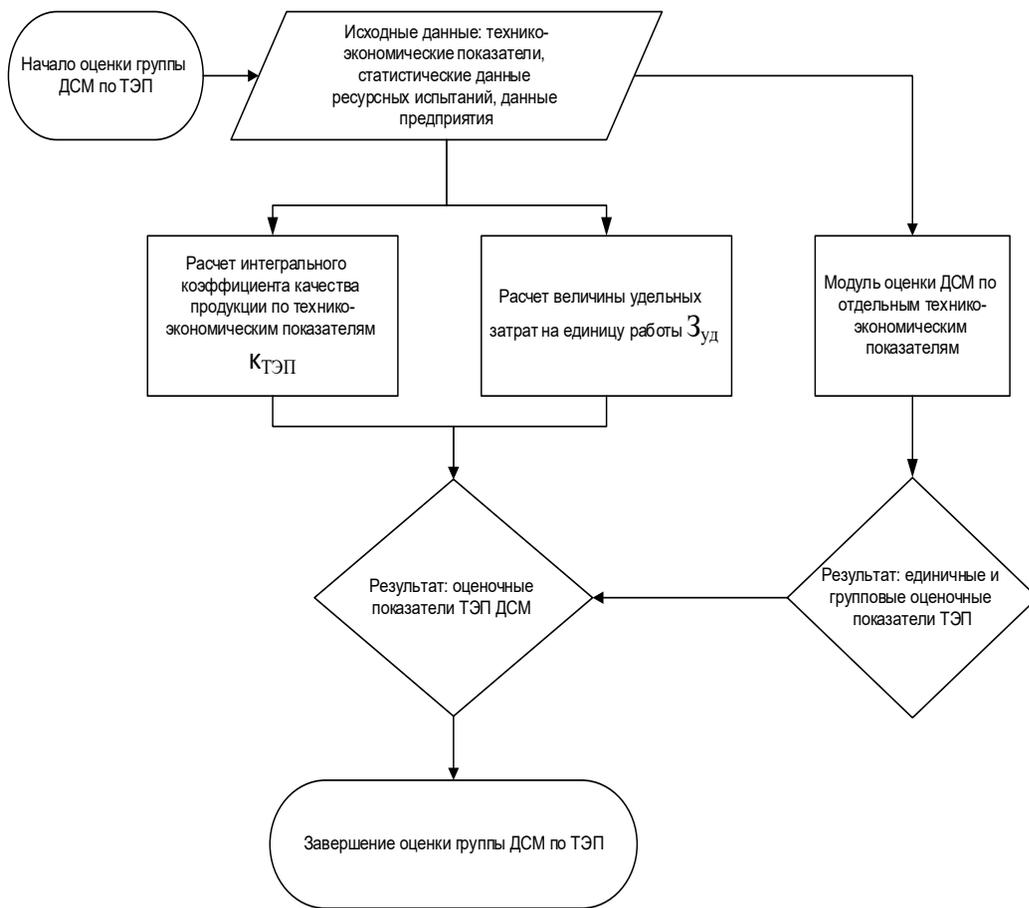


Рис. 1. Блок-схема оценки анализируемых ДСМ по ТЭП [разработана авторами].

а также спецификации отдельных важных узлов машины.

Оценки по этим критериям формируются на основе сравнительного анализа доступных вариантов ДСМ. Для объективного сравнения и выбора наилучшего варианта при наличии нескольких схожих альтернатив и в условиях ограниченной информации или неопределенности, предлагается использовать метод районирования. Этот метод был дополнительно усовершенствован А. В. Терентьевым [21] и позволяет эффективно решать многокритериальные задачи выбора, оптимизируя процесс принятия решений в сложных условиях.

Введение такого дополнительного модуля позволяет углубленно анализировать каждый аспект предлагаемой техники, учитывая уникальные требования и предпочтения потребителя, что делает процесс выбора ДСМ более целенаправленным и обоснованным.

Включение дополнительных критериев оценки и применение математических мето-

дов для интеграции этих результатов в общий интегральный показатель – это значительный шаг вперед в методологии анализа и выбора дорожно-строительных машин. Такой подход позволяет не только уменьшить субъективизм, который часто сопровождает процесс оценки, но и повысить объективность и достоверность при определении уровня конкурентоспособности различных моделей ДСМ.

Интегральный технико-экономический показатель качества продукции, обозначаемый как $K_{ТЭП}$, играет ключевую роль в этом процессе, так как он суммирует различные аспекты эффективности использования машин в одно обобщенное числовое выражение. Это позволяет потребителям и организациям делать обоснованный выбор на основе сравнения максимальной отдачи от инвестированных средств.

Однако, как и любой комплексный метод, предложенный подход требует доступа к обширным и точным данным о технических параметрах, эксплуатационных расходах

и потенциальном доходе от использования техники, а также умения корректно интерпретировать эту информацию в контексте специфических условий эксплуатации. Это может представлять собой некоторый вызов, особенно для новых моделей ДСМ, по которым может не быть достаточного объема эксплуатационных данных.

Блок-схема предлагаемого метода оценки ДСМ по технико-экономическим показателям приведена на рис. 1, алгоритм проведения расчета $\kappa_{ТЭП}$ и $Z_{уд}$ для оценки ДСМ на стадии принятия решения о приобретении приведен далее.

Первый шаг. Создание базы данных для изучаемой группы дорожно-строительных машин на основе информации из интернет-ресурсов и экспериментальных данных, полученных от пользователей и эксплуатантов.

Второй шаг. Для расчета и определения суммарных затрат на эксплуатацию дорожно-строительных машин на протяжении всего их жизненного цикла необходимо рассчитать следующие составляющие статьи для определения общих затрат $Z_{сумм}$:

$C_{ДСМ}$ – стоимость техники в рублях;
 $Z_{единовр}$ – первоначальные затраты при приобретении, в рублях;

$Z_{пост.год}$ – условно постоянные годовые затраты, в рублях за год;

$T_{исп}$ – число лет использования в рассматриваемом ЖЦ, в годах;

$Z_{ТО}$ – затраты на техническое обслуживание, в рублях;

$N_{РТ}$ – усредненная норма расхода топлива, в литрах за час работы;

$C_{топл}$ – стоимость топлива, в рублях за литр;

$Z_{кред}$ – выплаты по кредиту, лизинговые платежи, в рублях;

$L_{общ}$ – величина предполагаемой наработки или величина, равная наработке условного ЖЦ.

Третий шаг. Определяем итоговые суммарные затраты на эксплуатацию ДСМ на всем ЖЦ:

$$Z_{пост.год} \times T_{исп} + Z_{ТО} + \frac{N_{РТ} \times L_{общ} \times C_{топл}}{100} + Z_{кред}, \text{ руб.} \quad (3)$$

Четвертый шаг. Расчет удельных затрат: $Z_{уд} = Z_{сумм} / L_{общ}$, руб./час. (4)

Пятый шаг. Расчет полезного эффекта от эксплуатации ДСМ на всем ЖЦ P_{Σ} . В качестве последнего берется одна из указанных ниже величин в руб./час:

$D_{ком.экспл}$ – удельная величина предполагаемого дохода от коммерческой эксплуатации определяется в рублях за час работы;

$D_{альт}$ – удельный альтернативный доход определяется как разница между стоимостью услуг по предоставлению организации ДСМ в аренду и прогнозными затратами на собственные машины, приведенная к одному часу работы ДСМ.

Значение последнего определяется решением системы (5):

$$\begin{cases} D_{альт} = \sum Q_{аренда}(t) - \sum Q_{собств}(t) \\ D_{альт} > 0, \text{ если } t \in [t_{окуп} \dots t_{службы}] \\ t_{окуп} < t_{службы} \end{cases} \quad (5)$$

Шестой шаг. Расчет отдельных составляющих затрат на достижение полезного эффекта на всем ЖЦ ДСМ Z_{Σ} :

Z_o – затраты на оплату труда;

$Z_{топл}$ – затраты на топливо;

$Z_{зчр}$ – приобретение запчастей и шин;

$Z_{экспл}$ – затраты на эксплуатационные материалы;

$Z_{тр}$ – затраты на ТО и ремонт;

Z_n – накладные расходы;

$Z_{кред}$ – выплаты по кредиту, лизинговые платежи;

$D_{пр}$ – стоимость продажи ДСМ при эксплуатации до предельного состояния может быть принята равной ликвидационной стоимости или с учетом применения математической модели изменения остаточной стоимости, приведенной в работе далее.

Седьмой шаг. Расчет совокупных затрат на достижение полезного эффекта на всем ЖЦ ДСМ Z_{Σ} :

$$Z_{\Sigma} = Z_o + Z_n + Z_{зчр} + Z_{экспл} + Z_{тр} + Z_n + Z_{кред} - D_{пр}, \text{ руб.} \quad (6)$$

Восьмой шаг. Расчет интегрального показателя по ТЭП $\kappa_{ТЭП}$:

$$\kappa_{ТЭП} = (P_{\Sigma} \times L_{общ}) / Z_{\Sigma} \quad (7)$$

Девятый шаг. Запись рассчитанных значений $Z_{уд}$ руб./час и $\kappa_{ТЭП}$ в итоговую таблицу оценки ДСМ. При необходимости переход к оценке следующего ДСМ из анализируемой группы (переход на второй шаг).

В приведенной выше методике представляет особенный интерес величина $D_{пр}$ – стоимости продажи ДСМ при эксплуатации до предельного состояния, которая может быть принята равной ликвидационной стоимости или рассчитана по полученным математическим моделям. Для их нахождения был выпол-



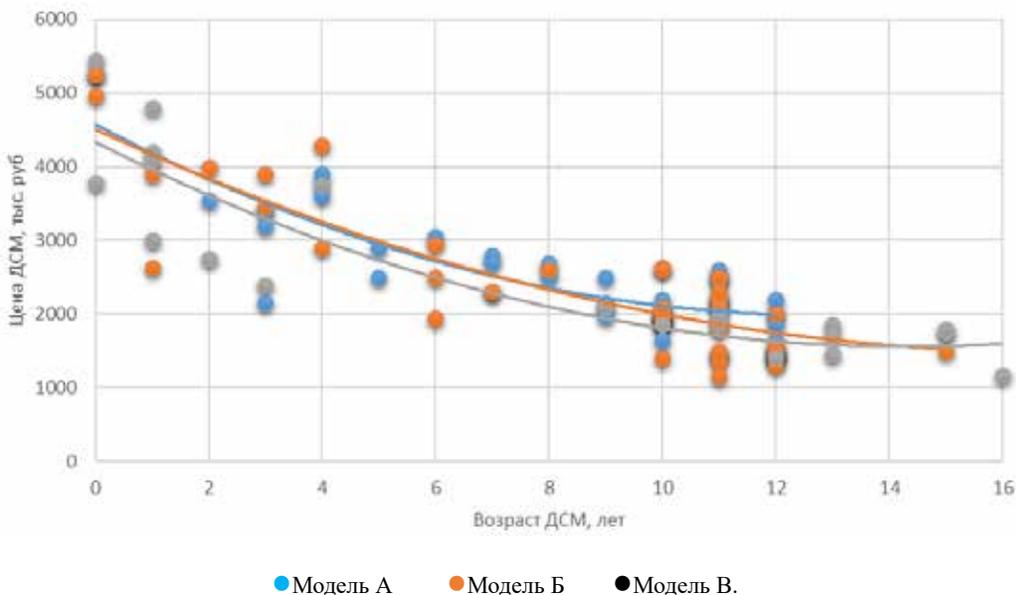


Рис. 2. Регрессионные модели изменения стоимости погрузчиков грузоподъемностью 3 тонны [разработаны авторами].

Таблица 1

Математические модели изменения стоимости ДСМ

Модель	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
А	$y = 15.794x^2 - 404.68x + 4576.9$	$R^2 = 0.7117$
Б	$y = 10.492x^2 - 356.58x + 4512.4$	$R^2 = 0.7606$
В	$y = 13.598x^2 - 388.92x + 4337.8$	$R^2 = 0.8171$

нен анализ статистических данных. Для расчета были использованы данные таких агрегаторов объявлений как Avito, excavator.ru, Avto.ru. Анализировались предложения о продаже трех фронтальных колесных по-

грузчиков китайских производителей грузоподъемностью 3–5 т от новых и до самых возрастных предложений, одновременно фиксировалась цена и наработка в моточасах при наличии о ней сведений.

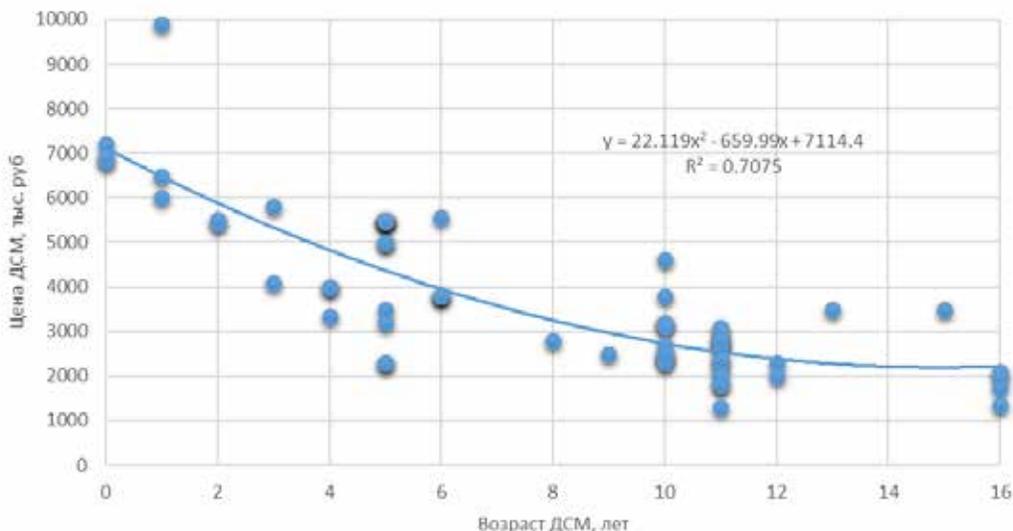


Рис. 3. Регрессионная модель изменения стоимости погрузчиков грузоподъемностью пять тонн [разработана авторами].

На основании собранных данных были получены статистические зависимости стоимости ДСМ на вторичном рынке от их возраста, представленные на рис. 2. При этом существует ясное понимание того, что понятия «цена» на порталах объявлений о продаже техники и реальная стоимость техники на вторичном рынке могут зачастую значительно отличаться. При этом отчасти это ограничение компенсируется как объемом собранных записей, так и особенностью портала объявлений *excavator.ru*, у которого записи о проданной технике уходят в архив с возможностью просмотра. Записи из архива, как правило, учитывают снижение заявленной продавцом стоимости в процессе экспозиции объявления на сайте и поэтому гораздо ближе к реальной стоимости продажи техники на вторичном рынке. В общей доле статистической информации доля таких объявлений порядка 34 %.

Для собранных статистических данных о стоимости техники были рассчитаны регрессионные модели (см. таблицу 1), для которых были получены достаточно значимые коэффициенты детерминации R^2 . Наибольшее значение $R^2 = 0.8171$ было получено на данных о стоимости погрузчиков модели В грузоподъемностью три тонны ввиду наибольшего объема собранных данных.

Аналогичная модель построена для погрузчиков фирмы «В» грузоподъемностью пять тонн, представленная на рис. 3. Регрессионная модель для них имеет вид: $y = 22.119x^2 - 659.99x + 7114.4$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.7075$.

Кроме того, при сборе данных фиксировались записи о наработке техники, что позволило получить дополнительные достаточно интересные результаты. Так для погрузчиков грузоподъемностью 3–5 тонн фирмы «В» средняя наработка в моточасах на год эксплуатации составила 921 моточас/год, для модели «Б» – 780 моточасов/год и для модели «А» – 674 моточаса/год.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Как показал анализ статистических данных по стоимости ДСМ на примере погрузчиков разных брендов производства КНР, характер изменения стоимости у них аналогичен и не показывает значительной разницы в зависимости от конкретного производителя и модели. Построенные для них кривые

и модели аналогичны полученным С. В. Репиным для ДСМ европейских и американских производителей [21].

При этом, если еще несколько лет назад в аналогичных исследованиях, проводимых авторами, техника производства КНР по сравнению с ДСМ европейских и американских фирм производителей с первого года сильно теряла в стоимости на вторичном рынке, то сейчас мы этого не обнаруживаем.

При этом, несмотря на отсутствие различий в динамике снижения стоимости ДСМ на вторичном рынке между погрузчиками разных фирм производства КНР, было обнаружено, что средняя наработка в моточасах/год для погрузчиков одной из марок на 15 и на 27 % больше, чем у погрузчиков двух других фирм. По нашему мнению, последний факт может говорить о потенциальной возможности эксплуатировать технику более интенсивно, а также о меньших сроках поставки запасных частей и, возможно, о потенциально более высоком качестве техники.

Предложенный расчетный метод может быть использован при оценке ДСМ производителей, о продукции которых еще мало фактической информации в части ходимости узлов и агрегатов и ремонтпригодности ДСМ в целом.

Таким образом, предлагаемая нами методика, суть которой приведена на рис. 1 и в алгоритме выше, с учетом использования результатов статистических исследований по стоимости техники на вторичном рынке может использоваться при выборе ДСМ для приобретения с учетом существующей неопределенности и отсутствия эксплуатационных данных и данных о ресурсе и ходимости агрегатов. Отдельного внимания заслуживает блок оценки стоимости и наличия запасных частей для техники, что будет рассмотрено авторами в отдельном исследовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анистратов К. Ю., Лукичев С. В., Исаченков А. Б. Сравнительный анализ эффективности использования канатных и гидравлических экскаваторов // Горный журнал. – 2020. – № 12. – С. 74–78. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.17.

2. Janosevic, D., Mitrev, R., Andjelkovic, B., Petrov, P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2012, Vol. 13, pp. 926–942. DOI: 10.1631/jzus. A1100318.

3. Wang, F., Wen, Q., Xu, X., Xu, B., Sun, Z. Site Operation Strategy for Wheel Loader/Truck Loading and Transportation Cycle. IEEE Transactions on Vehicular





Technology, 2021, Vol. 70, Iss. 5, pp. 4129–4138. DOI: 10.1109/TVT.2021.3070394.

4. Akhil, P. V. G. N. H., Madiraju, S., Ravi Kiran K., R., Deepthi, Y. P. Proliferation of Market Share of Hydraulic Excavators and Wheel Loaders in the Stone Crusher Segment by Strategic Decisions. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2020, Vol. 9, Iss. 1, pp. 947–951. DOI: 10.35940/ijrte.A2163.059120.

5. Сурашов Н. Т., Толымбек Д. Н. Разработка комплексных показателей и оценка эффективности землеройно-транспортных машин отвального типа // *Вестник СибАДИ*. – 2022. – Т. 19. – № 6. – С. 814–827. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-814-827.

6. Ivashkiv, T. Evolution of methods of estimation of machines and equipment is on competitiveness. *Market Infrastructure*, 2022, Iss. 6, pp. 3–7. DOI: 10.32843/infrastructure66-1.

7. Rachman, F. A., Zaenal, Iswandar. Kajian Teknis dan Ekonomis dalam Merencanakan Penggantian Alat Angkut pada Pengupasan Overburden Penambangan Batubara PT Citra Mitra Sehati Site Job PT Cakra Bumi Pertiwi di Kecamatan Ulok Kupai, Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu. *Bandung Conference Series: Mining Engineering*, 2023, Vol. 3, Iss. 1, pp. 232–238. DOI: 10.29313/bcsme.v3i1.6778.

8. Eycindah, N. C., Amadi, R. K. Using Diagnosis and Life Cycle Cost to Improve Reliability of an Excavator. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2019, Vol. 4, Iss. 3, pp. 21–26. DOI: 10.24018/ejeng.2019.4.3.1107.

9. Ануфриев К. А., Репин С. В. Анализ состояния рынка строительной техники на начало 2023 года // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. – 2023. – № 11. – С. 127–132. DOI: 10.26160/2541-8637-2023-11-127-132.

10. Грушецкий С. М., Евтюков С. А., Кузнецов А. А. Определение технической и эксплуатационной производительностей дорожных машин на основе анализа объёмов работ // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2021. – № 1. – С. 38–52. EDN: EPLQOA.

11. Грушецкий С. М., Евтюков С. А., Репин С. В., Каро Г. А. Производительность как качественный критерий оценки эффективности всех этапов системы жизненного цикла дорожных машин // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2020. – № 4 (63). – С. 36–43. EDN: PJSSPR.

12. Евтюков С. А., Репин С. В., Грушецкий С. М., Каро Г. А. Формирование парка машин для строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог с учетом этапов их жизненного цикла // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2020. – № 3 (62). – С. 62–69. EDN: EFBFJ.

13. Евтюков С. А., Репин С. В., Грушецкий С. М., Каро Г. А. Научные задачи исследования жизненного

цикла дорожных машин в современных условиях // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2020. – Т. 17. – № 4 (74). – С. 442–451. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-442-451.

14. Максимов С. Е., Репин С. В., Зызыкин А. В., Чечуев В. Е. Анализ рынка дорожно-строительных машин в России и эволюция потребительских качеств этих машин // *Строительные и дорожные машины*. – 2019. – № 7. – С. 3–12.

15. Мирзаев Р. Р., Терентьев А. В. Методы оценки качества транспортных машин, эксплуатируемых в агропромышленном комплексе // *Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2022 года. Том Часть 2. – М.: ООО «Сам полиграфист»*, 2022. – С. 20–26.

16. Мирзаев Р. Р., Карелина М. Ю., Терентьев А. В., Сидоров Б. Б. Структура иерархической многокритериальной системы оценки качества транспортных машин, эксплуатируемых в агропромышленном комплексе // *Международный технико-экономический журнал*. – 2022. – № 2. – С. 45–53. EDN: ORIHCS.

17. Мейке У. Н., Терентьев А. В., Добромиров В. Н. Исследование возможности применения метода районирования для выбора дорожно-строительных машин // *Строительные и дорожные машины*. – 2022. – № 6. – С. 26–31. EDN: CGIMXE. [ограниченный доступ].

18. Смирнов П. И. Методика оценки конкурентоспособности легковых автомобилей // *Наука в современном информационном обществе: Материалы VII международной научно-практ. конференции, North Charleston, USA, 09–10 ноября 2015 года / н.-и. ц. «Академический»*. Том 1. – North Charleston, USA: CreateSpace, 2015. – С. 130–133. EDN: UTTIDF.

19. Коряковский А. Н., Смирнов П. И. Разработка методики определения эффективного срока эксплуатации лесозаготовительной техники АО «ЛПК «Кипелово» // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Международной научно-техн. конференции молодых ученых, Могилев, 28–29 октября 2021 года / Редколлегия: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]*. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2021. – С. 114. EDN: BXSPRG.

20. Соколов Л. Ю., Смирнов П. И. Разработка методики формирования оптимального парка техники АО «ЛПК «Кипелово» // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Международной научно-техн. конференции молодых ученых, Могилев, 28–29 октября 2021 года / Редколлегия: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]*. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2021. – С. 119. EDN: FWBDFK.

21. Терентьев, А. В. Научно-методический подход к многокритериальной оценке срока эксплуатации автомобиля / *Дисс. ... докт. техн. наук*. – М.: МАДИ, 2018. – 303 с.

Информация об авторах:

Смирнов Петр Ильич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Вологодского государственного университета, Вологда, Россия, smitovpr1@vogu35.ru.

Субботин Борис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Детали машин и теории механизмов» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ); доцент кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия, subbotin-bs@rguk.ru.

Пикалев Олег Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство» Вологодского государственного университета, Вологда, Россия, pikalev@vogu35.ru.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024, одобрена после рецензирования 25.05.2024, принята к публикации 29.05.2024.

TV



СТРОИТЕЛЬСТВО ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ: КАДРОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

102

*Синхронизация обучения
строителей автодорог
и аэродромов.*



ПОДГОТОВКА КАДРОВ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

115

*Значение и обеспечение иноязычной
коммуникативной компетенции
будущих моряков.*



ОБРАЗОВАНИЕ И КАДРЫ





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 625.7:378.1
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-12>

Проект образовательной программы синхронизированного обучения специальности «Автомобильные дороги и аэродромы»



Владимир ПАНКОВ



Ольга ФЕДОРОВА

**Владимир Юрьевич Панков¹,
Ольга Анатольевна Федорова²**

^{1, 2} Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова (СВФУ), Якутск, Россия.

¹ ORCID: 0000-0003-4933-0265; Web of Science Researcher ID: 4487803; Scopus Author ID: 1325803806.

✉ ¹ pankov1956@inbox.ru.

АННОТАЦИЯ

В рамках задачи открытия в области транспортного образования отдельной укрупненной группы специальностей и направлений, авторы, основываясь на многолетнем педагогическом и производственном опыте, разработали для включения в нее эксклюзивный проект программы синхронизированного обучения специальности «Автомобильные дороги и аэродромы».

В статье, в том числе с целью обсуждения профессиональным сообществом, представлена модульная схема синхронизированной основной профессиональной образовательной программы «Автомобильные дороги и аэродромы», рассмотрена специфика структурирования каждого модуля и наполнения его дисциплинами.

Особое внимание уделено хорошо известной проблеме соотношения в образовательном процессе количества гуманитарных и технических дисциплин. Показаны основные причины появления в общих профессиональных образовательных программах технической направленности повышенного количества гуманитарных дисциплин. Сделаны предло-

жения по механизмам ликвидации существующих диспропорций.

Детально обсуждаются основные проблемы в системе организации обучения техническим специальностям в части финансирования программ, обеспечения программ разрабатываемой укрупненной группы специальностей «Дорожное хозяйство» требованиями профессиональных стандартов, образовательного процесса и научно-исследовательских работ выпускающих кафедр – исследовательским/лабораторным оборудованием и дорожными машинами.

Предложен один из возможных путей внедрения программы «Автомобильные дороги и аэродромы» в практику профессионального обучения системы образовательных организаций высшего образования Российской Федерации. Авторы обосновывают мнение, что наиболее перспективным решением будет создание Межведомственных научно-образовательных центров регионального значения (МНОЦ), привязанных к конкретным дорожно-климатическим зонам.

Ключевые слова: автомобильные дороги, образование, подготовка кадров, программа обучения, организация профессионального обучения, научно-образовательные центры, криолитозона.

Для цитирования: Панков В. Ю., Федорова О. А. Проект образовательной программы синхронизированного обучения специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 102–114. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-12>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка инженерно-технических кадров является одним из основополагающих факторов интенсификации развития экономики и укрепления Российской Федерацией национального суверенитета в области технологий и промышленного производства. Общей теории подготовки инженерно-технических кадров и организации образовательных процессов уделяется внимание на различных уровнях^{1,2,3}, данной проблеме посвящено значительное число научных работ, в частности, [1–8]. Вопросы подготовки инженерных кадров для транспортной отрасли рассматриваются, например, в [9–12]. При этом крайне мало публикаций в периодических научных изданиях, касающихся реальных проблем подготовки кадров для дорожно-строительной отрасли (в их числе, например, [13]).

Развитие высшего образования в области дорожного хозяйства получило дополнительный импульс по результатам заседания президиума Правительственной комиссии по транспорту 10 апреля 2023 года. На нем было одобрено предложение Минтранса России о формировании федерального проекта «Развитие кадрового потенциала транспортной отрасли» на период 2026–2035 годов⁴. Как было указано, «его целью является обеспечение необходимого финансирования, реализация образовательных программ и подготовка необходимого количества специалистов, в том числе для новых отдельных направлений..., которые предлагает ввести Минтранс с формированием отдельной укрупненной группы специальностей и направлений подготовки «Дорожное хозяйство» в области образования «Транспорт»⁴. В составе данной укрупненной группы были отмечены две нераз-

рывные, на наш взгляд, специальности «Автомобильные дороги и аэродромы», «Мосты и транспортные тоннели»

В настоящее время, в соответствии с Общероссийским классификатором специальностей по образованию ОК 009–2016 (ОКСО)⁵, подготовка кадров дорожно-строительной отрасли в разделах III, IV, V направлений подготовки высшего образования, соответственно бакалавриата, магистратуры, и специальностей высшего образования – специалитета, отнесена к области образования «Инженерное дело, технологии и технические науки», укрупненной группе специальностей 08 (УГС) – «2.08.00.00 Техника и технологии строительства». В рамках УГС по направлениям подготовки бакалавриата (08.03.) и магистратуры (08.04.) подготовка кадров дорожно-строительной отрасли осуществляется в рамках одного направления 2.08.03(04).01 «Строительство», а по специальностям высшего образования – специалитета (08.05.) – специальности 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей».

Существующая ситуация создает для учебных организаций высшего образования множество проблем в организации, реализации и синхронизации учебного процесса разных уровней высшего образования (бакалавриат, магистратура, специалитет). Подготовка специалистов по программе 08.05.02 «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» не стыкуется с направлением подготовки бакалавриата и магистратуры. В названии программы специалитета присутствует фраза «восстановление и техническое прикрытие», заимствованная из военной терминологии, но отсутствует упоминание изыскательской, проектной, строительной, эксплуатационной и ремонтной деятельности, имеющей важное технологическое, производственное, организационно-управленческое значение в современном дорожно-строительном комплексе. В целом существует практически неразрешимая проблема по синхронизации программ под-

¹ Подчероб М. В России постоянно говорят о дефиците инженерных кадров // Ведомости, 25 июля 2023 г. [Электронный ресурс]: <https://www.vedomosti.ru/management/articles/2023/07/25/986739-v-rossii-postoyanno-govoryat-o-defitsite-inzhenernih-kadrov>. Доступ 15.11.2023.

² Индикаторы образования 2023 // Статистический сборник. Издательство: НИУ ВШЭ. – 433 с. – С. 36. ISBN 978-5-7598-2746-7.

³ Данные Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. [Электронный ресурс]: <https://publications.hse.ru/pubs/share/direct/269677991.pdf>. Доступ 27.12.2023.

⁴ Андрей Белоусов провёл заседание Правительственной комиссии по транспорту. [Электронный ресурс]: <http://government.ru/news/48205/>. Доступ 27.12.2023.

⁵ [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_212200/.



готовки специалистов с одной стороны и бакалавров с магистрами – с другой. Эта неопределенность по распределению в образовательном процессе профессиональных компетенций и их уровня сказывается даже при трудоустройстве выпускников на предприятия и в организации дорожно-строительной отрасли.

В то же время, с кодом ОКСО бакалавриата и магистратуры 08.03(04).01 связана еще одна проблема, с которой сталкиваются абсолютно все университеты и вузы, в которых существует несколько структурно разделенных учебных подразделения (УЧП) на уровне факультетов или институтов, осуществляющих подготовку кадров по этому коду. Эта проблема связана с особенностями выделения бюджетных мест. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации выделяет бюджетные места (КЦП) на укрупненную группу специальностей (08.00.00) на разные уровни образования (08.03 или 08.04) и на определенную специальность. В действующих кодах ОКСО предусмотрена только одна специальность – 08.03(04).01 «Строительство». Соответственно, при распределении контрольных цифр приема даже между двумя УЧП, например, занимающимися промышленно-гражданским строительством и дорожным строительством в одном и том же вузе, возникают проблемы, которые могут привести к закрытию отдельных направлений подготовки в одном из учебных подразделений. Например, в Северо-Восточном федеральном университете имени М. К. Аммосова такая ситуация возникает ежегодно при распределении КЦП между Инженерно-техническим институтом, ориентированным на промышленно-гражданское строительство, и Автодорожным факультетом, готовящим кадры для дорожно-строительной отрасли, и решается она не всегда в пользу Автодорожного факультета. Эта проблема прослеживается и при формировании/финансировании лабораторной и эмпирической баз УЧП.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью подготовки к выполнению решений Правительственной комиссии по транспорту от 10 апреля 2023 года и с учетом положений Указа Президента Россий-

ской Федерации «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования» от 12 мая 2023 года № 343⁶, авторы выносят для обсуждения профессиональным сообществом отдельные предложения по организации синхронизированного обучения и подготовки специалистов для дорожно-строительной отрасли по направлению «Автомобильные дороги и аэродромы». Предложения подготовлены на основе многолетнего опыта преподавания по направлениям бакалавриата, магистратуры и специалитета на кафедре «Автомобильные дороги и аэродромы» Автодорожного факультета Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Схема синхронизированного образования

С целью решения проблемы выбора конкретной специальности/направления обучения студентами в рамках планируемой УГС «Дорожное хозяйство» и синхронизации различных уровней высшего образования по программе подготовки специалистов «Автомобильные дороги и аэродромы» авторами разработана укрупненная схема основной профессиональной образовательной программы (рис. 1).

Следует отметить, что Модуль 5 «Аспирантура» организационно не входит в программу «Автомобильные дороги и аэродромы». Обучение в аспирантуре осуществляется на основе самостоятельной аккредитованной общей профессиональной образовательной программы (ОПОП). Проблемам, связанным с подготовкой высококвалифицированных научных кадров, необходимо посвятить отдельную статью.

В целом, предлагаемая схема синхронизированной подготовки кадров по направлению «Автомобильные дороги и аэродромы» имеет ряд преимуществ по сравнению с существующей системой, перечисляемых ниже.

1. Поддается регулированию и контролю государством и образовательной организацией в части количества требуемых/подготовленных кадров определенной квалифи-

⁶ [Электронный ресурс]: <http://www.kremlin.ru/acts/news/71118>.

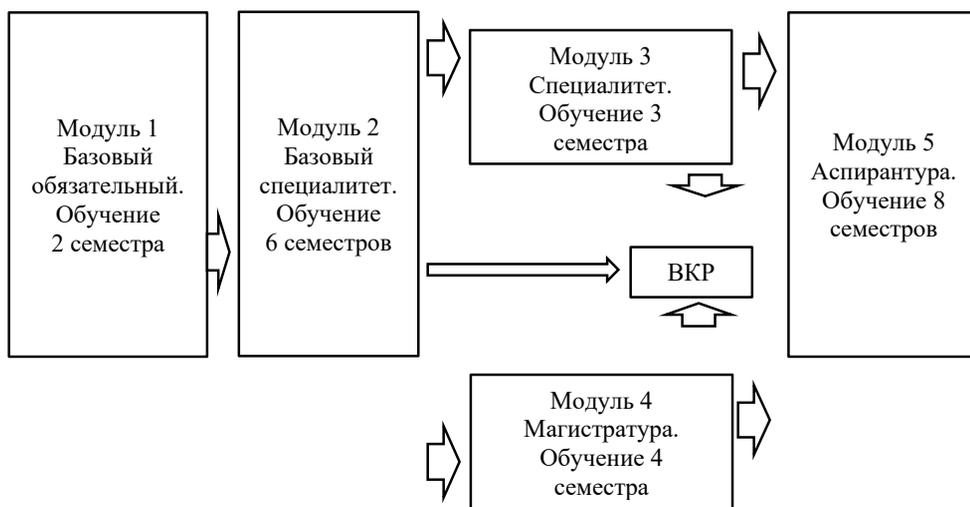


Рис. 1. Схема синхронизированной основной профессиональной образовательной программы «Автомобильные дороги и аэродромы» [выполнено авторами].

кации даже на уровне отдельных регионов/вузов. На государственном уровне Министерством науки и высшего образования Российской Федерации совместно с Министерством транспорта Российской Федерации по конкретным вузам ежегодно формируется заказ на специалистов разного уровня в виде бюджетных мест. Образовательная организация выполняет этот государственный заказ с гарантиями качества знаний и объема компетенций по каждому уровню образования – базовому специалитету, магистратуре, специалитету.

2. Появляется однозначное разделение по уровню знаний, практическим навыкам и компетенциям базового специалитета, магистратуры и специалитета.

3. *Модуль 1 «Базовый обязательный»* (рис. 1) идентичен для всех специальностей и направлений подготовки формируемой УГС «Дорожное хозяйство». Исключение составляют только расширенный курс «Введение в специальность» и дисциплины, по которым в учебном плане предусмотрены летние учебные практики после первого курса. Структура модуля максимально унифицирует подготовку студентов первого курса на всех направлениях подготовки. Она позволяет студентам своевременно определиться с выбором специальности и, в случае наличия неудовлетворенности, без существенных пересдач перейти на другую специальность, включая другие образовательные учреждения, в рамках УГС «Дорожное хозяйство». В результате на

каждом направлении подготовки после первого курса остаются наиболее мотивированные студенты.

4. *Модуль 2 «Базовый специалитет»*. Все дисциплины модуля – общепрофессиональные, связанные исключительно с изысканиями, проектированием, строительством, эксплуатацией и содержанием автомобильных дорог. Принципиальным признаком этого модуля является интеграция в него образовательных курсов по получению профессий уровня среднего профессионального образования – водитель категорий А, В, С, D; тракторист; грейдерист; оператор асфальтоукладчика; оператор катка; оператор гудронатора; водитель фронтального погрузчика; геодезист и др. Получение дополнительных профессий осуществляется на базе блока «Дисциплины по выбору». В результате по завершению трехлетнего обучения студенты будут обладать дополнительными профессиями (от трех до шести в зависимости от длительности курса подготовки).

5. *Модуль 3 «Специалитет»*. Основная направленность модуля – развитие навыков, включая практические, инженерного творчества, проведения опытно-конструкторских работ, проектирования и строительства на основе полученных знаний и научной подготовки, организация и управление процессами дорожно-строительной отрасли. Позволяет реализовывать индивидуальные тренды подготовки кадров с расширенными знаниями и практическими навыками по отдельным



направлениям профессиональной деятельности. Индивидуальные образовательные траектории формируются на основе предусмотренных в федеральных государственных образовательных стандартах модулей дисциплин по выбору (элективные дисциплины), факультативных занятий, научно-исследовательской деятельности студентов на базе кафедральных/институтских лабораторий, а также за счет привлечения студентов к выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по государственным контрактам и хозяйственным договорам. Индивидуальные тренды образования студентов реализуются для подготовки отдельных специалистов, в которых возникает острая текущая потребность на региональном уровне.

6. *Модуль 4 «Магистратура».* Магистратура включается в программу специалитета в качестве отдельного уровня образования. В настоящее время аккредитация программы и обучение проводятся независимо от направления «Автомобильные дороги и аэродромы». В то же время магистратура является важнейшей составляющей предлагаемой синхронизированной системы обучения и должна быть включена в единый федеральный государственный стандарт наряду с модулями 1–3. Ее наличие в образовательном процессе дает возможность выпускникам уровня базового специалитета после получения определенного опыта практической работы на производственных предприятиях продолжить обучение на более высокой ступени. С другой стороны, на обучение в магистратуру могут поступить специалисты, получившие образование в рамках других укрупненных групп специальностей, например, экономисты, менеджеры, специалисты по транспортным системам, материаловеды и т. п. Принципы организации обучения идентичны таковым модуля 3 «Специалитет». Специфика направления магистратуры – научно-исследовательская и опытно-конструкторская деятельность, разработка новых технологий и материалов, подготовка специалистов с расширенными компетенциями в мониторинговой, экспертной и нормотворческой областях.

7. В зависимости от текущих потребностей в кадрах определенной квалификации как отрасли в целом, так и региональных/муниципальных предприятий и орга-

низаций предлагаемая система образования дает возможность оперативной подготовки требуемого количества кадров узкой специализации на основе организации курсов дополнительного профессионального образования (ДПО) уровней базового специалитета, специалитета и магистратуры.

Как подчеркивается в пункте 12 раздела II «Текущее состояние кадрового обеспечения и образования для дорожного хозяйства» Концепции развития дорожного образования до 2035 года⁷, утвержденной Министром транспорта Российской Федерации В. Г. Савельевым 15 февраля 2023 года, образовательные программы по подготовке дорожных строителей перегружены «...гуманитарными дисциплинами, не имеющими отношения к формированию профессиональных компетенций». Эта общеизвестная в системе технического образования проблема связана с особенностями формирования кадрового состава учебно-методических подразделений вузов. Имея преимущественно гуманитарное базовое образование, работники учебно-методических подразделений при разработке базовых (БУП) и рабочих (РУП) учебных планов для технических специальностей по своему базовому уровню компетенций не в состоянии составить сбалансированных учебных программ. Как результат – первые четыре семестра (два курса) студенты занимаются изучением дисциплин, большей частью не имеющих отношения к проблемам изысканий, проектированию, строительству, эксплуатации и содержанию автомобильных дорог и аэродромов. На старших курсах те же гуманитарные дисциплины практически полностью заполняют модули элективных дисциплин (дисциплины по выбору, код ДВ), а также присутствуют в модулях общепрофессиональных и профессиональных дисциплин.

С формальной точки зрения предложенная синхронизированная схема подготовки может купировать неоправданно большое количество гуманитарных дисциплин в образовательных программах технических ОПОП. Однако кардинальное решение находится в организационной плоскости.

Во-первых, в соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2012 года

⁷ [Электронный ресурс]: https://dor-obr.ru/files/007/601/233/7601233/original/Концепция_развития_дорожного_образования_до_2035_года.pdf.

№ 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»⁸ и нормативными документами образовательных учреждений (устав, положения по учебным подразделениям) организация и реализация образовательных процессов по направлениям подготовки возложена на учебные подразделения и кафедры соответствующего профиля. Следовательно, решение о преподаваемых в рамках ОПОП дисциплинах, необходимых для подготовки квалифицированных кадров, должны принимать выпускающие кафедры. Учебно-методические подразделения не должны вмешиваться в формирование списка читаемых дисциплин в силу отсутствия у них требуемых компетенций. Их основная роль – методическая и техническая поддержка выпускающих кафедр при составлении базовых и рабочих учебных планов, в первую очередь, по распределению дисциплин/часов по семестрам, формированию форматов электронных документов.

Во-вторых, федеральными государственными образовательными стандартами третьего поколения (ФГОСЗ, 3+, 3++), а также макетом ФГОС четвертого поколения⁹ однозначно прописывается количество и объемы обязательных гуманитарных дисциплин. Во всех последних поколениях стандартов указывалось не более пяти гуманитарных дисциплин, включая физическую культуру и спорт. В пункте 2.5 проекта макета ФГОС четвертого поколения также присутствуют дисциплины: философия, иностранный язык, безопасность жизнедеятельности, история России (не менее 4 зачетных единиц или, соответственно, 144 часа), физическая культура и спорт, в объеме не менее 328 академических часов.

Основываясь на базовых правовых документах, можно сделать достаточно однозначный вывод – перенасыщение ОПОП технических дисциплин гуманитарными связано с особенностями внутренней организационной структуры высших учебных заведений, когда наполнение базовых и рабочих учебных планов дисциплинами осуществляется не выпускающими кафедрами, несущими ответственность за раз-

работку и реализацию ОПОП, качество подготовки специалистов, а учебно-методическими подразделениями вузов, не имеющими подчас требуемых квалификаций и знаний в области технических наук.

Например, дисциплина «Безопасность жизнедеятельности». С позиций естественных и гуманитарных наук проблема актуализируется в области техносферной безопасности, экологии, природопользования, социально-экономических взаимоотношений, межнациональных, культурных, языковых и религиозных взаимодействий, педагогики и андрагогики. В технических науках и, в частности, ОПОП «Автомобильные дороги и аэродромы» актуализация дисциплины смещается в конкретные области взаимодействия человека с техническими средствами, процессами и технологиями (производственные базы, дорожные машины и механизмы, конструкционные материалы, техника безопасности) с учетом реализации экологической защиты от производственной деятельности, как социума, так и природы.

Соответственно, проблема решается путем приведения организационной структуры образовательных учреждений и порядка формирования БУПов и РУПов в соответствии с требованиями базовых нормативных документов.

Значительное количество гуманитарных дисциплин попадает в базовые и рабочие учебные планы в связи с наличием нормативных требований включения в образовательный процесс обязательных блоков/модулей/дисциплин, отражающих региональную специфику – так называемая «региональная компонента». Опираясь на многолетний опыт работы авторов, можно предложить решение проблемы – в федеральный государственный образовательный стандарт внести пункт, предписывающий формировать региональную компоненту исключительно общепрофессиональными и профессиональными дисциплинами. Например, для направления «Автомобильные дороги и аэродромы» одноименной кафедры Автодорожного факультета Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова региональная компонента должна быть направлена на решение ряда проблем дорожно-строительной отрасли – технологии строительства на

⁸ [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/.

⁹ [Электронный ресурс]: https://fgosvo.ru/uploadfiles/fgos4/Maket_FGOSVO_4.pdf?ysclid=lhev18fg6p700616569.



многолетнемерзлых грунтах, сухопутные автотрассы, ледовые дороги и переправы, устойчивость дорожных машин, материалов и конструкций при экстремально низких температурах, логистические проблемы криолитозоны и др.

Базовые проблемы и риски реализации программы синхронизированного обучения

Предлагаемая на обсуждение профессионального сообщества синхронизированная система подготовки специалистов по изысканиям, проектированию, строительству, эксплуатации и содержанию автомобильных дорог и дорожной инфраструктуры может быть реализована при выполнении уполномоченными структурами ряда организационных, правовых и финансово-экономических действий. Главные из них:

1. Финансироваться должна программа обучения.

В настоящее время финансирование деятельности кафедр осуществляется по «подушевому» принципу – выпускающим кафедрам для формирования штатного профессорско-преподавательского состава (ППС) выделяются средства из расчета одна штатная единица преподавателя на двенадцать обучающихся на кафедре студентов. Обосновывается этот подход «экономической целесообразностью». С одной стороны, на практике подобный подход приводит к существенному снижению качества образования, потому что при появлении малобюджетных/некомплектных групп (в СВФУ на 2022–2023 учебный год малоконтактной группой считалась группа численностью: менее 20 студентов в группе специалитета, менее 22 – бакалавриата, менее 12 – магистратуры) предпринимается ряд мер по сокращению бюджетных расходов. В частности, перевод ППС на внебюджетные ставки, перевод студентов на обучение на платной основе, перевод значительной части часов аудиторных занятий (лекции, лабораторные и практические занятия) в графу РУП «Самостоятельная работа студентов» (СРС). Это естественные следствия «подушевого» принципа финансирования. В соответствии с действующими ФГОС и РУП объем часов преподавания на пяти курсах специалитета составляет около 10 800 часов (300 зачетных единиц или 60

зачетных единиц на курсе). В СВФУ при норме годовой учебной нагрузки для ассистентов, старших преподавателей и доцентов 900 часов для реализации учебной программы требуется 12 штатных единиц. Соответственно, численность студентов в потоке должна быть не менее 144 человек или, в среднем, 29 студентов на каждом курсе. Как показывает практический опыт, при поступлении на первый курс, например, 26 студентов к пятому курсу в группе остается 15–16 человек, т.е. сохраняется около 61,5 % контингента. Следовательно, для сохранения штатного профессорско-преподавательского состава учебные подразделения вынуждены переводить около 40 % часов аудиторных занятий (лекции, лабораторные, практические) на СРС или внебюджетные ставки. С другой стороны, понятие «экономическая целесообразность» несовместимо как с социальными явлениями в целом, так и с образовательными процессами в частности. Если подтверждена потребность в кадрах определенной квалификации путем выдачи лицензионных и аккредитационных документов, определено необходимое количество этих специалистов (выделенные бюджетные места), то не должно появляться вопроса об «экономической целесообразности» выполнения государственного заказа. Образовательная организация в лице выпускающей кафедры обязана подготовить требуемое для дорожно-строительной отрасли количество кадров требуемой специализации.

Объем финансирования синхронизированной программы в целом определяется достаточно просто. Рассмотрим это на примере предлагаемой схемы образования с учетом нормативной годовой учебной нагрузки ППС, принятой в СВФУ – 900 часов/год (эта нагрузка различается в вузах) и объема годовой программы в 60 зачетных единиц (2160 часов).

Общий объем часовой нагрузки ППС составляет:

- На уровне базового специалитета (модули 1, 2, рис. 1) – 2640 часов.
- На уровне специалитета (модуль 3, рис. 1) – 3240 часов.
- На уровне магистратуры (модуль 4, рис. 1) – 4320 часов.

Суммарное количество часов, необходимое для качественного обучения студентов

по синхронизированной программе, составляет 10 200 часов. Для реализации программы требуется 10200/900~11,4 ставки ППС. С учетом наличия в штате любой кафедры профессоров, имеющих, часто, меньшую годовую почасовую нагрузку, для реализации программы аудиторных занятий на кафедре должно быть порядка 12 штатных единиц ассистентов, преподавателей, доцентов и профессоров. Помимо этих ставок, кафедре должны выделяться штатные единицы инженерно-технических работников (в зависимости от наличия конкретных лабораторий), а также ставки мастеров производственного обучения для проведения занятий по интегрированной в программу подготовки базового специалиста системы профессионального обучения СПО.

2. На уровне профессиональных стандартов должны быть сформированы однозначные трудовые функции для каждого уровня образования – базового специалиста, специалиста и магистратуры.

На сегодняшний день для специалистов дорожной отрасли с высшим образованием утвержден лишь один профессиональный стандарт¹⁰. Несмотря на дату его публикации, его структура никак не может способствовать разработке ОПОП и ФГОС, адекватных современным требованиям и вызовам. Во-первых, там даются трудовые функции бакалавров как базового элемента структуры образования. Во-вторых, в разделе III «Характеристика обобщенных трудовых функций» перечисляются должности/профессии/специальности и трудовые функции, связанные исключительно со строительством дорог, организацией и управлением дорожно-строительными процессами и контролем за качеством их выполнения. Из трудовых функций специалиста дорожника выпали целые комплексы работ и обязанностей, в частности:

– Изыскания автомобильных дорог. Например, на территории распространения криолитозоны они включают в себя около двух десятков изысканий. В соответствии

с требованиями нормативных документов к обязательным изысканиям относятся: климатическая характеристика района работ; геоморфологическая характеристика и рельеф; геоботаническая характеристика; гидрологические условия; геологическое строение, литологический состав грунтов, их возраст и генетическая характеристика; тектонические условия; гидрогеологические условия; площадное распространение вечномерзлых и талых грунтов; мощность и вертикальное строение вечномерзлой толщи; глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов; температурный режим грунтов; температурно-прочностное состояние грунтов (твердо-мерзлые, пластично-мерзлые, сыпучемерзлые, морозные); характеристика пучинистости грунтов; криогенные текстуры грунтов; мерзлотные физико-геологические процессы и явления; физические, теплофизические и механические характеристики грунтов; засоленность грунтов; характеристика сейсмичности района работ и повторяемости сейсмических воздействий в нем, а также приращения сейсмичности (положительные и отрицательные) площадок строительства (в сейсмоопасных районах).

– Проектирование автомобильных дорог с учетом данных изыскательского комплекса.

– Эксплуатация/содержание автомобильных дорог с учетом транспортно-логистических, природно-климатических и инженерно-геологических особенностей конкретных регионов. Для криолитозоны, например, необходимы специалисты по сухопутным зимникам, ледовым дорогам и переправам.

– Управление и ремонт дорожно-строительных машин, работающих в конкретных природно-климатических условиях.

– Эксплуатация и содержание производственных баз дорожного строительства (карьеры дорожно-строительных материалов; асфальтобетонные, цементобетонные, дробильные заводы, вахты, ремонтные базы и пр.).

– Лабораторное/научное сопровождение дорожного строительства (дорожные лаборатории, лаборатории входного контроля, экспертные лаборатории и др.).

– Научно-исследовательские работы по разработке новых технологий строитель-

¹⁰ Приказ Министерства труда и социальной защиты «Об утверждении профессионального стандарта «Специалист по организации строительства объектов дорожного хозяйства» от 20 марта 2023 года № 182н. [Электронный ресурс]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202304190017>. Доступ 15.11.2023.



ства и дорожно-строительных материалов; экспертизы проводимых работ и анализ состояния автодорог, системы организации научных исследований и отчетности; организация и проведение исследовательских работ на экспериментальных и производственных полигонах и др.

– Строительство и эксплуатация дорожной инфраструктуры, которая включает водопропускные и водоотводные сооружения, освещение, светофоры, видеокамеры, энергоснабжение, знаки, горизонтальную разметку, защиту от шума, пешеходные переходы, тротуары и др.

– Мониторинг состояния и обследование дорог.

Парадокс заключается в том, что при отсутствии профессиональных стандартов в программах обучения специалистов по направлению 08.05.02 «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» все перечисленные выше задачи/специализации/квалификации представлены в виде отдельных дисциплин.

Необходимость наличия профессиональных стандартов диктуется требованиями федеральных государственных образовательных стандартов и разрабатываемых на их основе ОПОП и рабочих учебных планов, в соответствии с которыми, в свою очередь, организуется учебный процесс. В ФГОС представлено также три типа компетенций: универсальные (УК), общепрофессиональные (ОПК) и профессиональные (ПК). Содержание УК прописывается в ФГОС, и они одинаковы для всех дисциплин, всех уровней высшего образования и всех укрупненных групп специальностей. Это один из основных факторов непропорционально большого числа гуманитарных дисциплин на технических направлениях, потому что в учебно-методических подразделениях вузов считают, что общепрофессиональные и профессиональные технические дисциплины не несут в себе этих УК. Как правило, в РУП универсальные компетенции привязываются исключительно к гуманитарным дисциплинам.

Общепрофессиональные и профессиональные компетенции должны разрабатываться в соответствии с профессиональными стандартами, которые для дорожно-

строительной отрасли не разработаны. Для такого случая в ФГОС присутствует пояснение – «(при наличии)». Что делать, если профессиональные стандарты отсутствуют, разъяснений не дается. В связи с этим, при подготовке документации, в которой присутствуют формулировки этих компетенций (ОПОП, БУП, РУП, рабочие программы дисциплин), определения общепрофессиональных и профессиональных компетенций для бакалавриата, магистратуры и специалитета в реальности разрабатываются профессорско-преподавательским составом кафедры на основе имеющегося педагогического, производственного опыта и по согласованию с работодателями. Создавшаяся ситуация свидетельствует если не о полной формальности понятия «компетенция», то о бессмысленности привязки образовательных «компетенций» к профессиональным стандартам, по крайней мере для специалистов дорожного хозяйства, на ближайшие десятилетия. Принимая во внимание факт невозможности отмены профессиональных стандартов, остается только один выход – исключение из ФГОС понятия «компетенции».

Как показывает многолетний опыт преподавательской деятельности, в рамках образовательного процесса отсутствие профессиональных стандартов купируется исключительно профессионализмом профессорско-преподавательского состава учебных организаций при тесном взаимодействии с региональными производственными предприятиями и организациями. Однако на уровне государственного планирования структуры кадрового состава и определения потенциала дорожно-строительной отрасли, отражающегося, в частности, в выделении бюджетных мест для учебных образовательных учреждений, проблема отсутствия профессиональных стандартов имеет первостепенное значение. Регулятором профессиональной дорожно-строительной деятельности является Министерство транспорта Российской Федерации в лице Федерального дорожного агентства (Росавтодор). Только эти учреждения имеют права и компетенции по составлению перспективных планов формирования кадрового состава отрасли и разработке на государственном уровне требований к качеству и количеству требуемых специалистов

с различными компетенциями. Требования к качеству специалистов различного уровня подготовки и набору их компетенций формализуются на уровне профессиональных стандартов. Образовательные учреждения, в соответствии с требованиями ФГОС, осуществляют подготовку кадрового состава, соответствующего запросам отрасли, изложенным в профессиональных стандартах. С появлением Ассоциации дорожного образования и ее предложением о создании учебно-методического центра [13], появляется надежда, что в ближайшее время регулятор в области дорожного хозяйства разработает столь необходимые для образовательных процессов профессиональные стандарты различного уровня.

3. Проблема обеспечения образовательного процесса и научно-исследовательских работ выпускающих кафедр исследовательским/лабораторным оборудованием и дорожными машинами.

Предлагаемая на рассмотрение профессионального сообщества схема синхронизированного обучения по направлению специалитета «Автомобильные дороги и аэродромы» ориентирована на подготовку профессиональных кадров для дорожно-строительной отрасли на всех уровнях обучения. Высокая степень профессионализма предполагает не только наличие у студентов глубоких знаний по преподаваемым предметам и междисциплинарным связям, но и закрепление этих знаний на лабораторных и практических занятиях. Немаловажным аспектом образовательного процесса является получение студентами практических навыков по изысканиям, проектированию, строительству, эксплуатации и содержанию автодорог.

Практические навыки обучающиеся могут получить или при проведении учебных занятий (практические и лабораторные работы), или на учебных и производственных практиках, проводимых на производственных предприятиях.

Производственные практики – наиболее эффективный механизм для закрепления полученных во время учебы знаний и получения реального практического опыта. Однако на них накладывается жесткое ограничение, связанное как со спецификой обязательного времени аудиторного обучения, определенного ФГОС, так и особен-

ностями организации работ в отрасли. В Республике Саха (Якутия), например, активная фаза дорожно-строительных работ начинается в мае и продолжается до конца сентября. В целом строительный сезон длится около пяти месяцев. Образовательный процесс на кафедре «Автомобильные дороги и аэродромы» Автодорожного факультета СВФУ в соответствии с требованиями ФГОС начинается первого сентября и заканчивается, в зависимости от уровня образования, в период 10–30 июня. Даже при наличии у кафедры договоров об организации производственных практик практически со всеми дорожно-строительными предприятиями РС(Я) в силу формальных причин студенты фактически могут приступить к работе только в третьей декаде июня. К этому времени на производственных предприятиях остаются вакансии только дорожных рабочих, на которые и устраиваются практиканты. Возможность участия практикантов в производственном процессе ограничена периодом в два месяца (июль–август). При очень плотном графике строительных работ у студентов, особенно после второго курса обучения, нет времени получить более высокую квалификацию, а у работодателя нет ни возможности, ни прав (отсутствие лицензии на образовательную деятельность) на обучение практикантов. Соответственно, приобретенные студентами знания на производственных практиках закрепляются только на уровне квалификации дорожного рабочего.

С другой стороны, приобрести практические навыки строительства, содержания и эксплуатации сухопутных автотранспортных средств, ледовых дорог и переправ студенты не могут в принципе.

Проблема решается в рамках предлагаемой системы синхронизированного обучения. Приобретение дополнительных специальностей и получение по ним практических навыков по всем видам практической деятельности учащихся осуществляется в процессе обучения, начиная с первого курса при освоении дисциплин по выбору (элективных дисциплин), дисциплин, относящихся к региональной компоненте, факультативных занятий, научно-исследовательской деятельности и специализированных кружков. Причем получен-



ные дополнительные специальности и квалификации различных уровней должны быть подтверждены документами государственного образца (права на категорию, удостоверения, сертификаты, дипломы, свидетельства и т. п.).

В перспективе можно принять систему переподготовки кадров, длительное время практикуемую в образовательных учреждениях и производственных предприятиях водного транспорта. По окончании обучения на уровне СПО выпускникам выдается, помимо диплома об окончании, рабочий диплом, являющийся основанием для допуска к работе. Срок действия рабочего диплома – пять лет. Руководящие работники также один раз в пять лет проходят специализированные курсы переподготовки с выдачей удостоверения государственного образца.

Основным принципом передачи студентам практически значимых навыков работы с современным оборудованием должна быть планомерная реорганизация учебных лабораторий вузов в реальные научно-исследовательские лаборатории, организационно структурированные по аналогии с лабораториями академических институтов и производственных предприятий. Организация предлагаемого принципа обучения специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» предполагает формирование и приобретение для образовательного учреждения:

- ряда аккредитованных научно-исследовательских стационарных лабораторий и кабинетов, обеспеченных полным комплектом современного оборудования и штатным составом работников (в первоочередной перечень должны войти лаборатории: грунтоведения, дорожного материаловедения, испытания асфальтобетонов и дорожных битумов, геодезии/геоинформационных систем/цифровых технологий);

- укомплектованной оборудованием дорожной лаборатории;

- снабженной полным комплектом оборудования лаборатории по обследованию/мониторингу автомобильных дорог;

- дорожно-строительной техники для обучения и практики студентов в рамках второго модуля «Базовый специалитет» (рис. 1);

- строительство автодрома, экспериментальных и промышленных натуральных полигонов по исследованию и испытанию материалов, технологий и дорожно-строительной

техники, что особенно актуально для природно-климатических условий криолитозоны;

- обеспечение инструментальной базы и техники помещениями и ремонтной базой.

Замена весьма ограниченной учебно-лабораторной базы образовательных учреждений на производственную научно-исследовательскую – мероприятие крайне затратное. Одним из самых «бюджетных» приборов можно назвать беспилотный летательный аппарат (БПЛА) профессионального уровня, необходимый для обучения студентов цифровым технологиям и приобретения практических навыков по дистанционному зондированию и оцифровке автодорог, созданию цифровых моделей местности, мониторингу состояния, построению 3D моделей, созданию баз автоматизированного управления дорожным движением и автоматизированного проектирования. Стоимость только самого БПЛА колеблется в пределах 2–3 млн рублей, не принимая во внимание программное и компьютерное обеспечение. Стоимость передвижной лаборатории по обследованию состояния автомобильных дорог в полной комплектации по данным 2022 года составляет 27 млн рублей. Лаборатория по испытанию асфальтобетонов, укомплектованная в соответствии с новыми нормативными требованиями, стоит порядка 16–18 млн рублей. Даже по этим трем позициям суммарный объем финансирования превышает бюджетные средства, предназначенные на годовое содержание одного факультета федерального вуза.

Предложения по организационной схеме синхронизированного обучения

На основе проведенного анализа становится очевидным наличие определенного, не совсем естественного противоречия. Образовательные учреждения даже федерального уровня, обладая лицензией на проведение обучения и кадровым потенциалом, не могут обеспечить проведение систематических научных исследований и качественную подготовку кадров, имеющих практические навыки и дорожные специальности, из-за отсутствия необходимого оборудования, что связано, в первую очередь, с отсутствием финансовых средств. Производственные же предприятия, имея в своем распоряжении и технику, и финансовые средства, не имеют ни прав, ни временных возможностей повышать квалификацию студентов-практикантов выше уровня дорожного рабочего.

Объединение возможностей и потенциала образовательных учреждений и дорожно-строительных предприятий (читай – Министерства науки и высшего образования и Министерства транспорта Российской Федерации и его региональных учреждений) можно осуществить на уровне создания уже известных структур – научно-образовательных центров (НОЦ).

Одним из возможных комплексных решений значительной части существующих проблем может стать создание нескольких (в соответствии с имеющимся дорожно-климатическим зонированием Российской Федерации) Межведомственных научно-образовательных центров регионального значения (МНОЦ).

Автодорожный факультет Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова представляет собой уникальную площадку для создания МНОЦ по первой дорожно-климатической зоне. Это заключение основывается на следующих особенностях учебного подразделения:

- локализация образовательного подразделения дорожно-строительного профиля на территории распространения многолетнемерзлых пород (по уникальности локализации – единственное в России);

- наличие лицензии на образовательную деятельность, аккредитации действующих в настоящее время программ бакалавриата, специалитета и магистратуры по направлению «дорожное строительство»;

- наличие профессорско-преподавательских кадров, обладающих не только уникальными знаниями и опытом преподавания дисциплин с учетом экстремальных условий Крайнего Севера, но и имеющих практический опыт работы и организации технологических процессов в условиях криолитозоны;

- факультет располагает инфраструктурными объектами и лабораторной базой, включая два автодрома, натурный испытательный полигон площадью 72 гектара, разнообразные тренажеры, автопарк легковых автомобилей, автобус, дорожную технику (асфальтоукладчик, грейдер, трактор, фронтальный автопогрузчик, мини-погрузчик, грузовые автомобили), лаборатории геодезии, материаловедения и грунтоведения, а также полный комплект оборудования для лаборатории по испытанию асфальтобетонов (лаборатория, как планируется, получит аккредитацию в 2024 году);

- кафедра «Автомобильные дороги и аэродромы» Автодорожного факультета СВФУ нахо-

дится в тесном взаимодействии, включая договорные обязательства, с большинством организаций и предприятий дорожно-строительной отрасли Республики Саха (Якутия). Отлажено научное сотрудничество с Институтом мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения РАН.

Создание Межведомственного научно-образовательного центра (МНОЦ) по первой дорожно-климатической зоне на базе Автодорожного факультета Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова позволит существенно ускорить как создание подобной структуры, так и оптимизировать затраты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная для обсуждения профессиональным сообществом схема синхронизированного обучения специальности «Автомобильные дороги и аэродромы», несмотря на кажущуюся проблематичность реализации в действующих высших учебных заведениях, на самом деле уже работает, по крайней мере, в учебных подразделениях дорожно-строительной направленности. От действующей структуры преподавания предложенная схема принципиально отличается:

- вторым модулем, представляющим собой программу бакалавриата с интегрированной в нее системой квалификаций/рабочих специальностей среднего профессионального обучения;

- системой организации и объединением разных уровней образования в единую синхронизированную программу;

- относительно более четким разделением областей профессиональной деятельности по объему знаний, полученных на каждом этапе обучения.

Наличие базовой схемы образовательного процесса дает основание для разработки федерального государственного образовательного стандарта для специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» и последующим формированием ОПОП.

Принципиальные позиции представленной схемы обучения, с учетом специфики, могут быть применены для разработки основных профессиональных образовательных программ обучения любой инженерно-технической специальности.

Предложенная организационная структура обучения – Межведомственные научно-



образовательные центры регионального значения (МНОЦ) – могут формироваться, в зависимости от поставленных перед ними задач и проблем конкретных территорий, на уровне правительств субъектов Российской Федерации или, что кажется более обоснованным, аппаратов полномочных представителей в федеральных округах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малошонов Н. Г., Щеглова И. А., Вилкова К. А., Абрамова М. О. Гендерные стереотипы и выбор инженерно-технического направления подготовки // Вопросы образования. – 2022. – № 3. – С. 149–186. EDN: KQPQHC.
2. Проблемы инженерного и социально-экономического образования в техническом ВУЗе в условиях модернизации высшего образования // Сб. трудов Международной научно-практ. конференции. Тюмень, 20–21 мая 2021 г. / Ответственный редактор С. Д. Погорелова. – Тюмень: Изд-во: Тюменский индустриальный университет. – 2021. – 616 с. EDN: ITQMBL. ISBN 978-5-9961-2732-0.
3. Tigrov, V., Tolstenko, A., Negrobova, L., Dobromyslova, O., Piminov, E. Education, work and creation: ways for developing technological education of schoolchildren in Russia. Amazonia Investiga, 2021, Vol. 10, Iss. 42, pp. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.34069/AI/2021.42.06.19>.
4. Казакова Е. С., Походзей Г. В. Техническое образование: проблемы и стереотипы // В сб.: Актуальные проблемы профессиональной сферы в современном мире. материалы IV международной научно-практ. конференции молодых ученых на иностранных языках. – 2017. – С. 66–68. EDN: YOEA3P.
5. Устюж В. В. Аспекты профессионального образования и профессионального самоопределения в трудах К. Д. Ушинского: Сб. трудов конференции. // Наследие великого русского педагога К. Д. Ушинского: материалы Всероссийской научно-практ. конференции с международным участием (Чебоксары, 18 авг. 2023 г.) / редколлегия: Ж. В. Мурзина [и др.] – Чебоксары: ИД «Среда», 2023. – С. 147–150. EDN: AQPWCF.

6. Соловьяненко О. И., Сергеева Е. А. Модернизация системы технического и профессионального образования – основа развития экономики региона: сборник трудов конференции // Кооперация и предпринимательство: состояние, проблемы и перспективы: Сб. научных трудов V Международная конференция молодых ученых, аспирантов, студентов и учащихся (Казань, 19 ноября 2021 г.) / редколлегия: Е. А. Астраханцева [и др.] – Чебоксары: ИД «Среда», 2021. – С. 195–204. EDN: KZVVZE. ISBN 978-5-907411-90-6.

7. Алисин В. В., Литвинский В. М., Пашкевич О. И. [и др.]. Развитие науки и образования: Монография. – Чебоксары: ИД «Среда», 2019. – 180 с. ISBN 978-5-6042304-7-3.

8. Григораш О. В. Современные технологии оценки эффективности работы кафедры технического вуза: Монография. – Чебоксары: ИД «Среда», 2018. – 216 с. ISBN 978-5-6040294-9-7.

9. Ерхова М. В., Шумкова Л. Г. Исследование индивидуальных мотиваторов выпускников транспортных учебных заведений // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 5. – С. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992–3252–2022–20–5–10>.

10. Федякин А. В., Медведев С. В., Танцева А. В. В авангарде транспортного образования и отраслевой науки России: к 125-летию Российского университета транспорта // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19. – № 3. – С. 104–113. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992–3252–2020–19–3–11>.

11. Смык А. Ф., Ткачева Т. М., Тимофеева Г. Ю. Опыт применения онлайн-технологий в транспортном образовании // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19. – № 1. – С. 230–245. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992–3252–2021–19–230–245>.

12. Виноградов В. В., Кочнева Л. Ф., Платонова О. А. О взаимодействии школы и вуза в рамках профильного инженерного образования // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 2. – С. 254–259. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992–3252–2019–17–2–254–259>.

13. Быстров Н. В. Совершенствование системы высшего образования в сфере дорожного хозяйства Российской Федерации // Дороги и мосты. – 2022. – № 2 (48). – С. 11–22. EDN: APERVJ.

Информация об авторах:

Панков Владимир Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, магистр управления на транспорте, доцент Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия, rankov1956@inbox.ru.

Федорова Ольга Анатольевна – старший преподаватель Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия, fedorovaon@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 05.12.2023, одобрена после рецензирования 28.12.2023, принята к публикации 09.01.2024.

От редакции. Возможно, что некоторые предложения и суждения авторов могут показаться весьма кардинальными и по меньшей мере высоко дискуссионными, но они безусловно нацелены на повышение качества подготовки специалистов, продиктованы сложившимся опытом реализации программ подготовки специалистов-дорожников, аргументированы и структурированы. Наряду с этим и кроме оценки основного содержания предложений, требуются, на взгляд редакции, обсуждение и верификация мнения авторов о всеместности и преимущественно внутренних организационных причинах перенасыщения ОПОП технических дисциплин гуманитарными, при том что важен и особенно актуален поиск взвешенного и сбалансированного подхода к роли гуманитарных дисциплин, их селективности, причем как с учетом адаптации к задачам подготовки высококвалифицированных специалистов, так и обязательно с учетом роста их актуальности при решении задач воспитательного плана в отношении обучающихся. Как представляется, некоторые заключения, в том числе в отношении роли учебно-методических подразделений, продиктованы локальными условиями и далеко не характерны, например, для транспортных вузов. Также представляется излишне пессимистичным вывод о нецелесообразности использования компетентностного подхода в условиях отмеченной потребности в принятии профессиональных стандартов в дорожной отрасли и при имеющихся в этом плане возможностях их разработки заинтересованными организациями.

При этом авторы сами неоднократно указывают в статье, что цель работы – вынести высказанные предложения на обсуждение, чему и служит данная публикация. Редакция рассматривает в этой связи на профессиональное мнение работников дорожной отрасли и специалистов высшего образования.



Развитие иноязычной коммуникативной компетенции моряков с применением тренажеров



Виктория ФИЛОНЕНКО



Вера ТЕНИЩЕВА



Анна ПОПОВА

Виктория Александровна Филоненко¹, Вера Федоровна Тенищева², Анна Викторовна Попова³

^{1, 2, 3} Государственный морской университет имени адмирала Федора Федоровича Ушакова (ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова), Новороссийск, Россия.

¹ ORCID 0000-0003-09483080; Scopus Author ID: 57983999000; РИНЦ Author ID: 710610.

² ORCID 0000-0002-8865-7861.

³ ORCID 0000-0002-6575-8598; РИНЦ Author ID: 758372.

✉ ¹ vicalexfilnov@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

В связи с высокой скоростью технического прогресса в морской отрасли, морякам необходимо постоянно совершенствовать профессиональные компетенции и не упускать из виду важные перспективы. С целью исследования опыта формирования профессиональной иноязычной компетенции морских специалистов авторы рассматривают условия применения широкого набора образовательных средств в морском университете, включая тренажеры. Обосновывается логика разработки и применения имитационного моделирования. В статье найдено отражение descriptions различных методов исследования (теоретического анализа научной литературы, анкетирования, ранжирования и сравнения, обсуждения и интервью, сбора статистических данных, констатирующего и формирующего экспериментов),

Анализ образовательного опыта через призму компетентностного подхода и результатов, полученных на разных этапах деятельности, доказывает, что эффективность развития иноязычной коммуникативной компетенции возрастает в процессе комплексного междисциплинарного подхода и применения современных высокотехнологичных средств обучения, среди которых особое место отводится тренажерам. Авторы подчеркивают необходимость соответствующего методического сопровождения, где технологический подход предполагает специальные сценарии тренажерного обучения, ситуационные алгоритмы с применением стандартных фраз ИМО, при которых учитывается множество факторов, как связанных с техническими характеристиками самих устройств, их программного обеспечения, так и ситуационной составляющей.

Ключевые слова: водный транспорт, тренажерная подготовка, иноязычная коммуникативная компетенция, конвенционная подготовка моряков

Для цитирования: Филоненко В. А., Тенищева В. Ф., Попова А. В. Развитие иноязычной коммуникативной компетенции моряков с применением тренажеров // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-13>.

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



ВВЕДЕНИЕ

По статистике, сегодня около 90 % всех грузов перевозятся морскими судами. Это доказывает высокую значимость этого транспорта в мировой экономике. Для обеспечения эффективной и бесперебойной работы практически все процедуры на борту судов регулируются. Существуют международные конвенции и национальные кодексы, система управления безопасностью судов, инструкции и руководства, содержащие нормы и правила, статьи, положения и приложения. Крайне важно соблюдать все их в целом и отдельные из них при определенных обстоятельствах.

Работать в международной морской индустрии означает быть дисциплинированным и компетентным, что жизненно важно, поскольку любое судно мгновенно может стать опасным, если персонал не будет соблюдать все обязательные процедуры. Есть много факторов, которые необходимо постоянно контролировать, особенно в навигации. Это могут быть как внешние обстоятельства, так и те, что связаны с судном: погодная и навигационная обстановка, тип груза, полученная информация с берега или других судов, находящихся поблизости, условия работы различного оборудования, выполняемые внешние и внутренние процедуры и т.д.

Подготовка любого специалиста направлена на формирование определенного набора компетенций, для работы по специальности. В работе выполняется анализ конструктивных подходов и определение ведущих тенденций становления и развития профессиональных компетенций [1, С. 250–251]. Применяемые в морском университете карты компетенций основаны на международных и государственных требованиях, обозначенных в конвенции ПДНВ¹ и в государственных образовательных стандартах. Все компетенции учтены, распределены и обозначены в учебно-методических комплексах отдельных дисциплин. Таким образом, каждая дисциплина направлена на формирование набора определенных компетенций. Из них выделяются общие и профессиональные, уточняется их содержание и планируемые результаты освоения дисциплин. Идентификаторы конкретизируют описание набора нужных компетенций через набор знаний умений и опыта, а также, поведенческие индикаторы, которые можно отследить и оценить. Спецификация минимальных требований отражает разные уровни подготовки, должности и специальности. Уточняется компетентность через обозначенные знания, понимание и профессионализм. Представленные методы демонстрации компетенции дополнены критериями

¹ Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. Часть 3–1 – Принципы, которые необходимо соблюдать при несении навигационной вахты. ИМО (2021). [Электронный ресурс]: <https://www.imo.org>. Доступ 23.03.2023.

для их оценки. На их базе разрабатываются фонды оценочных средств. Они содержат обширную базу тестовых материалов и заданий для промежуточной и итоговой аттестации по дисциплинам.

Компетенции тесно связаны и определяют междисциплинарные взаимодействия. Анализ цифровой образовательной среды морского университета указывает на эффективность применения междисциплинарных инновационных педагогических технологий [2]. Так, специфика «минимальных требований к компетентности вахтенных помощников судов валовой вместимостью 500 т и более» указывает на ряд компетенций, среди которых «Использование стандартных фраз ИМО (Международной морской организации) для общения на море и использование английского языка в письменной и устной форме». Это предполагает надлежащее знание английского языка, позволяющее лицу командного состава использовать навигационные карты и другие навигационные пособия, понимать метеорологическую информацию и сообщения относительно безопасности судна и его эксплуатации, поддерживать связь с другими судами, береговыми станциями и центрами СУДС (Системы управления движением судов), а также выполнять обязанности командного состава в экипаже, говорящем на разных языках, включая способность использовать и понимать «Стандартные фразы», подготовленные Международной морской организацией для эффективной коммуникации в условиях деятельности в море. «Методы демонстрации компетентности – экзамен, где оценивается деятельность выпускника после получения им практических инструкций. Критериями для оценки компетентности является умение правильно понимать и составлять навигационные пособия и сообщения на английском языке относительно безопасности судна. Специалист демонстрирует ясное и хорошо понимаемое общение на английском языке»¹.

Современные формы учебно-методической работы предполагают разработку многоуровневого дидактического электронного пакета учебно-методических и научно-исследовательских материалов [2]. Для обеспечения качественной подготовки специалистов в программе обучения / формирования компетенций должно найти отражение все многообразие коммуникативных ситуаций, а это возможно только в условиях тесного междисциплинарного сотрудничества. Так, все преподаватели кафедры иностранных языков имеют доступ к учебно-методическим комплексам и пособиям по смежным дисциплинам специального цикла. Регулярно проходят курсы подготовки и стажировки в качестве инструктора-экзаменатора, в соответствии с требованиями Международной конвенции ПДНВ (правила I/6, I/8), где в условиях тесного профессионального сотрудничества

имеют возможность обсудить как процесс обучения, так и экзаменационные процедуры на тренажерах с представителями других кафедр. Рабочий язык международной морской отрасли – английский и большинство имеющейся в распоряжении информации оформлено на английском, а исполняя свои обязанности, вахтенный помощник должен быть внимательным к любой ситуации и обстоятельствам, а также к применимым инструкциям и операциям, которые выполняются или планируются к исполнению. Существует множество источников информации, которые нужно постоянно отслеживать. «Вахтенный помощник капитана является представителем капитана и несет основную ответственность в любое время за безопасную навигацию и за соблюдение Международных правил по предотвращению столкновений судов на море»¹. Не только навигационная, но и общая внутренняя и внешняя обстановка должны быть под постоянным бдительным наблюдением и контролем.

Важной составляющей подготовки специалиста являются его умения работать с современными системами оповещения. Неся дежурство, офицер не должен упускать из виду ни одну деталь постоянного потока поступающей из разных источников информации. В любой момент офицер готов на английском языке получить и передать необходимые подробности, инструкции, обсудить навигационную ситуацию, сигналы оповещения и бедствия и т.д.

Существует ряд устройств, которые помогают вахтенному офицеру управлять безопасностью судна и учитывать множество факторов и условий. Развитая иноязычная компетенция моряка предполагает умение воспринимать и воспроизводить устную и письменную речь с применением данных устройств и/или их показаний. Электронно-картографическая навигационно-информационная система дает подробный обзор окрестностей, детализируя расстояния между объектами, до береговой линии и глубины моря, а также, навигационные предупреждения. К ней обычно подключен радар и автоматическая информационная система, предоставляющая более подробную информацию о других судах (включая их пеленги, координаты, скорость, курс, расстояния между судами). Система глобального позиционирования используется для уточнения курса и скорости судна относительно земли. Другой способ – измерить скорость с помощью лага, он позволяет более точно учитывать скорость течения. Применяются комплексно и другие средства, как гиро- и магнитный компасы, УКВ-радиостанция, курсовой самописец, различные панели (сигнальные, палубные/навигационные огни, пожарная сигнализация), эхолот, компьютер (информирующий

о работе и возможных неполадках оборудования машинного отделения), судовой компьютер, телеграф, носовые и кормовые подруливающие устройства, судовой и спутниковые телефоны, радиорубка с различным оборудованием, Инмарсат (международная морская система спутниковой связи и оповещения о бедствии), ГМССБ (Глобальная морская система связи при бедствии), электронная почта и НАВТЕКС (международная автоматизированная система оповещения) и др. Требуется знать и строго следовать правилам, предусмотренным международными конвенциями, национальным законодательством и принятым судовыми компаниями. Так, помимо вопросов безопасности судна, под контролем находится и защита окружающей среды, поскольку предотвращение загрязнений с судов, как в обычных, так и в аварийных ситуациях входит в требования ключевых конвенций отрасли.

Вахтенный офицер, таким образом, находится в условиях постоянной многозадачности и необходимости повышенного внимания к множеству факторов. Для подготовки моряка к деятельности (например, к несению вахты на мосту), необходимо, но не достаточно отработки умений и навыков работы с отдельными элементами (обмен информацией в различных ситуациях, их оценка, анализ рисков, распределение ресурсов, применение инструкций, использование систем и отдельных приборов и инструментов и др.). Интеграция комплекса компетенций с учетом иноязычной коммуникации требует поэтапной подготовки и с применением специальных средств обучения, таких, как тренажеры.

Все элементы отрабатываются на русском языке и, параллельно, на кафедре иностранных языков, на английском. Поначалу, даже при решении знакомых ситуаций, обучающиеся сталкиваются с проблемами и вынуждены преодолевать языковой барьер. Это отражается в пониженных показателях скорости принятия решений и выполнения задач, по сравнению с упражнениями на русском языке. Процесс интеграции компетенций определяет поэтапное профессиональное развитие. Комплексное формирование компетенций и тренировка навыков реализуется с применением информационных технологий вообще, лингафонного оборудования и тренажеров, в частности.

Мы предположили, что для преодоления языкового барьера при решении производственных задач на тренажере, реализации системности и повышения эффективности необходимо разработать не только специальные сценарии, но комплекс ситуационных алгоритмов с применением стандартных фраз ИМО.

Целью исследования является анализ опыта разработки и применения имитационного модели-



рования для формирования профессиональной иноязычной компетенции морских специалистов в условиях применения широкого набора образовательных средств, включая тренажеры.

МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

С опорой на опыт «процедура педагогического проектирования реализуется на уровнях: концептуальном, технологии разработки, ее реализации и уровне оценки и коррекции. Разрабатывая концепцию проекта, мы определяем функции и уровни компетенций, а также стандарты их реализации. На уровне разработки технологии анализируется ситуация, ставятся цели, определяются компетентностные задачи для исполнителя, содержание, виды учебной деятельности обучаемых, функциональные особенности предметов обучения, потенциальные возможности средств обучения, выстраивается концептуальная модель.

На следующем этапе определяются пути реализации модели, обеспечивающие успешное развитие необходимых компетенций с учетом выявленных условий. На следующем уровне проводится анализ эффективности имитационного моделирования, содержания обучения и выносятся итоговая оценка. Происходит корректировка содержания упражнений и их адаптация с учетом уровня подготовки курсантов» [3].

На различных этапах исследования использовались разные методы: теоретический анализ научной литературы, анкетирование, анализ, ранжирование и сравнение, обсуждение и интервью, сбор статистических данных, констатирующий и формирующий эксперименты и т. д.

Современное морское образование ориентировано на перспективы, отвечая на вызовы реальности, учитывает специфику управления. Чтобы работать эффективно, современные морские университеты должны соответствовать не только общим требованиям к подготовке обучающихся к профессиональной деятельности [4], но и ряду международных конвенционных правил и требований. Одним из них является применение широкого спектра учебного оборудования, в том числе судовых тренажеров, оснащенных современными информационными технологиями. Разработка учебных материалов учитывает подробные рекомендации по использованию тренажеров², которые обеспечивают различную подготовку организации деятельности на судне, в том числе, навигационной вахты в обычном и аварийном режимах работы, коммуникации, применения различных технических средств и документации, защиту окружающей среды и др. [5]. Для эффективной работы с оборудованием необходимо учитывать новейшие разработки и перспективы, анализирую-

вать и корректировать деятельность на каждом этапе, формировать качественную образовательную информационную среду не только для работы на занятиях, но и для дистанционного формата обучения и саморазвития [6]. Используемые в морском образовании тренажеры способны перенести людей в виртуальный мир с полным погружением в обстоятельства различных навигационных и погодных условий, штатных и аварийных ситуаций, где в процесс обучения максимально включены сенсорные рецепторы. Моряки должны выработать навык концентрировать внимание на выполнении задачи, несмотря на присутствие множества факторов.

Программное обеспечение позволяет устанавливать разнообразные сценарии, имитируя работу офицеров на мосту судна в условиях, когда курсант не только наблюдает окружающую картину на 360 градусов, но испытывает реальную качку в соответствии с запрограммированным уровнем шторма по шкале Бофорта. При этом доступ к реальному мостовому оборудованию, работающему в строгом соответствии с выбранным сценарием, повышает эффективность тренировок моряков. Группы курсантов, работая вместе на этом виртуальном мосту, способны совершенствовать весь спектр компетенций, поскольку им приходится выполнять свои обязанности как настоящая команда, где каждый несет ответственность и взаимодействие обеспечивается через коммуникацию, которая происходит как на мосту, между членами экипажа, так и с другими судами и берегом.

Кафедра иностранных языков Морского университета призвана готовить людей к работе в составе смешанного экипажа, используя рабочий язык индустрии – английский. Для этого разрабатываются и регулярно совершенствуются образовательные технологии и учебно-методические комплексы, направленные на развитие иноязычной профессиональной компетенции, наряду с другими, обозначенными в международной конвенции ПДНВ и в Государственных образовательных стандартах для палубного, инженерного или электротехнического персонала. «В процессе обучения профессиональному морскому английскому языку широко используются возможности существующих компьютерных тренажерных комплексов, базовых и мобильных компьютерных систем, сетевых, информационно-коммуникационных и облачных технологий» [7]. «Применяются элементы дистанционного обучения на всех этапах профессиональной подготовки курсанта, призванные обеспечить качественную обратную связь и организовать полноценное методическое обеспечение учебного процесса. Практически все виды учебной и исследовательской работы на всех этапах, от проектирования

² IMO Model Course 1.22 Ship simulator and bridge teamwork; и др.

и моделирования до представления результатов, контроля, обработки данных и внесения корректировок, выполняются с использованием компьютерных технологий» [3].

При работе с тренажерами используется комплекс методических приемов и средств специальной и базисной подготовки специалиста. Качественный контент с интегрированными техническими решениями необходим для обеспечения курсантам хорошо организованных условий работы, где программы самоорганизации курсантов дают возможность учитывать индивидуальные потребности [8].

Индивидуальный подход при обучении профессиональному владению иностранным языком проявляется через внедрение гибких образовательных программ [9], применение дистанционных образовательных технологий, актуализацию интерактивных методов обучения и самопроцессов. Электронная образовательная платформа, как обобщено, выступает средством организации также и самостоятельной работы курсантов [10, С. 221–223].

Поставленная задача разработки и применения ситуационных алгоритмов на базе стандартных фраз ИМО затронула ряд дисциплин. Технология междисциплинарного взаимодействия оказывается не только востребованной, и необходимой в иноязычной среде [11, С. 351–356], но и в современных условиях цифровой трансформации является неотъемлемой частью подготовки специалиста с высшим образованием [12, С. 48–50]. В частности, многие дисциплины морских специальностей, направленные на формирование лидерских качеств будущих моряков, развитие навыков эффективной командной работы, реализацию эффективной коммуникации в условиях работы в смешанном экипаже, а также, управление социально-трудовыми отношениями, ведутся исключительно на английском языке. Курсанты проходят лекционные и практические курсы, где в центре внимания находятся ситуации общения на судне, в условиях смешанного экипажа [13], а также, между судами и судном и берегом. Каждый курс имеет свои задачи, нацелен на формирование специфического комплекса компетенций, что определяет набор тем и специфику преподавания. Отработка коммуникативного навыка осуществляется в условиях, когда язык является не целью, но средством изучения широкого круга вопросов общения с коллегами на судне и за его пределами, персоналом береговых служб. В каждом курсе отрабатываются элементы тренажерной подготовки, как для стандартных, так и для аварийных и поисковых ситуаций, курсанты имеют доступ к разным источникам информации, в том числе, позволяющим реализовывать программу профессиональной самоорганизации,

работая с лекционными и дополнительными материалами в видео- и аудиовизуальном дистанционном формате, в образовательной среде университета [14].

Представленные курсы разбиты на блоки, которые, помимо работы в аудитории, предполагают дистанционный формат, где курсы содержат материалы лекционной презентации с аудио- и видеосопровождением, для поиска пробелов в понимании и устранения барьеров через уточнения и проработки материала в индивидуальном темпе, а также, практические и творческие задания, дополнительные материалы, судовые документы, примеры ситуационной коммуникации, ссылки на предыдущие и текущие обсуждения в дистанционном морском английском клубе, что курируется кафедрой. После прохождения каждого из блоков курсант должен пройти тестирование.

Система позволяет автоматическое создание индивидуальных тестов и предложенных вариантов ответов для каждого курсанта из банка вопросов, который регулярно пополняется. Тесты должны быть выполнены не менее чем на 80 %, чтоб курсант мог получить доступ к следующему блоку изучения дисциплины. Если нужный балл не набран, то система возвращает курсанта к предыдущему блоку.

В 2022–23 году было запущено два варианта курсов, для контрольной группы (176 чел.), с применением стандартных, отработанных методов обучения и профессионального становления и для экспериментальной группы (149 чел.). Методический материал для экспериментальной группы был дополнен специально разработанными сценариями и ситуационными алгоритмами на базе стандартных фраз ИМО, для дополнительной проработки. В обеих группах активно применялся весь комплекс технических средства обучения.

Лингафонные кабинеты, в которых проходят все практические занятия по указанным курсам, оснащены современной системой Linko-v8. Она дает возможность применять элементы тренажерной подготовки, ситуационных сценариев и алгоритмов принятия решений в диалоговом формате и индивидуально, включать курсантов в разнообразные формы деятельности, создавать диалоговое и групповое общение, использовать устную и письменную речь, контролировать развитие каждого курсанта практически во всех видах учебной деятельности, в случае необходимости своевременно вносить коррективы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе профессиональной самоорганизации, в ходе развития иноязычной компетенции, вопрос об уверенности в себе играет важную роль. Офицер на судне, будучи лидером, должен внушать



это чувство своим подчиненным и коллегам. Это связано с другими качествами, такими, как решительность, энтузиазм, добросовестность, общественная активность и, безусловно, не может существовать в отрыве от коммуникативной активности. Когда речь идет об иноязычной деятельности, решение не только учебных задач, но и преодоление собственных комплексов, становится первоочередной задачей. Частным случаем отражения уверенности в себе является положительный адекватный уровень самопритязания и самооценки.

По данным исследования, в 2022–2023 учебном году наблюдалась устойчивая тенденция положительного адекватного уровня самопритязания и самооценки в коммуникативной иноязычной деятельности (так, на этапе подготовки к включенной деятельности, положительный адекватный уровень самопритязаний и самооценки составил около 57 %, в обеих, контрольной и экспериментальной группах, в то время, как после прохождения тренажерной подготовки, деловых игр и курсов, читаемых на английском языке, 86 % курсантов экспериментальной группы и 70 % контрольной показали такой результат), где рост показателя, в большей степени, шел за счет приобретения курсантами положительного опыта применения сформированных компетенций и, как следствие, повышения уверенности в себе. При этом отмечено положительное влияние включения ситуационных алгоритмов деятельности.

Другой важный эффект применения разработанных алгоритмов, нашел отражение в полученных результатах. Промежуточный контроль, организованный в стандартных условиях, где курсанты проходят тестирование, отвечают на вопросы теории и решают ситуационные задачи с применением аналитических методов, со ссылкой на действующие документы и теоретический материал курса, не показал значительного расхождения, как в полученных баллах, так и в качестве ответов ребят из контрольной и экспериментальной групп.

Однако, при включении элементов тренажерной практики в экзаменационные испытания, было отмечено повышение скорости принятия решений и выполнения заданий на 23 % в экспериментальной группе по сравнению с контрольной.

Исследование данных показателей, основанное на решении профессиональных задач, позволяет сделать вывод в пользу роста уверенности курсантов в профессиональной компетентности в условиях квази-профессиональной деятельности, а применение разработанных ситуационных алгоритмов ускоряют выполнение заданий и повышают уверенность в себе. В ходе анкетирования все курсанты единодушно отметили эффектив-

ность занятий на тренажерах, прежде всего, в ходе отработки профессиональной коммуникации, формировании алгоритмов командной деятельности.

Анализируя полученные результаты, мы не могли не выделить техническую составляющую, как одну из важнейших и влияющих на содержание и порядок проведения любого этапа. Помимо концентрации на повышении уровня профессионального саморазвития, мы организовали открытое обсуждение в сети интернет и, по полученным результатам, подготовили анкету. В опросе в 2023 году приняли участие 160 человек. Наибольшее количество участников составили курсанты/моряки дневного отделения Морского университета. Подавляющее большинство опрошенных составляли мужчины 18–27 лет. Оценки брались в процентах и ранжировались в соответствии с их повторяемостью.

Опрос показал, что тремя наиболее популярными перспективами деловых игр с применением информационных технологий и тренажерной подготовки для курсантов являются «получение положительного опыта иноязычной профессиональной коммуникации» (30 %), «командная работа при решении профессиональных задач, возможность смены ролей» (28 %), «повышение эффективности при работе с источниками информации на английском языке, активизация аналитического потенциала» (24 %). Популярными были и другие ответы, среди которых: «активизация мыслительной деятельности на иностранном языке, без внутреннего перевода» (18 %), «развитие умения принимать решение, справляясь с тревожностью при прохождении задач на время» (15 %), «повышение реактивности» (12 %), «усиление самоконтроля, среди которых, прежде всего, самоконтроль, самоорганизация, саморазвитие и др.» (12 %). Отмечалась и поддержка преподавателей, и качественное методическое сопровождение, в том числе в сопровождающих онлайн-курсах, с доступом к широкому спектру материалов и возможностью самоконтроля, и доброжелательная атмосфера на занятиях.

При анализе потенциальных проблем и недостатков, среди тех, кто их заметил, самым популярным оказался ответ, «по курсу мало занятий» (52 %), причем это относилось к любому из представленных курсов. Другие указывали на то, что выполнять некоторые задания без ограничений во времени было бы намного легче (12 %). Другие указывали на интенсивность курса и необходимость проводить много времени дома, при подготовке к занятиям (6 %).

Данный опыт показал, что для эффективного применения технического сопровождения в ходе профессиональной подготовки моряка к работе в условиях смешанного экипажа необходим техно-

логический подход, где все элементы образовательной системы задействованы и считаются значимыми, в ранг первоочередных задач попадает налаженная коммуникация между всеми субъектами деятельности, где развитие иноязычной компетенции играет важнейшую роль. При этом, все элементы сложной междисциплинарной системы могут оказывать влияние на разработку сценариев обучения, особенно когда самоорганизация логически реализована в процедурах обучения. Таким образом, курсанты на каждом этапе чувствуют свою ответственность за процесс и результат. Применение интеграционно-модульного подхода к проектированию дидактического обеспечения профессионально ориентированного курса [15] позволяет эффективно применять технические средства обучения, задействовать широкий спектр всей системы образовательной среды университета, включая тренажерную подготовку.

Применение ситуационных алгоритмов коммуникативной деятельности с элементами стандартных фраз ИМО позволяют повысить скорость выполнения заданий и способствуют формированию положительной самооверенности, преодолению коммуникативных барьеров, особенно в стандартных ситуациях общения, которые отрабатываются согласно конвенционным требованиям.

Впервые курсантам приходится пробовать свои развитые коммуникативные навыки на иностранном языке за пределами алма-матер в ходе собеседования в круизных компаниях перед первой практикой, в результате которой отбираются лучшие для дальнейшей практики на судах, работающих в международных рейсах. Это мотивация высокого порядка стимулирует курсантов из разных стран делать все возможное, чтобы свободно говорить на морском английском языке. Так, учась в университете, ребята проводят не менее года, работая на борту реальных судов, прежде чем смогут завершить теоретическую подготовку и получить учебный диплом, на основании которого впоследствии выдается рабочий.

Эффективность программы иноязычной подготовки актуализируется и проявляется на государственных экзаменах, при организации которых применяются деловые игры на тренажерных установках, где предполагается смена вахты, составление плана проводки судна и навигация в условиях плотного трафика, где каждый имеет поставленную перед ним задачу и управляет своим судном. Судоводители должны быть внимательны к постоянному потоку поступающей информации и вызовам на связь по рации. Все участники готовы в любой момент доложить о ситуации по запросу внешней «береговой СУДС», имитируемой преподавателем на английском языке, и запросить необходимое сопровождение. Стабильные «итоговые результаты государственных экзаменов сви-

детельствуют о достаточно высоком уровне сформированности профессиональной компетентности. Курсанты справляются с поставленными перед ними задачами, а общий средний показатель устойчиво держится на уровне выше 90 %, в то время, как принято, что если он попадает в пределы от 85 % до 100 %, то это свидетельствует об эффективности обучения» [3]. Эти результаты подтверждаются и статистическими данными, полученными после собеседований курсантов на английском языке в круизных компаниях, которые, следуя положениям Конвенции о труде в морском судоходстве, проверяют квалификацию кандидатов на работу с разных сторон и в строгом соответствии с международными правилами и национальными рекомендациями.

ВЫВОДЫ

Налаженное общение является жизненно важной частью эффективности любого экипажа судна. Это абсолютное требование для безопасной навигации и всем курсантам приходится усердно работать над английским языком во время учебы в университете. Постоянное внимание к развитию профессиональной самоорганизации, гармонично включенное в процесс деятельности, позволяет стимулировать субъектную составляющую всего процесса профессионального развития, где обучение выступает важнейшим, но не единственным фактором. Тренажерная подготовка способствует активизации аналитической деятельности, что позволяет расширить возможности перспективного планирования и проектирования на этапе исследования.

Поскольку работа судовой команды невозможна без налаженного эффективного общения, особое внимание в процессе подготовки специалистов для работы в море уделяется профессиональной иноязычной компетенции. Результаты исследования подтверждают эффективность применения разнообразных средств, включая тренажеры, позволяющих перенести языковой материал из образовательной сферы в квази-профессиональную деятельность с учетом широкого спектра влияющих факторов. Проведение государственных экзаменов на тренажерах, приближенных к суровым условиям моря, показывает высокий уровень готовности курсантов к выполнению обязанностей на борту. Внедрение разработанных сценариев тренажерного обучения и ситуационных алгоритмов с применением стандартных фраз ИМО в образовательную практику позволяет повысить эффективность деятельности через преодоление коммуникативных барьеров, повышение самооверенности и скорости принятия решений и выполнения задач. Важным элементом тренажерной подготовки является преимущество применения наукоемких технологий с целью блокирования





рисков при отработке профессиональной командной работы экипажа в ситуациях потенциально опасных для окружающей среды и жизни людей, в ходе которых становится возможным своевременное получение опыта и отработка навыков принятия решений в стандартных и стрессовых ситуациях профессиональной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Копылов Ю. А., Чернышева Е. И., Алексеева И. А. [и др.]. Инновационные направления профессиональной подготовки в России и за рубежом: Коллективная монография. – Ульяновск: ИП Кеньшенская Виктория Валерьевна (издательство «Зебра»), 2024. – 540 с. ISBN 978-5-93856-797-9. EDN AANNXT.

2. Баляева С. А., Хвингия Т. Г., Калинин С. А. Повышение эффективности высшего морского образования в цифровом обществе // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 3: Педагогика и психология. – 2021. – № 1 (273). – С. 22–30. EDN: KHFRMK.

3. Филоненко В. А. Проектирование имитационных тренингов на тренажере при обучении морскому английскому языку // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 3: Педагогика и психология. – 2020. – № 2 (258). – С. 139–145. EDN: XSFALG.

4. Аванесова Т. П., Груздева Л. К., Груздев Д. Ю., Мефлех М. В. Основные требования вузов к подготовке обучающихся к профессиональной деятельности // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. – 2021. – № 1 (34). – С. 65–69. EDN: XBFJCY.

5. Олейников Б. И., Костылев И. И. Тенденции развития и современное состояние технологических тренажеров для подготовки специалистов морского и речного транспорта // Сб. трудов Всероссийской научно-практ. конференции «Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции». «Речной Форум 2019», Омск, 19–20 декабря 2019 года. – Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта», 2019. – С. 188–196. EDN: WWPPYN.

6. Тульчий В. В. Технология формирования информационной образовательной среды дистанционной профессиональной подготовки специалистов морского транспорта: Монография. – Новороссийск: Ред.-изд. отд. ФГОУ ВПО «Морская гос. акад. им. адм. Ф. Ф. Ушакова», 2011. – 122 с. EDN: QNYDBR.

7. Баляева С. А. Образовательные технологии базисной подготовки специалистов морского транспорта // Материалы международной научной конференции «Деятельностный подход к образованию в цифровом обществе», Москва, 13–14 декабря 2018 года / Факультет

психологии МГУ имени М. В. Ломоносова; Российское психологическое общество. – М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, Издательский Дом (типография), 2018. – С. 54–56. EDN: YVCYTZ.

8. Тенищева В. Ф., Филоненко В. А., Кузнецова Ю. С. Профессиональная самоорганизация в иноязычной подготовке морского специалиста // Мир науки, культуры, образования. – 2021. – № 2 (87). – С. 106–108. EDN: DJFDMJ.

9. Иблямина М. Р. Реализация индивидуальных образовательных траекторий в иноязычной подготовке специалистов водного транспорта // Актуальные решения проблем водного транспорта: Сб. материалов I Международной научно-практ. конференции, Астрахань, 28 апреля 2022 года. – Астрахань: ИП Сорокин Роман Васильевич (Издатель: Сорокин Роман Васильевич), 2022. – С. 367–372. EDN: MVIQJG.

10. Нагорнова А. Ю., Рогалева Г. И., Бобылев А. В. [и др.]. Современное высшее образование: теория и практика. – Ульяновск: ИП Кеньшенская Виктория Валерьевна (издательство «Зебра»), 2020. – 602 с. ISBN 978-5-6045070-8-7. EDN: YFZVAP.

11. Тенищева В. Ф., Кузнецова Ю. С., Цыганко Е. Н., Филоненко В. А., Петков В. А. Технология междисциплинарного взаимодействия в иноязычной среде как средство профессиональной подготовки морских специалистов // Ученые записки университета им. П. Ф. Лесгафта. – 2019. – № 3 (169). – С. 351–356. EDN: ZBOXBR.

12. Нагорнова А. Ю., Донина И. А., Задворная М. С. [и др.] Основные тенденции развития высшего образования в России и за рубежом: Коллективная монография / Отв. редакторы А. Ю. Нагорнова, Т. Б. Михеева. – Ульяновск: ИП Кеньшенская Виктория Валерьевна (издательство «Зебра»), 2022. – 316 с. ISBN 978-5-60480514-5. EDN: NVJHXP.

13. Филоненко В. А. Аналитические методы межкультурной коммуникации в практике развития профессиональных компетенций судоводителей // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. – 2017. – № 1 (18). – С. 85–88. EDN: ZEUQDB.

14. Филоненко В. А., Тенищева В. Ф., Кузнецова Ю. С., Цыганко Е. Н. 4.4. Профорентация и самоорганизация как факторы мотивации будущих моряков // Современное высшее образование: идеи, технологии, результаты. – Ульяновск: ИП Кеньшенская Виктория Валерьевна (издательство «Зебра»), 2021. – С. 388–397. EDN: DRJGHY.

15. Баляева С. А., Баляев Д. Д. Теоретические основы проектирования базовой подготовки специалистов морского флота // Перспективные исследования: теория и практика: сб. статей международной научной конференции, Калининград, 02 сентября 2023 года / Международный институт перспективных исследований имени Ломоносова. – СПб.: ООО «Международный институт перспективных исследований имени Ломоносова», 2023. – С. 18–19. EDN: JQHPDI. ●

Информация об авторах:

Филоненко Виктория Александровна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков Государственного морского университета имени адмирала Федора Федоровича Ушакова (ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова), Новороссийск, Россия, vicalexfilnov@mail.ru.

Тенищева Вера Федоровна – доктор педагогических наук, профессор кафедры иностранных языков Государственного морского университета имени адмирала Федора Федоровича Ушакова (ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова), Новороссийск, Россия, Vic-Ver@mail.ru.

Попова Анна Викторовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков Государственного морского университета имени адмирала Федора Федоровича Ушакова (ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова), Новороссийск, Россия, dmitrichenko78@list.ru.

Статья поступила в редакцию 15.03.2024, одобрена после рецензирования 19.07.2024, принята к публикации 26.07.2024.

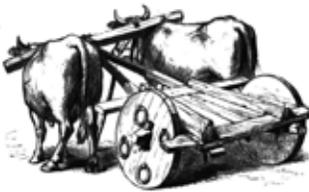
Т



ТРАНСПОРТНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ЕВРАЗИИ

124

Исторический экскурс к истокам транспортной составляющей евразийской интеграции.



КОЛЕСО ИСТОРИИ



РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ

130

Различные взгляды на обоснование и оценку необходимости расширения железнодорожной сети, представленные в публикации 1912 года.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 623.437:378:001
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-14>

Роль транспортных средств в древнейшей евразийской интеграции



Дмитрий МАЧЕРЕТ

Дмитрий Александрович Мачерет

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»); Объединенный ученый совет ОАО «РЖД»; Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

ORCID 0000-0002-1322-3030; РИНЦ Author ID: 380766.

✉ macheretda@rambler.ru.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена оценке роли транспорта в развитии и интеграции евразийского континента в древности. Проанализирована роль водного (речного и морского) транспорта в установлении связей между удаленными регионами Евразии. Отмечено, что, с учетом географических особенностей Евразии, на основе использования одного только водного транспорта ее интеграция не могла осуществиться. Сфокусировано внимание на значении сухопутных транспортных инноваций (использовании лошадей для верховой езды и появлении колесных повозок), благодаря которым в степной зоне Евразии стали пригодными для использования ранее недоступные районы и повысилась продуктивность скотоводства. Результатами стали усиление межгруппового взаимодействия и развитие интеграционных институтов, определяющих как жизнь отдельных социумов, так и взаимодействие между ними.

Новые транспортные возможности, рост пространственной мобильности, усложнение общественных институтов порождали новые социальные и материальные потребности, стимулировали миграции и развитие межрегионального обмена. При этом не просто осуществлялся обмен излишками продукции, а производство расширялось с целью увеличения обмена, становясь товарным. Все это способствовало реализации географических преимуществ Евразии и обеспечению там более высокой плотности населения и хозяйственной продуктивности использования территории по сравнению со среднемировым уровнем.

Синергетическим результатом развития водных и сухопутных транспортных средств и сообщений и основанной на их использовании дальней торговли стала трансформация Евразии к началу II тысячелетия до н.э. в единую систему взаимосвязанных культур.

Ключевые слова: транспорт, транспортные средства, торгово-транспортная деятельность, транспортные инновации, евразийская интеграция, плотность населения, экономический рост.

Для цитирования: Мачерет Д. А. Роль транспортных средств в древнейшей евразийской интеграции // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 124–129. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-14>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Евразия – крупнейший материк, занимающий почти 36 % земной суши. При этом его демографический и экономический удельный вес еще более значителен. Из оценок Э. Мэддисона [1] следует, что доля Евразии и в мировом населении, и в мировом ВВП в начале нашей эры (это – наиболее глубокие в хронологическом плане оценки) составляла почти 90 %, а в начале нынешнего века, соответственно, свыше 72 % и свыше 65 %. Таким образом, более высокие, по сравнению со среднемировым уровнем, плотность населения и экономическая продуктивность Евразии сложились уже в древности, что делает актуальным рассмотрение повлиявших на это факторов.

Дж. Даймонд объясняет изначальное успешное развитие Евразии природно-географическими факторами, в частности, ее широтной ориентацией, что облегчало распространение инноваций между схожими, находящимися на одной широте, географическими зонами [2]. Однако, хотя природно-географические факторы имеют важное значение, они недостаточны сами по себе для обеспечения успешного развития [3–5]. Поэтому необходимо анализировать и иные факторы. Учитывая, что в ряде исследований, в частности в [6–11], выявлено значимое влияние транспорта на развитие древних обществ, обоснованной задачей является оценка роли транспорта в интеграции и развитии евразийского континента в древности, на основе метода *исторического анализа*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заселение Евразии людьми современного типа завершилось еще в верхнем палеолите, около 30 тыс. лет назад, включая Арктику и острова Юго-Восточной Азии [12; 13]. Из последнего факта следует «важный вывод: материальная культура людей того времени позволила создать первые плавательные средства и с их помощью преодолевать значительные расстояния по морю» [12, С. 191].

Данные археологических раскопок на территории Воронежской области, где более 40 тыс. лет назад существовал комплекс верхнепалеолитических стоянок Костёнки, свидетельствуют об использовании «камня, который можно было найти лишь в 100–150 км от стоянки», и ракушек, которые «могли быть принесены только с черноморских берегов, расположенных на расстоянии более 500 км» [13, С. 371]. Это показывает глубокую древ-

ность элементов межрегиональной интеграции, включающих перемещение как людей, так и материальных благ. Однако они охватывали лишь соседние регионы и были фрагментарны. В условиях крайне примитивных средств передвижения [6] интеграционные процессы не могли достичь больших масштабов ни по расстоянию, ни по интенсивности.

Существенные усовершенствования транспортных средств произошли в период мезолита (X–VII тыс. до н.э.) и неолита (VII–III тыс. до н.э.), особенно в его завершающей части, в эпоху энеолита (IV–III тыс. до н.э.), когда началась обработка металлов – меди, золота, а затем и бронзы – сплава меди с мышьяком или (что давало оптимальный результат) – с оловом [4; 6; 14]. Учитывая рассредоточенность и редкость источников металлов, их значительную удаленность от древнейших хозяйственных центров с наибольшей концентрацией населения, усовершенствование средств передвижения и развитие на этой основе торгово-транспортной деятельности были *необходимыми* условиями для развития производства и использования металлов, сыгравшего ключевую роль в формировании древних цивилизаций.

Развитие водного транспорта

Прежде всего, следует отметить развитие водного (речного и морского) транспорта, обеспечивающего наибольшую провозную способность и дешевизну перевозок [15]. Не случайно, древнейшая не только в Евразии, но и в мире цивилизация – шумерская – сформировалась в Южной Месопотамии, там, где сразу две из «великих исторических рек» [16] – Тигр и Евфрат – впадали в Персидский залив, что давало шумерам возможность торговать как с регионами, находившимися в зоне тяготения Тигра и Евфрата в их северном течении, так и с регионами на берегах Персидского залива и, далее, Индийского океана. Это имело крайне важное значение, так как в Южной Месопотамии практически не было никаких полезных ископаемых (ни камня, ни металлов), а также и древесины [14]. Все это необходимо было привозить за сотни (а иногда и тысячи) километров. Так что без дальней торговли, материальной основой которой было усовершенствование транспортных средств, эта древнейшая цивилизация не могла бы существовать.

Следует отметить инновационный подход к решению проблемы обратного (порожного) перемещения речных судов, доставлявших



товары вниз по течению Тигра и Евфрата к городским центрам Месопотамии. Эти суда делали из шкур, натянутых на деревянный каркас. После выгрузки каркас продавали вместе с грузом или выбрасывали, а шкуры складывали и перевозили обратно, навьючив на ослов, чтобы использовать затем для сооружения новых лодок [15; 17]. Учитывая, что проблема порожнего перемещения транспортных средств является одной из фундаментальных для перевозочной деятельности и в наше время, ее оригинальное решение в древности является показательным примером инновационного развития транспорта.

Значение регулярных и надежных поставок сырья было для шумерской цивилизации столь велико, что уже в IV тысячелетии до н. э. были созданы шумерские фактории в Северной Месопотамии [4]. Это имело важное значение для межрегиональной интеграции.

В III тысячелетии до н. э. развитие мореплавания привело к установлению устойчивых торгово-транспортных связей Месопотамии с долиной Инда, где возникла (весьма вероятно, под влиянием этих связей) харапская цивилизация [14; 17], охватывавшая всю долину Инда (также являвшегося важной транспортной артерией) и побережье Аравийского моря [18]. Таким образом, сложилась единая торгово-транспортная система, включающая Месопотамию (вплоть до горных районов у истоков Тигра и Евфрата), регион Персидского залива, побережье Аравийского моря и долину Инда [15], в рамках которой осуществлялось устойчивое перемещение товаров, позволявшее отдельным регионам специализироваться на производстве соответствующей местным условиям продукции и вести эффективный обмен с другими регионами.

В соседнем Восточном Средиземноморье также развивалось мореплавание, чему способствовало появление в конце IV – начале III тысячелетия до н. э. длинных многovesельных лодок, вмещавших от 20 до 40 гребцов [4]. Археологические данные позволяют предположить, что с их помощью были установлены и контакты с Северным Причерноморьем.

Таким образом, благодаря развитию речного и морского транспорта в эпоху энеолита были установлены связи между весьма удаленными регионами Евразии. Там, где транспортировка по воде была недоступна, использовались вьючные ослы [15].

Торговые связи на значительные расстояния могли осуществляться не напрямую, а через посредников. Показательным приме-

ром развитой посреднической торговли является порт Дильмун, находившийся на острове в Персидском заливе и обеспечивавший торгово-транспортное взаимодействие Месопотамии с регионами Аравии и Индии [11; 19].

Однако все эти торгово-транспортные связи охватывали лишь небольшую часть евразийского континента. Большая его часть была недоступна для перечисленных транспортных средств. Не удивительно, что распространение в Европе в раннем неолите земледельческой культуры шло примерно с такой же скоростью, что и расселение верхнепалеолитических охотников-кроманьонцев примерно за 40 тыс. лет до этого [13]. Во внутриконтинентальных районах взаимодействие даже между соседними культурами развивалось довольно медленно [4].

Сухопутные инновации

Ситуация качественно изменилась после появления ряда сухопутных транспортных инноваций. Вероятно, в конце V тысячелетия до н. э. в Черноморско-Каспийских степях, где ранее была впервые одомашнена лошадь, началось использование лошадей для верховой езды [4]. Верховая езда кардинально повысила производительность труда пастухов, масштаб и эффективность скотоводства, а, соответственно, и объем производимого избыточного продукта. Увеличение стад требовало использования новых пастбищ, что было сопряжено с необходимостью урегулировать вопросы землепользования с другими родами или племенами, стимулировало расширение контактов и развитие дарообмена и «престижной» экономики – важных интегративных механизмов [20].

В середине IV тысячелетия до н. э. в Месопотамии появились колесные повозки – другая важнейшая транспортная инновация [14]. Первоначально в них запрягали быков или ослов. Через несколько веков колесные повозки распространились в Черноморско-Каспийских степях, но здесь для них уже использовалась конная тяга [4]. Появление конных повозок означало возникновение принципиально нового транспортного средства, которое стало основой сухопутного транспорта на следующие пять тысячелетий. А в то время это привело к кардинальной трансформации степных скотоводческих обществ. Синергия конных колесных повозок и верховой езды позволила перейти к мобильной (без постоянных поселений) форме скотоводства, что сделало пригодными для использования ранее недоступ-

ные (вследствие удаленности от поселений) степные районы, позволило дополнительно увеличить поголовье скота, усилило межгрупповое взаимодействие и способствовало укреплению и развитию интеграционных институтов, определяющих как жизнь отдельных социумов, так и взаимодействие между ними. (Прежде всего, следует выделить институт взаимного гостеприимства и взаимоотношения «покровитель – клиент» [4]).

Новые транспортные возможности, рост пространственной мобильности, порождавшие новые социальные и материальные потребности, усложнение общественных институтов стимулировали миграции населявших Черноморско-Каспийские степи праиндоевропейских племен как в западном, так и в восточном направлениях.

В последнем случае в степях Южного Зауралья в конце III – начале II тысячелетия до н.э. сформировались новые культуры, для которых были характерны укрепленные поселения и обработка металла «в беспрецедентных для степной зоны масштабах» [4, С. 560]. Металлургическое производство было в значительной степени экспортоориентированным. Его «запуск случился вследствие контакта с рынками городских цивилизаций [расположенных южнее – прим. авт.], но увеличение выплавки металла привело к росту его потребления в степной и лесостепной зоне, положив начало внутриевропейскому циклу обменов, который после 2100 года до н.э. привел к буму металлопроизводства в евразийских степях» [4, С. 589]. Сформировавшаяся в результате Евразийская степная металлургическая провинция распространилась «во 2-м тыс. до н.э. от бассейна Днепра до верхней Оби и от предгорий Кавказа, Памира и Тянь-Шаня ... до таежной зоны Евразии» [21, С. 514], занимая площадь до 7–8 млн км². Следует отметить наличие ее «тесных взаимопроникающих контактов с очагами Восточноазиатской и Европейской металлургических провинций» [21, С. 514].

Существует предположение, что отдельные поселения в степях Южного Урала специализировались на разведении лошадей на экспорт [4]. Это соответствует археологическим данным, в соответствии с которыми «стабильные поставки лошадей [в регионы Центральной и Передней Азии – прим. авт.] начались между 2100–2000 годами до н.э.» [4, С. 569]. Вскоре во всех регионах Ближнего Востока появились и колесницы, изобретенные в степной зоне. «Колесницы... были первым видом колесных повозок, рассчитанных на быструю езду, и эта

инновация навсегда изменила наземный транспорт. Главным элементом, который сделал возможной высокую скорость, стало колесо со спицами» [4, С. 540–541]. (Существовавшие ранее повозки имели сплошные колеса).

Благодаря реализованным в степной зоне транспортным инновациям, во II тысячелетии до н.э. «впервые в истории цепь в целом похожих культур распространилась на территории от границ Китая до... Европы. Инновации и сырьевые материалы начали перемещаться через континент» [4, С. 591]. Таким образом, произошла «трансформация Евразии из серии обособленных культур в единую, общающуюся систему» [4, С. 618], катализатором которой стало инновационное развитие транспортных средств.

Социально-экономические аспекты

Раскрыв в целом роль транспортных инноваций в евразийской интеграции в древнейший период, следует обратить внимание на ряд важных социально-экономических аспектов рассматриваемого вопроса.

Современная интерпретация взаимоотношений кочевых племен и древних государств Евразии на рубеже III и II тысячелетий до н.э., основанная на археологических данных, свидетельствует о том, что древние городские цивилизации Передней и Центральной Азии зависели от степных скотоводов [4]. Городским цивилизациям были необходимы поставки из степной зоны металлов, а затем и лошадей. При этом обитатели степей были, в основном, самодостаточны в удовлетворении своих базовых потребностей. Они производили необходимое количество мясомолочных продуктов питания (источником растительной пищи было собирательство), добывали руду и самостоятельно изготавливали металлические изделия. Однако социально-экономическое развитие приводит к появлению новых потребностей, выходящих за рамки базовых, включая потребности в товарах престижного потребления. Такие товары, например, бронзовые зеркала и полудрагоценные камни, по-видимому, ткани, а также тонкостенную керамику жители степей получали с юга, в обмен на металлы и лошадей. Так, в одном из степных поселений на территории северного Казахстана 12 % обнаруженной керамики приходилось на импортную, тонкостенную, изготовленную на юге Центральной Азии, а 88 % было продукцией местного производства [4].

Примерно в этот же период на острове Санторини в Эгейском море, который был



одним из центров минойской цивилизации, структура керамики, по данным археологических раскопок, была почти такой же: 85 % – местного производства и 15 % – привозная [22]. Можно сделать вывод, что развитие «престижной» экономики и транспортных возможностей в разных регионах Евразии к началу II тысячелетия до н.э. привело к тому, что «в ходе торговли ввозились не только такие товары, которые в данном месте не производились или не могли быть произведены в достаточном количестве..., но и товары, которые... делали более разнообразным и уточненным удовлетворение возросшего платежеспособного спроса» [22, С. 8].

Столь же показательны и одинаковы для разных регионов результаты прекращения торговых связей. Распад древнешумерской системы дальней торговли вследствие внутренних проблем в Южной Месопотамии в конце IV тысячелетия до н.э. привел к гибели майкопской культуры, процветавшей на Северном Кавказе благодаря поставкам в Месопотамию металлов в обмен на высокоценные ремесленные изделия [4]. А в начале II тысячелетия до н.э. началась деградация высокоразвитой хараппской цивилизации в долине Инда, завершившаяся ее полным упадком. К этому, по-видимому, привело сочетание разных факторов, включая экосистемную деградацию и внешние вторжения. Есть основания предполагать, что одной из наиболее важных причин стало резкое ослабление торговых связей с Месопотамией после крушения Шумера [23]. Во всяком случае, такое объяснение укладывается в парадигму реализации «эффекта выживания» на основе торгово-транспортных связей (который в полной мере проявился для хараппской цивилизации в середине III тысячелетия до н.э. благодаря началу интенсивного товарообмена с Южной Месопотамией) и упадка в случае прекращения таких связей [11].

Как же изменился евразийский мир в результате многотысячелетнего развития, стимулируемого транспортными инновациями и обменом, к началу периода древнейшей интеграции континента? Население Евразии за период с 10 000 лет до н.э. до 2000 лет до н.э., по современным оценкам, возросло в 30 раз – с 2 до 60 млн человек [24]. Другими словами, был достигнут кардинальный рост плотности населения, что являлось ключевым условием и результатом успешного социально-экономического развития [25; 26]. Хотя среднегодовой темп прироста численности населения

был невелик, всего 0,043 %, это примерно вдвое выше, чем, например, в I тысячелетии н.э. [1]. В рассматриваемую эпоху увеличение численности населения было главным результатом экономического роста (и, одновременно, стимулом для него). Почти весь прирост валового продукта в долгосрочном периоде поглощался ростом численности населения, что являлось существенной чертой господствовавшей так называемой «мальтузианской экономики» [27].

Однако, параллельно с увеличением плотности населения, временами наблюдалось и увеличение потребления на душу населения, названное «мальтузианскими сингулярностями» [28, С. 18]. Если предположить, что в среднем около 90 % прироста валового продукта поглощалось ростом населения и лишь около 10 % становилось источником роста среднедушевого потребления (т.е. подушевой валовой продукт возрастал хотя бы на 0,005 % в год – ничтожно малую величину), за восьмитысячелетний период среднедушевое потребление должно было возрасти в 1,5 раза. С учетом формирования и, к концу рассматриваемого периода, усиления социального неравенства, такой *среднедушевой* рост создавал возможность кардинального повышения благосостояния высших слоев общества, что, с одной стороны, стимулировалось развитием транспорта и торговли, а с другой, в рамках «престижной экономики», побуждало интенсифицировать дарообмен, из которого вырос товарообмен [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ показывает, что развитие в древности как водных, так и сухопутных средств передвижения сыграло важную роль в интеграции евразийского пространства и экономическом прогрессе живших там народов. Это позволило реализовать географические преимущества Евразии и обеспечить более высокую плотность населения и хозяйственную продуктивность использования территории по сравнению со среднемировым уровнем.

Такие результаты были достигнуты в значительной степени благодаря синергии ряда транспортных инноваций и развитию различных видов транспорта: речного, морского и сухопутного, что дало возможность разным по географическому положению регионам включиться в сети дальней торговли и обеспечить свою эффективную специализацию в рамках межрегионального разделения труда.

Уже в древности транспортные инновации повышали продуктивность хозяйственной деятельности, позволяя вовлекать в нее новые ресурсы и увеличивать трудоотдачу, наглядным примером чего является развитие эффективной скотоводческой экономики в евразийских степях.

При этом создавался избыточный продукт, который мог быть использован для обмена, происходило усложнение социальной организации и развитие институтов, что также стимулировало обмен. Обменивались уже не просто излишками продукции – производство расширялось с целью увеличения обмена, становясь товарным.

Таким образом были сделаны первые, но очень важные шаги на долгом пути прогрессивного развития, который привел к эпохе современного экономического роста и формированию современного общества, на всех этапах которого транспорт играл очень важную и все возрастающую роль.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Maddison, A. *Contours of the World Economy, 1–2030 AD. Essays in Macro-Economic History*. Oxford, Oxford University Press, 2007, 432 p. ISBN: 9780199227204.
2. Diamond, J. *Guns, Germs and Steel: The Fate of Human Societies*. N.Y., W. W. Norton, 1997, 480 p. ISBN 9780393038910.
3. Acemoglu, D., Robinson, J. A. *Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty*. N.Y., Crown Publishers, 2012, 544 p.
4. Энтони Д. Лошадь, колесо и язык: Как наездники бронзового века из евразийских степей сформировали современный мир / Пер. с англ. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2023. – 672 с. ISBN: 9785759825487.
5. Полтерович В. М. К общей теории социально-экономического развития. Часть 1. География, институты или культура? // Вопросы экономики. – 2018. – № 11. – С. 5–26. EDN: MGNKOT.
6. Галахов В. И. Эволюция средств передвижения. Часть 1 // Мир транспорта. – 2007. – № 4 (20). – С. 132–141. EDN: KLTQRL.
7. Галахов В. И. Эволюция средств передвижения. Часть 2 // Мир транспорта. – 2008. – № 1 (21). – С. 144–151. EDN: KDSYDB.
8. Галахов В. И. Эволюция средств передвижения. Часть 3 // Мир транспорта. – 2008. – № 2 (22). – С. 144–151. EDN: KDSYNB.
9. Мачерет Д. А. Транспортный фактор в эпоху древних цивилизаций // Мир транспорта. – 2014. – № 2 (51). – С. 230–239. EDN: SFRIKL.
10. Разуваев А. Д. История развития сухопутной транспортной инфраструктуры: техническая база и экономические аспекты. Часть 1 // Мир транспорта. – 2021. –

Т. 19. – № 6 (97). – С. 92–102. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-11.

11. Мачерет Д. А. Роль транспорта в формировании «эффекта выдвигания» в древних и средневековых обществах // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21. – № 4 (107). – С. 112–121. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-13.

12. Зубов А. А. Колумбы каменного века. Как заселялась наша планета. – М.: АСТ-Пресс, 2012. – 288 с. ISBN 978-5-462-01198-6.

13. Марков А. В. Эволюция человека. В 2 кн. Кн. 1: Обезьяны, кости и гены. – М.: Астрель: CORPUS, 2012. – 464 с. ISBN 978-5-17-078088-4.

14. Ponting, C. *World History. A New Perspective*. London, Chatto & Windus, 2000, 944 p. ISBN 978-0701168346.

15. Bernstein, W. J. *A Splendid Exchange: How Trade Shaped the World*. Atlantic Monthly Press, 2008, 494 p. ISBN 9780871139795.

16. Мечников Л. И. Цивилизация и великие исторические реки. – М.: Айрис-пресс, 2013. – 236 с. ISBN 978-5-8112-5112-4.

17. Paine, L. *The Sea and Civilization. A Maritime History of the World*. N.Y., Vintage Books, 2015, 800 p. ISBN 978-1101970355.

18. Атлас всемирной истории / Пер. с англ. Афанасьев С. Д., Климова О. И., Позднякова Н. А. – М.: Астрель, АСТ, 2004. – 480 с. ISBN 978-5-17-020573-8.

19. Бадак А. Н., Войнич И. Е., Волчек Н. М. [и др.]. *Всемирная история: В 24 т. Т. 1. Каменный век*. – Мн.: Литература, 1997. – 528 с. ISBN 985-6274-25-7.

20. Семенов Ю. И. Происхождение и развитие экономики: От первобытного коммунизма к обществам с частной собственностью, классами и государством (древневосточному, античному и феодальному). – М.: КРАСАНД, 2014. – 720 с. ISBN 978-5-396-00584-6.

21. Евразийская степная металлургическая провинция // Большая Российская энциклопедия. – Т. 7. – М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 2007. – С. 514–516. EDN: MGZOAH.

22. Мачерет Д. А. Будущее транспорта в контексте мегаэкономических изменений // Мир транспорта. – 2014. – № 6 (55). – С. 6–13. EDN: TCUSLJ.

23. Васильев Л. С. Всеобщая история. В 6 т. Т. 1. Древний Восток и античность. – М.: Высшая школа, 2007. – 447 с. ISBN 978-5-98227-850-0.

24. Sachs, D. *The Ages of Globalization: Geography, Technology, and Institutions*. N.Y., Columbia University Press, 2020, 280 p. ISBN 978-0231193740.

25. Мачерет Д. А. Роль плотности, мобильности населения и перемещения материальных благ в разных концепциях экономического роста // Вопросы теоретической экономики. – 2021. – № 4 (13). – С. 50–78. DOI: 10.52342/2587-7666VTE_2021_4_50_78.

26. Galor, O. *The Journey of Humanity: The Origins of Wealth and Inequality*. N.Y., Dutton, Penguin Publishing Group, 2022, 304 p. ISBN 978-0593185995.

27. Кларк Г. Прощай, нищета! Краткая экономическая история мира / Пер. с англ. – М.: Издательство Института Гайдара, 2012. – 544 с. ISBN 978-5-93255-338-1.

28. Кембриджская история капитализма. Том 1. Подъем капитализма: от древних истоков до 1848 года / Пер. с англ. – М.: Издательство Института Гайдара, 2021. – 800 с. ISBN 978-5-93255-606-1. ●

Информация об авторе:

Мачерет Дмитрий Александрович – доктор экономических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), первый заместитель председателя Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, macheretda@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024, одобрена после рецензирования 20.02.2024, принята к публикации 01.03.2024.





К обзору печати

«Протяжение и срок постройки необходимых железных дорог» (публикация 1912 года в журнале «Железнодорожное дело»)



Пресс-архив

Журнал «Железнодорожное дело» опубликовал в 1912 году материал, представляющий собой, по сути, изложение сложившихся в то время подходов к целесообразности и темпам дальнейшего развития железнодорожной сети, в том числе, к их равномерности, а также и, в современных терминах, к транспортной связанности территории страны, социально-экономическим эффектам ее повышения, источникам инвестиций. Были представлены три точки зрения – председателя Высшей Комиссии по исследованию железнодорожного дела, его оставшегося неизвестным, но, видимо, обладавшим авторитетным мнением оппонента под инициалами А. Ф. и собственно редакции журнала.

Несмотря на кардинально изменившиеся экономические условия и технологический уклад, приведшие к утере актуальности некоторых обсуждавшихся вопросов, некоторые другие принципиальные моменты в заочной дискуссии на страницах журнала с поправками на современные реалии могут представлять определенный интерес, в том числе, возможно, и в аспекте реализации современных крупных инфраструктурных проектов.

В воспроизводимом, незначительно сокращенном тексте максимально сохранены оригинальная пунктуация, лексика и сокращения, принятые в то время.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, транспортная связанность, развитие транспортной инфраструктуры, история транспорта.

«Протяжение и срок постройки необходимых железных дорог». Под таким заглавием помещена в №№ 12822 и 12823 «Нового Времени» статья Председателя Высшей Комиссии по исследованию железнодорожного дела в России Н. П. Петрова, посвященная злободневному вопросу о расширении железнодорожной сети.

«Если, при слишком большой поспешности развития сети, – говорит Н. П. Петров – население не будет достаточно увеличивать свои потребности в услугах железных дорог, и они, не получая всей необходимой им работы, не будут в состоянии сами уплачивать все проценты на свои строительные капиталы, то население будет вынуждено принять на себя уплату всей недостающей суммы процентов. Такой недочет может

составлять, по бывшим уже примерам, сотни миллионов рублей. Если, напротив, при слишком большой осторожности в постройке рельсовых путей, она будет идти медленно и протяжение путей, приходящихся на 10 000 жителей, будет увеличиваться меньше того увеличения, при котором население, с пользой для себя, могло бы доставлять дорогам необходимую им работу, то оно понесет крупную потерю в своей промышленной производительности».

Далее автор делает расчет, насколько уменьшилась бы работа дорог, выраженная в валовом доходе, если бы к 1925 году протяжение сети на 10 000 жителей было бы, например, не 6, а только 5 верст. Потеря валового дохода, оказывается, достигла бы 209 миллионов рублей. «Стоимость же произведений, которые не будут перевезены,

Благодарность: редакция выражает признательность сотрудникам библиотеки Российского университета транспорта за помощь в подготовке материала.

Для цитирования: К обзору печати «Протяжение и срок постройки необходимых железных дорог» (публикация 1912 года в журнале «Железнодорожное дело») // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 130–136. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-15>.

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

а следовательно не будут и произведены, надо – по мнению Н. П. Петрова – считать в 7 или 8 раз больше стоимости перевозки», т.е. примерно в 1 ½ миллиарда рублей.

С этой, дважды повторяемой в статье, мыслью (что не перевезено, то и не создано) согласиться нельзя. Наше возражение для наглядности приведем на следующем конкретном примере. Благодаря усовершенствованию транспорта, англичанин находит более выгодным, вместо посева хлеба в Англии, питаться хлебом, собранным в Самарских степях. Здесь мы имеем не создание нового продукта, а лишь перемещение пунктов производства. Но удешевление продукта увеличивает и спрос на него, в зависимости от чего более совершенный транспорт является фактором и создания новых продуктов. *Таким образом, железная дорога создает продукт не постольку, поскольку она его возит, а постольку, поскольку она его удешевляет.* И следовательно из перевезенного, дополнительного вследствие развития сети количества продуктов часть упадет на *вновь* созданный продукт, а часть на созданный на *взамен прежних* местах производства. Какая именно часть в том и другом случае? – едва ли кто сумеет ответить.

Переходя к определению нормы необходимого сооружения, автор исследования базируется на строительстве девяностых годов. В течение периода 1892–1900 гг. наше строительство шло наиболее ускоренным темпом, а именно: ежегодно на 10000 жителей происходило увеличение сети Европейской России на 0,14 вер., достигнув к 1900 году 3,61 версты.

Эту норму роста в 0,14 верст Н. П. Петров считает необходимым и безопасным допустить и на будущее время. Но развитие путей ежегодным увеличением нормы более, чем на 0,14 версты, может оказаться, по мнению Н. П. Петрова, делом рискованным, «если в экономической жизни Европейской России не обнаружатся какие-нибудь особенно благоприятные обстоятельства, оправдывающие риск».

Исходя из нормы в 0,14 получается, что для достижения такой обслуженности дорогами населения, которую ныне имеет Австро-Венгрия (8,9 верст на 10 тыс. жителей), Европейской России понадобится 35 лет, причем за этот период пришлось бы построить 143 тыс. верст на сумму 16 миллиардов рублей. Исследуя соотношения длины сети, ее валового дохода и роста населения¹, Н. П. Петров для периода 1888–1902 года нашел эмпирическую формулу, по которой расход жителей на оплату железнодорожных услуг

¹ Н. П. Петров. Критерий для ж. дорог и его применение. [Сноска в оригинальном тексте].

определяется следующим образом: умножить 1 р. 64 к. на число верст, приходящееся на 10000 жителей, и из полученного произведения вычесть 1 р. 39 к. По этой эмпирической формуле легко определить валовой доход будущей сети и проверить ее финансовую правоспособность.

Заметим, что формула Н. П. Петрова может быть перефразирована следующим образом: валовой доход на версту равняется 16400 р. – 13.900/l, где l число верст на 10000 жителей.

Так как ныне $l = 3,67$, то поперстный доход должен ныне равняться 16400 р. – 13900/3,67 = 12858 руб. С развитием же сети этот доход должен расти, приближаясь к своему пределу 16400 р. на версту. Но, как это известно всякому железнодорожному деятелю, и норма 12858 рублей, вообще говоря, совершенно достаточна для безубыточного существования дорог. Следовательно, дальнейшее развитие густоты сети на единицу населения должно обещать великие и богатые милости... если эмпирическую формулу экстраполировать за пределы времени наблюдения.

Вопрос, стало быть, сводится к тому, можно ли иметь уверенность, что при темпе развития сети, имевшем место в 1892–1900 годы (0,14 версты в год на 10 тыс. жителей), вновь сооружаемые линии будут оплачиваться населением по вышеприведенному (в эмпирической формуле) расчету? А если можно иметь эту уверенность, то не следует ли сверх того ожидать, что в экономической жизни страны обнаружатся такие «особо благоприятные обстоятельства», которые оправдали бы риск развития сети свыше нормы в 0,14?

На первый вопрос приходится отвечать очень осторожно. Хотя темп развития в 0,14 взят с натурой, но не приходится забывать, что он завершился впадением сети в дефицитность. Эта дефицитность имела своими причинами как удорожание эксплуатации, так и падение густоты перевозок. Увеличивавшееся непрерывно с 1890 до 1900 года число пудо-верст на версту после 1900 года изменило закон роста: словно наступило утомление в работе сети, начались сильные перебои. *Этот кризис произошел двумя годами ранее кризиса в росте сети, замедление в коем началось лишь с 1902 года*². Что касается другой причины дефицитности роста расходов, то, несмотря на значительные улучшения за последнее время в хозяйстве дорог, коэффициент эксплуатации сети Европейской России, благодаря удо-

² Факт, наглядно усматриваемый из графика, приложенного к внесенной 8 февраля 1911 года в Государ. Думу программы железнодорожных и экономических изысканий. [Сноска в оригинальном тексте].



рожанию труда и материалов, в 1910 году оказывается все еще менее благоприятным, чем в среднем за пятилетие 1895–1900 гг. (0,62 против 0,60). Итак, в *прошлом* мы не почерпаем бодрости для будущего. Обратимся к будущему непосредственно и посмотрим, не сулит ли оно нам каких-либо особо благоприятных в экономическом отношении надежд. На это хочется ответить утвердительно.

Можно ли в самом деле закрыть глаза на то, что в судьбе нашего отечества произошел громаднейший сдвиг, все последствия которого сейчас и учесть невозможно! Уже на первых порах действия нового порядка вещей была осуществлена колоссальная по своему значению реформа общинного землевладения (закон 9 ноября). Сомнений нет, что в течение сравнительно короткого времени произойдет сплошная мобилизация земельной собственности. Так называемые голодные нормы заменятся нормами трудовыми. Вместо владения, дающего использование какой-нибудь одной десятой трудовой энергии владельца, появятся владения, использующие эту энергию целиком. Этот процесс концентрации земли в руках «сильных» работников будет сопровождаться освобождением массы рабочих рук, требующих нового себе приложения. Эти, по существу, созидательные силы при известных условиях могут обратиться в силы разрушительные. Инстинкт самосохранения нации должен направить освобожденную энергию на производительное дело. Возрастание благосостояния земледельцев, как следствие концентрации ранее раздробленных свыше меры наделов, вызовет соответственный спрос на предметы обрабатывающей промышленности и потребует для нее новых кадров рабочей силы. Таким образом побуждения для усиленного и устойчивого экономического подъема страны имеются несомненные. В связи с этим обстоятельством возможно железнодорожное развитие сети не только в темпе девяностых годов, но даже еще более быстрый ход строительства не представляется неправдоподобным. Однако, не в наших средствах – предвидение точного и определенного количества верст, при постройке которых финансовые и экономические интересы будут удовлетворены наилучшим образом. Мы даже склонны допустить, что эта финансово-экономическая функция не есть функция однозначная. Разнообразие заинтересованных факторов столь огромно, а взаимодействие их столь сложно, что нет ничего невозможного в предположении, что комплекс финансово-экономических интересов будет одинаково хорошо удовлетворен как решением, напр., в 3000 верст ежегодной постройки,

так и в 4000 верст, а следовательно и всеми промежуточными.

Нам кажется, что не столь важно угадать точно эту цифру, как важно установить возможную равномерность строительства во времени. Если, например, в один строительный период строить 3000 верст в год, в другой – 4000 верст, а в третий опять 3000 верст, то это было бы великое зло. Изменения нормы неизбежны, но они не должны идти скачками, а должны быть плавными. Фронт строительный и заводской, развернутый на 4000 верст, может затем сжаться на 3000 верст лишь ценою больших экономических потрясений. Эти потрясения – того же порядка, как и последствия неурожаев. Но если мы еще не умеем отражать невзгоды, посылаемые стихиями, то от железнодорожной политики мы в праве требовать, чтобы она-то уж не посылала периодически на нашу трудовую ниву губительных засух.

А. Ф.

От редакции [журнала «Железнодорожное дело»]. Мы глубоко благодарны Председателю Высшей Комиссии по исследованию железнодорожного дела в России за постановку его выводов по вопросу о порядке будущего развития железнодорожной сети на общее обсуждение. Высокоуважаемый Николай Павлович, излагая свои соображения и выводы, остался при этом неизменно верен численным комбинациям, хотя они привели его к довольно грустному для государства заключению. Мы благодарны также и его оппоненту, г-ну А. Ф., указавшему на возможность и основательность надежд на лучшее в данном вопросе будущее и на те опасные решения, которые могут ему повредить. Государству, желающему жить и быть могущественным, а также и соседям его, следует знать, что оно и может быть могущественным во всякое, или, по крайней мере, не в очень отдаленное время.

Мы причисляем себя к тем публицистам, которыми – если судить по первому абзацу рассматриваемой, хотя и популярной, но веской статьи, – она вызвана.

Обсуждение означенного, столь важного вопроса о будущем развитии железнодорожной сети, начато было нами еще в 1882 г., и мы следили за его ростом, не переставая³. Поэтому рассчитываем, что Его Высокопревосходительство позволит нам привести некоторые соображения о существенных, по нашему мнению, пропусках в статье его, напечатанной в «Новом Времени» и трактуемой здесь.

³ Достаточно указать на №№ 5 и 6 «Жел.-дор. Дела» 1882 г. и на № 2 1906 года. [Сноска в оригинальном тексте].

1. Статья эта основана, главным образом, на численности и деятельности населения. Но государство состоит не из одного населения, но и из территории со всеми ее богатствами, данной ему Богом и трудами многих предшествовавших поколений. В «Сравнительной таблице» 1882 г. это выразилось средними величинами на один километр протяжения железных дорог: числа жителей, как и в рассматриваемой статье, но в обратном отношении, и количества квадратных километров пространства, чего нет в ней. Между тем это последнее отношение – та именно величина, по которой можно судить, в общем, о трудности подвоза местных продуктов к железной дороге и отвоза прибывших по железной дороге грузов на места потребления, – если не терять из виду, что все население имеет право и желает пользоваться железными дорогами, – и которая может освободить население от предусматриваемого статьей обвинения в недеятельности, в несоответствии нуждам железной дороги, когда эти качества его легко объясняются особою дальностью расстояния гужевой перевозки.

2. Самое понятие о неиспользовании железных дорог населением, правильное, так сказать, в кассовом отношении, едва ли столь существенно в отношении государственном, если правильно усвоенное населением положение, что железные дороги строятся и эксплуатируются для него, а не оно растет и развивается для железных дорог. Но положение это несомненно правильно. Иначе все тягости фактического занятия богатых, но отдаленных от центра государства частей его, лежали бы на переселенцах, а не на государстве, может быть даже до той поры, когда их численность и деятельность на новом месте поселения будут в точности соответствовать нуждам железной дороги. Как ни велик контраст между размерами железнодорожных сетей Северо-Американских Соединенных Штатов и нашей, но не столько абсолютной величиной своей сети эти штаты должны служить нам примером, сколько тою предупредительностью в железнодорожном строительстве, которую они проявили по отношению к своим переселенцам. Переселенцы вознаграждали их за это своими предприимчивостью и трудами. Последствиями же отсутствия такой предупредительности является совершенно нецелесообразное опоздание в занятии упомянутых частей государства, оставление их неустроенными в хозяйственном отношении и в конце концов вынужденное согласие на занятие их соседями. Примеры этому, к сожалению, имеются.

3. Трактующая статья, посвященная экономическому вопросу, разделяет Россию на две огром-

ные части, взаимно противоположные по пространству и населенности: у одной населения больше, у другой больше пространства, т. е. на Европейскую Россию с Кавказом и на все Азиатские владения, за исключением южной части Кавказа; но разделение это только географическое, и применение его в данном случае едва ли правильно. Казалось бы, что, ради однородности в отношении степени снабжения железными дорогами, следовало Архангельскую губернию, часть Вологодской и южную часть Кавказа считать наряду с Сибирью и Среднею Азиею.

Нахождение Архангельской и Вологодской губерний и южной части Кавказа в одном счете или в одной группе с прочими частями Европейской России, а не с прочими частями Азиатских владений, при раздельном расчете количества железных дорог для этих групп и при господстве в этих расчетах принципа населенности, может, очевидно, вести названные губернии к постоянному проигрышу: доли их в распределении средств на сооружение железных дорог, которые они могли бы получить по принципу пространства, должны будут поступать на усиление сети железных дорог в прочих частях Европейской России, что вовсе не желательно.

4. В трактующей статье последовательное сооружение новых железных дорог в Европейской России с Закавказьем рассчитано по пятилетиям даже до 1947 года. Такого подробного расчета для Азиатских владений в статье не приведено, а объяснено лишь, на основании принципа населенности, что к 1946 году надо к имеющимся там 10 000 верстам достроить 16 000 верст железных дорог, в предположении, что прирост населения там будет близок к приросту его в Европ. России. Но, по-видимому, в этом расчете не сосчитано происходящее перемещение населения из Европейской России в Азиатскую, которое с построением в последней новых железных дорог должно еще усилиться. Если сосчитать это перемещение населения, то окажется необходимым назначаемое на Европейскую Россию количество верст новых железных дорог убавить, а назначаемое на Азиатскую Россию с Архангельской и Вологодской губерниями можно прибавить, что, по справедливому мнению автора статьи, будет только к выгоде общего дела.

«Прежде всего потому, что перемещающееся за Урал из Европейской России население будет размещаться ближе к новым дорогам и потому будет более пользоваться ими. Во-вторых, потому, что зауральские дороги будут доставлять дорогам Европейской России новые, дополнительные и потому выгодные перевозки».



Эти слова высокоуважаемого автора совсем кстати для нашей цели способствовать сооружению железных дорог от центра к окраинам государства и в пределах этих окраин для защиты их от соседей и для разработки имеющихся там богатств. Не для соседей же предшествовавшие поколения русского народа трудились и проливали кровь, приобретая их. Такого же мнения и автор статьи:

«Эту последнюю и, конечно, самую важную необходимость, публицисты чаще всего и обсуждают. Они не ошибаются в этом, ставя ее на первое место».

5. Таким образом изложенный в трактуемой статье порядок последовательного сооружения железных дорог желательно несколько изменить, и если нет возможности вообще увеличить ассигнования на это сооружение, то увеличение ассигнования для окраин лучше основать на сокращении ассигнования для Европейской России без Архангельской и Вологодской губерний и южной части Кавказа, чем оставить окраины в их незащищенном и неустроенном состоянии...

Европейская Россия настолько снабжена железными дорогами, что начала уже переходить к спрямлению линий, к сооружению дорог прямого кратчайшего следования с выигрышем во времени нескольких часов, а это можно признать сравнительно роскошью, когда ни Якутск, ни Пржевальск, ни даже Мурман не соединены еще с центром государства рельсовым путем и говорить о соединении таким путем Камчатки с центром государства еще рано, по мнению даже Государственного Совета⁴.

6. В разбираемой статье также вовсе не дано места возможности применения, с целью сокращения расходов, других типов железных дорог, кроме русского нормального, выработанных техникой и пригодных для окраин... Отчего не распространить в Архангельской губернии тип железной дороги 3½ футовой колеи? Отчего не применить восточнее будущей магистральной линии, соединяющей Сибирь с Туркестаном, например, колею в 3 или в 2,5 фута, а в иных, наиболее трудных местах, как и в Якутской области и в Камчатке, и однорельсовую дорогу, которой верста, в Аляске, обойдется, по сообщению в газетах в 6000 рублей («Жел.-дор. Дело» 1911 г. № 27)?

И в Европейской России такие отступления от нормальной колеи имеются.

Конечно, против пересадок и перегрузок возражают многие, независимо от тех, кто требует нормальную колею во что бы то ни стало. Но

⁴ См. «Железнодорожное дело» 1908 г. №№ 15–16, стр. 68 д. [Сноска в оригинальном тексте].

могут же быть случаи, когда приходится мириться с обстоятельствами, вызывающими такие перемещения пассажиров и грузов, и не только мириться, а и предпочитать их...

Без сомнения, вопросы эти заслуживают внимания и Высшей Комиссии по исследованию железнодорожного дела в России и подробного, но скорого, изучения. VIII Отдел Технического Общества уже занимался подобными вопросами даже с участием представителей военного ведомства и мог бы оказать содействие в этом изучении.

Итак нам кажется, во-первых, что вопрос о необходимых железных дорогах, обозначенный в заглавии трактуемой статьи, представлен в ней несколько односторонне, а именно – о дорогах, необходимых населению только соответственно его доказанной приспособляемости в последнее десятилетие, а дороги, необходимые государству для народного благосостояния по богатствам их районов и в том числе в целях политических и стратегических, по-видимому, оставлены автором статьи вне соответственных подсчетов, и, во-вторых, что самое признание необходимости дорог для населения поставлено в зависимость лишь от того, доставляет ли население нужные дорогам доходы или не доставляет, т.е. от обстоятельства, вполне условного значения, по крайней мере, для первых лет эксплуатации дорог как с фактической стороны, так и с умозрительной.

Северо-Донецкая дорога, показавшая себя доходною с первого же дня по открытии на ней движения, едва ли не единственная; а заявления высших представителей государства в 1842 году против сооружения СПб-Московской, ныне Николаевской, дороги и статьи в «Московских Ведомостях» 1879 года против сооружения Екатерининской дороги, т.е. против сооружения дорог ныне много доходных, даже осуждены историей. Сравнительно недавно слышны были осуждения сооружения и Сибирской дороги, и Государ. Контроль причислял ее к убыточным, относя увеличение доходов европейских дор. от перевозки сибирских грузов к заслугам европ. дор., а не Сибирской.

Выведенная же из подсчетов пропорция сооружения новых железных дорог по 0,14 версты на каждые 10000 населения ежегодно, оставляющая малонаселенные окраины государства надолго без железных дорог или с малым лишь количеством их, не может, кажется, под влиянием объясненных нами сторонних причин, ожидать точного исполнения или обойтись без поправок, тем более необходимых, что и сам автор статьи утверждает:

«В какую бы сторону ни уклонилось сооружение экономически нужных железных дорог, в сторону ли излишка или в сторону недостатка, население подвергается огромным убыткам».

Надеемся, убыткам только по подсчетам и, в случае излишка, легко исправимым.

Исполненное здесь беглое рассмотрение метода определения протяжения и срока постройки необходимых России железных дорог, изложенного Председателем Высшей Комиссии по исследованию железнодорожного дела в России, очевидно, не сулит этому методу продолжительного срока применения без изменений. Очень сожалеем, что, вероятно, размер популярной статьи не дал возможности автору ее отнести критически к другому методу определения ресурсов на расширение сети железных дорог, впервые рекомендованному, у нас И. С. Блюхом в его специальном труде («Жел.-дор. Дело» 1906 г. № 2, стр. 18) и повторенному в «Железнодорожном Деле» несколько раз:

«По исследованиям инженеров де-Фрейсине, Дююи и Лейга, денежные сбережения, доставляемые стране железными дорогами, оцениваются взятым от 2 до 4 раз валовым доходом железных дорог».

Мы полагаем, что эта формула применима ко всем народностям и достаточно широка, чтобы быть способною охранять население государства, которое ею воспользуется, от действительных убытков на сооружение железных дорог. Она показывает одновременно приобретаемую населением от железных дорог выгоду и способность его платить за новые услуги железных дорог. В рассмотренной же статье соображения основаны на валовом доходе, взятом лишь один раз, т. е. в том только размере, в котором население уже заплатило за услуги железных дорог. Казалось бы, что поправка здесь очень проста – для первого шага достаточно предложенную статью цифру 0,14 версты на 10 000 жителей удвоить и проверить осуществимость этого тщательным образом на деле.

На это, однако, может быть сделано возражение приблизительно следующего содержания:

«В 1910 г. годовая стоимость содержания русских жел. дор. (эксплуатация и проценты на капитал) приблизилась к 1 миллиарду рублей. К великому счастью, и валовой доход близок к тому же миллиарду. Но что было бы, если бы при расходе в миллиард доходы были бы только в полмиллиарда, а дефицит – тоже в полмиллиарда – по Фрейсине, Дююи и Лей-

гу – пришлось бы разыскивать в тех косвенных сбережениях, которые население получает от жел. дорог? Очевидно, в дополнение к существующим косвенным налогам (водка, табак, керосин, промысловые свидетельства, гербовый сбор и проч.) пришлось бы взимать еще полмиллиарда! Вот здесь именно оправдалось бы положение: население для железных дорог.

Как бы ни была верна мысль, что жел. дороги вызывают прирост ценностей большой, чем их доход, но не нужно забывать, что эти добавочные ценности не даровые. Если, напр., допустить, что ныне, благодаря жел. дорогам, создающим непосредственно на миллиард ценностей, создается еще косвенно тоже на миллиард, то этот второй миллиард так же, как первый, расписан по расходным статьям соответственных предприятий: на рабочую силу, администрацию, материалы, оплату капитала, налога и проч.

Таким образом из этого дополнительного миллиарда попадает в государственные ресурсы лишь то, что было занесено предприятиями в расходную рубрику «налоги», вероятно, от 5 до 10 %. Только эту долю можно обращать на покрытие дефицитов железных дорог.

Однако, и такое употребление налоговых ресурсов скажется замедлением в усовершенствовании прочих частей государственного механизма со всеми нежелательными для общего прогресса нации последствиями. Одним словом, нельзя говорить: так как вот этот налог получен благодаря железным дорогам, то его и расходовать нужно на железные дороги. Из налогов должны в известной закономерности удовлетворяться все государственные нужды, независимо от соображений об источниках налога».

В этом возражении, независимо от указания формулой Фрейсине, Дююи и Лейга на третий и даже на четвертый миллиарды народных сбережений, заслуживают особого внимания собственно четыре места:

- 1) о миллиардном расходе при доходе в полмиллиарда;
- 2) указание на необходимость взимания нового налога как на оправдание положения, что население для жел. дорог;
- 3) указание государственных ресурсов, могущих идти на покрытие дефицитов железных дорог;
- 4) о замедлениях в усовершенствовании прочих частей государственного механизма.

Первое место имеет, очевидно, гиперболический характер, т. к. при склонности валового дохода достигнуть лишь полумиллиарда, расход в миллиард на железных дорогах совер-



шенно недопустим, а в настоящее время и невозможен, благодаря опытности управлений. Он будет предупрежден, и дефицит получится значительно меньше. Источник же для покрытия возможного дефицита указан согласно 3-му из приведенных здесь пунктов. Успех такого покрытия зависит уже от мудрости распорядителей.

Второе место в данном случае дает основание признать правильность выставленного положения, и железные дороги в этом отношении не составляют исключения среди всех потребностей государства.

Третье место, как объяснено уже, находится в соответствии с местом первым.

Наконец, четвертое место, представляющееся нам самым серьезным, ставит вопрос, каким же государственным потребностям следует давать предпочтение в удовлетворении? Мы не войдем в подробное рассмотрение этого вопроса и ограничимся нашим мнением относительно потребности государства в железных дорогах, что удовлетворительные пути сообщения всем и всему нужны и что, имея такие пути, государство может преуспевать гораздо лучше и во всех прочих отношениях. Сокращая время передвижения, такие пути увеличивают пользующимся ими, а равно и всему государству, время и средства на удовлетворения остальных жизненных и культурных потребностей. Это уже не косвенная, а прямая выгода, доставляемая населению путями сообщения, и оплата ее в том или другом размере налогами, помимо платы за проезд и провоз, не может считаться несправедливостью ни в каком отношении.

Полагаем также, что формула Фрейсине, Дюпои и Лейга соображениями нашего милого оппонента не опровергнута; но, вдобавок к ней, мы имеем еще, как бы в резерве, справедливое и интересное предложение Е. Ю. Штолля, напечатанное в «Железнодорожном Деле» 1907 г., № 42, под заглавием «Специальные налоги Министерства Путей Сообщения», к сожалению, мало обратившее на себя внимание, четыре года тому назад. Быть может, оно заслужит внимание ревнителей благоустройства в русской железнодорожной экономии теперь. Статьи этой мы здесь не повторим, а приведем лишь приписку к ней от Редакции «Железнодорожное Дело» (стр. 477):

«Основательно будет предположить, что статья эта (Е. Ю. Штолля) внушена ее почтенному автору теми воплями печати нашей о дефицитах жел. дорог, которые препятствуют сооружению новых железн. линий и дик-

туют нашему финансовому ведомству, как и Государственному контролю, постоянное урезывание ассигнований на содержание железных дорог, находящихся уже в эксплуатации. Автор указал путь, следуя которому можно было бы справедливо непосредственно покрывать и эти дефициты. Путь этот, не занимавший до сих пор наши правящие сферы, действительно, походит на открытые Петру Великому князем Ромодановским сокровенные им, добытые же царем Алексеем Михайловичем сокровища. А если к нему прибавить накопление того богатства в населении России, о котором говорится в статье «О железнодорожном строительстве в России по урокам истории» (№ 2 «Железнодорожное Дело 1906 г.») и которым оно обязано жел. дорогам, то сокровища, накопленные у нас, благодаря железным дорогам и водным путям сообщения, без сомнения, во многом, очень много раз превзойдут своим размером сокровенные князем Ромодановским сокровища. Но, конечно, указанный автором путь должен быть детально разработан теми, кто будет им заведывать».

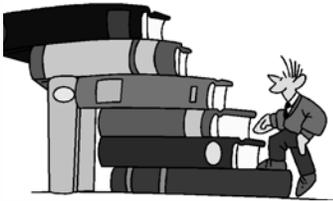
«Таким образом, на наш взгляд, нет никакого основания оплакивать неимение в России средств на поддержание и распространение железных дорог или водных путей и отказывать Министерству Путей Сообщения (как и другим ведомствам) в необходимых ему ассигнованиях, а надо лишь мудрым правителям «прибыльщикам» найти ключ к означенным средствам и, сняв с них печать забвения или неведения, установить правильное пользование ими и не страшиться их израсходования, так как они постоянно нарастают, пока население живет и работает».

Во всяком случае, наиболее удачное решение поднятого статьей высокоуважаемого Николая Павловича вопроса стоит в настоящее время не за сокровищами, не за населением и не за технической печатью, а за «прибыльщиками» новейшего строя Российского Государства. Они должны бы прежде всего отказаться от своего финансового *non possumus*⁵, а затем обратиться к ключам от сокровищ страны и дать последние ее населению в виде новых железных дорог, а также в виде всем необходимой и обеспечивающей скорый успех закономерности.

**«Железнодорожное Дело»,
1912 год, № 10–11, С. 70–74 ●**

⁵ От лат. «мы не можем», формула категорического отказа. – Прим. ред.

Т



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

138

- *Перспективная потребность в проведении путевых работ в зависимости от условий эксплуатации пути.*
- *Технология изготовления и свойства композиционных шпал (для условий Китая).*
- *Фреттинг-изнашивание вибронагруженных фланцевых соединений.*
- *Повышение энергоэффективности автономных локомотивов за счет совершенствования методов оперативных тяговых расчетов.*



КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ



НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

142

Недавно вышедшие в российских издательствах и университетах монографии, учебники и учебные пособия.



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

*Selected abstracts of D.Sc.
and Ph.D. theses submitted at Russian
transport universities*

*Полный текст в переводе на английский язык
публикуется во второй части данного выпуска.*

*English translation of the texts is published in the
second part of the issue.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-16>

Баронайте Р. А. Определение перспективной потребности в проведении путевых работ на краткосрочный и среднесрочный период в зависимости от условий эксплуатации пути / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: АО «ВНИИЖТ», 2024. – 24 с.

Усложнение условий эксплуатации, вызванное увеличением количества обрабатываемых тяжеловесных поездов, эксплуатацией локомотивов повышенной мощности, ростом плотности поездопотока, и последующая интенсификация процессов накопления расстройств пути, приводят к необходимости корректировки существующей системы технического обслуживания пути.

Согласно существующим подходам, работы по оперативному устранению возникающих расстройств проводятся на базе результатов обработки информации о фактическом состоянии пути после проходов вагонов-путеизмерителей, а планирование выправочных работ на среднесрочный период – на базе дифференцированных по критериям и классам пути срокам назначения работ. Планирование «окон» на ряде участков особо грузонапряженных линий осуществляется, в основном, в соответствии с графиком движения поездов и имеющимися ресурсами.

Целью диссертационного исследования являлась разработка научно-обоснованной системы организации и планирования выправочных работ на участках

с высокой грузонапряженностью, основанной на многовариантном прогнозе изменения показателей, характеризующих состояние пути, и уточнение порядка назначения периодичности контроля основных параметров геометрии рельсовой колеи в различных условиях эксплуатации на сети.

Экспериментальная составляющая исследований включала в себя результаты сетевого эксперимента по определению интенсивности роста амплитуд отдельных неровностей на сети железных дорог по массиву данных, полученных по результатам проходов вагонов-путеизмерителей, за двухлетний период.

Достоверность научного исследования определяется результатами статистической обработки массива данных о состоянии пути на участках с различными эксплуатационными характеристиками протяженностью более пяти тыс. км за двухлетний период наблюдений.

Обобщены результаты научных исследований по совершенствованию системы организации и планирования выправочных работ на участках с высокой грузонапряженностью, основанной на многовариантном прогнозе изменения показателей, характеризующих состояние пути.

Раскрыты закономерности накопления общих расстройств пути на различных стадиях жизненного цикла в условиях особо грузонапряженных линий и интенсивности роста амплитуд отдельных неровностей в различных условиях эксплуатации на сети.

Изложены основные положения способа двухкомпонентной статистической оценки стабильности участка пути по параметрам, одновременно распределенным по длине и во времени (по тоннажу).

Установлены закономерности изменения показателей стабильности участка пути по параметрам, распределенным по длине и во времени (пропущенному тоннажу), на базе разработанного способа.

Доказано влияние условий эксплуатации и системы организации технического обслуживания на появление и развитие общих расстройств пути.

Получены и предложены дополнительные критерии определения потребности в работах оперативного характера на основании положений теории выбросов случайных процессов с учетом темпа прироста амплитуд отдельных неровностей.

Создана методология многовариантного прогноза состояния пути на среднесрочный период в зависимости от схемы организации технического обслуживания на конкретном участке и стадии жизненного цикла пути.

Введены в нормативную документацию положения о необходимости прогноза состояния пути при определении потребности в работах по техническому обслуживанию пути и предложения по уточнению критериев назначения профилактической выправки пути на особо грузонапряженных линиях.

Разработан и введен в нормативную документацию порядок определения сроков диагностики геометрических параметров рельсовой колеи с учетом фактической интенсивности роста неровностей.

Перспективой дальнейшей разработки темы исследования является определение вариантов использования планово-предупредительной выправки в общей системе технического обслуживания пути для продления межремонтных периодов в различных условиях эксплуатации.

2.9.2. – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки).

Работа выполнена в АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), защищена в Российском университете транспорта.

Ван Чжуан. Технология изготовления и свойства материала композиционных шпал (для условий Китая) / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: РУТ, 2024. – 24 с.

Целью диссертационного исследования являлась разработка технологии изготовления и определение физико-техни-

ческих свойств материала композиционных шпал, предназначенных для эксплуатации в условиях Китая.

Научная новизна и наиболее существенные результаты проведенных исследований заключаются в установлении:

- оптимального содержания наночастиц ($\approx 1\%$ по массе) в поливинилхлориде, обусловленное протеканием двух конкурирующих процессов, связанных с упорядочиванием (за счет образования кристаллитов) и разрыхлением структуры полимера;

- влияния собственных напряжений в полимерном композите на характер разрушения и поведения его под нагрузкой с формированием блочных структур в процессе разрушения;

- свойств материала композиционной шпалы с учетом их работы в системе «земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав»;

- многоуровневого подхода (от атомно-молекулярного до макроуровня – конструкции шпалы) к управлению важнейшими свойствами материала композиционной шпалы – модулем упругости и величиной КЛТР.

Анализ работ отечественных и зарубежных ученых показал перспективность внедрения композиционных (композитных, полимерных, пластиковых) шпал на железнодорожном транспорте вследствие использования для их получения разнообразных крупнотоннажных бытовых отходов, побочных продуктов промышленности и сельского хозяйства, а в ряде стран, в частности, в Китае, и наличия местной сырьевой базы в виде быстрорастущего бамбука; при этом применение композиционных подрельсовых оснований способствует решению и ряда экологических проблем.

Установлено, что одним из основных препятствий широкому применению на железнодорожном транспорте композиционных шпал является высокий коэффициент линейного температурного расширения полимерной матрицы.

Выполнена многоуровневая модификация поливинилхлорида – матричного



полимера композиционной шпалы, на пяти структурных уровнях – атомно-молекулярном (полимерами), нано- (углеродными нанотрубками), микро- (тонкодисперсным мелом и древесной мукой), мезо- (бамбуковой фиброй) и макроуровне (стержнями из бамбука), вследствие чего достигнута величина коэффициента линейного температурного расширения $\alpha_m \leq 25,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, чем обеспечивается возможность их применения в большинстве провинций Китая.

Важнейшие физико-технические свойства разработанного материала композиционных шпал оптимального состава, определяющие их долговременную эксплуатацию в железнодорожном пути, обладают лучшими показателями, чем материал производственного состава: величина коэффициента линейного температурного расширения в 1,6 раз ниже, а водопоглощение в 7,8 раз меньше; при этом для установления последней зависимости применена новая методика определения сверхмалого водопоглощения для материалов высокой плотности, основанной на установлении изменения объема образца при его контакте с водой с применением электронной-корреляционной спекл-интерферометрии.

Бесконтактное измерение поля деформаций методом лазерной интерферометрии позволило установить блочный характер разрушения образцов материала композиционных шпал под нагрузкой, а с применением лазерной интерферометрии по разработанной методике оценки собственных напряжений показать, что пластичный характер разрушения образцов оптимального состава обусловлено снижением в нем уровня собственных напряжений; на устройства по определению бесконтактным методом лазерной интерферометрии деформаций образцов в процесс их нагружения получены патенты РФ № 2672192 и № 2710953.

Разработаны технологические схемы экструзионного (патент РФ № 2738498) и инъекционного (патент РФ № 2737711) изготовления не только композиционных шпал для железнодорожного пути различ-

ного назначения, но также мостового, переводного бруса и разработанной (патенты РФ № 2707435 и Китая № 20862218.6) инновационной конструкции композиционной шпалы, армированной бамбуковыми стержнями с регулируемой несущей способностью и пониженной (до 11 % от предельно допустимой) величиной коэффициента линейного температурного расширения. Проведенная оценка жизненного цикла композиционной шпалы подтверждает конкурентоспособность предлагаемой конструкции композиционной шпалы относительно деревянных шпал в отношении экологической устойчивости.

2.1.5. Строительные материалы и изделия.

Работа выполнена и защищена в Российском университете транспорта.

Дубинова О. Б. Фреттинг-изнашивание вибронгруженных фланцевых соединений / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2024. – 24 с.

Значительная часть оборудования и конструкций газотранспортной отрасли эксплуатируется с применением фланцевых соединений. Фланцевые соединения широко используются в установках комплексной подготовки газа, в системе магистрального транспорта, на компрессорных (КС) и газораспределительных станциях (ГРС). Увеличение объемов и скорости транспортировки газа в последнее десятилетие приводит к возрастанию количества отказов по причине разгерметизации фланцевых соединений. Согласно данным статистики, основной причиной нарушения герметичности в 40 % случаев, является высокий уровень вибрации низкой частоты, возникающий при транспортировке газового потока.

Повышение надежности и безопасной эксплуатации фланцевых соединений на объектах газового комплекса требует расширения спектра расчетных методик, позволяющих учесть негативное влияние вибрации на их отдельные элементы и соединение в целом. Таким образом,

исследования, направленные на увеличение наработки фланцевых соединений трубопроводных обвязок (ТПО) и оборудования газотранспортных систем, подверженных фреттинг-изнашиванию в условиях вибрации, являются актуальными и перспективными.

2.5.3. – Трение и износ в машинах.

Работа выполнена в Российском государственном университете нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, защищена в Ростовском государственном университете путей сообщения.

Курилкин Д. Н. Повышение энергоэффективности автономных локомотивов за счет совершенствования методов оперативных тяговых расчетов / Автореф. дис... докт. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2024. – 32 с.

Основной проблемой, решаемой в диссертационном исследовании, являлось повышение энергоэффективности автономных локомотивов за счет совершенствования методов оперативных тяговых расчетов на основе анализа текущего состояния энергетической установки по данным бортовых микропроцессорных систем управления и диагностики.

Целью исследования являлось снижение расхода топлива на тягу поездов и повышение точности тяговых расчетов за счет учета фактического состояния силовой установки автономного локомотива при определении энергооптимальных режимов ведения поезда по участку.

В результате исследования текущего состояния вопроса энергооптимального управления движением поезда установлено, что, несмотря на наличие информации о реальном техническом состоянии энергетической установки современных локомотивов, при выполнении вариантов и оптимизационных тяговых расчетов она практически не используется, что снижает точность расчетов и, как следствие, эффективность норми-

рования расхода энергоресурсов на тягу поездов и планирования перевозочной работы.

Установлено, что данные, регистрируемые микропроцессорными системами управления и диагностики современных локомотивов, позволяют определить составляющие энергетического баланса силовой цепи локомотива в различных режимах его работы и рассчитать актуальную тяговую характеристику, соответствующую текущему техническому состоянию силовой установки локомотива.

Разработан и апробирован метод определения затрат мощности на наиболее значимые вспомогательные нагрузки энергетической цепи локомотива, а именно:

- на возбуждение тягового и вспомогательного генераторов тепловозов с различными схемами узла возбуждения (2ТЭ116У и ТЭП70БС);
- на привод электрических и гидростатических мотор-вентиляторов охлаждающего устройства дизеля по данным МСУ-Т(П, Э, А);
- на привод тормозного компрессора;
- на подзарядку аккумуляторной батареи.

Разработана и апробирована методика определения потерь мощности в элементах силовой цепи тепловоза: тяговый генератор, ВУ, ТЭД, тяговый редуктор, колесная пара.

Разработан и апробирован метод определения фактического сопротивления цепи и нагрузочных характеристик ТЭД по данным МСУ-Т(П, Э, А).

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета фактической тяговой характеристики локомотива, выполнен расчет фактических тяговых характеристик тепловоза 2ТЭ116У. При апробации программного обеспечения показано, что использование фактических тяговых характеристик локомотивов позволяет более чем в два раза уменьшить ошибку определения кривой скорости и перегонного времени хода.

Разработан метод учета переходных процессов в силовой установке тепло-



воза, вызванных изменением позиции контроллера машиниста, при тяговых расчетах.

Разработан и апробирован метод многомерного поиска энергооптимальной траектории движения поезда с учетом реальных характеристик состава, прогнозируемых климатических условий и фактического состояния энергетической цепи локомотива. Установлено, что реализация энергооптимальной траектории движения поезда, найденной с использованием предложенного метода, позволяет сократить расход топлива на 5–7 % по сравнению с режимами управления, используемыми машинистами в рядовой эксплуатации.

Разработан и апробирован метод определения режимов остановочного и регулировочного торможения и методика расчета тормозных сил поезда при пнев-

матическом и электропневматическом торможении с учетом инерционности работы тормозной сети. Предложена и обоснована эмпирическая зависимость для определения коэффициента трения тормозных накладок дисковых тормозов скоростного поезда.

Научная и практическая новизна предлагаемых технических и программных решений подтверждена патентом на изобретение № 2015108825/11, свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ №№ 2022616927, 2019663752, 2019666370, 2018613898.

2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация.

Работа выполнена и защищена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

Список на английском языке публикуется во второй части данного выпуска

The list of titles in English is published in the second part of the issue

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-17>

Артяков В. В., Чурсин А. А., Островская А. А. Управление инновациями. Методологический инструментарий: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 295 с. ISBN 978-5-16-019241-3 (print).

Беляков В. В., Вахидов У. Ш., Колотилин В. Е. Движители специальных транспортно-технологических машин: Учеб. пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, 2024. – 259 с. ISBN 978-5-502-01785-5.

Бугакова Н. Ю., Грунтов А. В., Зорченко Н. К., Пельменев В. К. Дидактическая модель непрерывной профессионально-правовой подготовки курсантов в образовательном процессе морского вуза: Монография. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2024. – 109 с. ISBN 978-5-7481-0552-1.

Воробьев С. А. Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов: Учеб. пособие. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2024. – 193 с. ISBN 978-5-907804-25-8.

Гречаник А. В., Замуховский А. В., Семёнов Е. В. Проектирование и расчет рельсовой колеи: Учебно-метод. пособие. – М.: Перо, 2024. – 58 с. ISBN 978-5-00244-215-7.

Гродский В. С. Три аспекта реконструкции экономики: Монография. – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2024. – 314 с. ISBN 978-5-369-01943-6.

Дегтярёв В. С. Англо-русский морской словарь. – М.: У Никитских ворот, 2024. – 1196 с. ISBN 978-5-00246-010-6.

Дорохин Е. Г. Основы эксплуатации релейной защиты и автоматики: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 409 с. ISBN 978-5-16-019509-4.

Едимичев Д. А., Минкин А. Н., Клочков С. В. [и др.] Пожарная безопасность электроустановок: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: СФУ, 2024. – 195 с. ISBN 978-5-16-019590-2.

Иванов-Толмачев И. А., Сидраков А. А., Середов Е. А., Колмыков В. С. Особенности развития железнодорожных узлов: Учеб. пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2024. – 134 с. ISBN 978-5-6051508-5-5.

Казакова Н. А., Пермитина Л. В. ESG-концепция производственного учета и управление устойчивостью развития промышленной организации: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 250 с. ISBN 978-5-16-018717-4.

Коростовенко В. В., Медведь Н. В., Галайко А. В. Организация производственной и промышленной безопасности: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: СФУ, 2024. – 195 с. ISBN 978-5-16-019584-1.

Скубрий Е. В., Мельничук И. И., Желтенков А. В., Плешков М. Л. Инновационный механизм развития управления промышленной организацией: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 166 с. ISBN 978-5-16-019044-0.

Чурсин А. А., Абуева М. М.-С. Управление инновациями: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 330 с. ISBN 978-5-16-017566-9 (print).

Эргашев У. Э., Суслев О. А., Бегматов Н. И. Особенности укладки сварных рельсовых плетей бесстыкового пути с применением технологической оснастки навесного типа: Монография. – Уфа: Аэтерна, 2024. – 131 с. ISBN 978-5-00177-958-2.

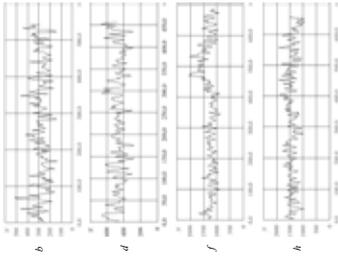
Составила Н. Олейник ●

T

TRANSPORT AND TRANSPORTATION ONTOLOGIES

144

From shaping transport and transportation ontologies through overcoming ontological information uncertainty to ontology-based management.

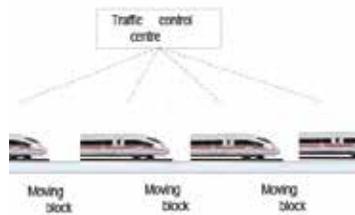


OPTIMISATION OF ROAD TRAFFIC

149

Methods of normalised range and fractal analysis while assessing monitoring data and forecasting urban traffic flows.

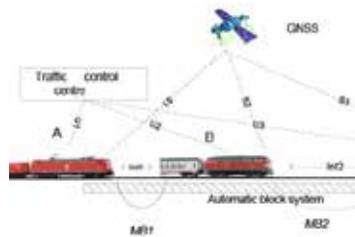
THEORY



DIGITAL RAILWAY

160

Integrated digital railway space and its relationship with information, geospatial, coordinating and coordinate spaces: multifunctionality and coherence.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-1>

Transport and Transportation Ontologies



Stanislav A. KUDZH



Nikita A. KURDYUKOV

Stanislav A. Kudzh¹, Nikita S. Kurdyukov²

^{1,2} Russian Technological University (RTU MIREA),
Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0003-1407-2788; Web of Science
Researcher ID: AAG-1319-2019; Scopus Author ID:
56521711400; Russian Science Citation Index SPIN-
code: 8173-1572; Russian Science Citation Author ID:
723257.

² ORCID 0000-0001-6784-3369; Web of Science
Researcher ID: KCY-1854-2024; Russian Science
Citation Index SPIN-code: 8535-1612; Russian Science
Citation Author ID: 1236094

✉ ¹ rektor@mirea.ru.

✉ ² nskurdyukov@gmail.com.

ABSTRACT

The objective of the study described in the article was to analyse the features of application of ontologies in the field of transport and transportation. It referred to the exploration of the methods of building ontologies as well as to the information uncertainty hampering building ontologies, based on introduced terms of «transport and transportation ontologies», «ontological management» and «ontological information uncertainty».

The main research methods comprised system, ontological, qualitative and comparative analysis.

Since the use of ontologies for transport management has been practiced for the last twenty years, the accumulated experience in that field, development of ontologies and the current state of transport infrastructure technology provide grounds for introducing the concepts of «transport and transportation ontology» and «ontological management». The approaches based on those concepts are critically important for further development of transport system, digital transport, efficient management of transport infrastructure objects. A brief

analysis of the application of ontologies in the field of transport and transportation refers also to the building of applied ontologies that embrace among others transport and transportation ontology.

The study highlights the significance of semantic relationships for building applied ontologies, describes problems of information integration and offers rationale for the use of ontological units of information for building ontologies. It is noted that since a generally shared method of building ontologies is missing, transport and transportation field is now characterised by prevalence of private ontologies, some of them are listed in the article. While highlighting labelling method to build ontologies and describing application of graph databases for modelling semantics, it is shown that building of ontologies is hindered by the diversity of information systems and by a large amount of factual data used in modern transport management that objectively entail information uncertainty, the types there-of as well as methods of their elimination being described.

Keywords: transport and transportation, management, information integration, linked geodata, attribute data uncertainty, semantic terminological network, transport and transportation ontology, ontological units of information, ontological management.

For citation: Kudzh, S. A., Kurdyukov, N. S. Transport and Transportation Ontologies. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 144–148. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-1>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The always increasing role of knowledge for modern transport management is especially characteristic of intelligent and unmanned transport [1]. This entails a growing significance of ontologies which can be considered as «transport and transportation ontologies» as a type of applied ontologies playing the role of the basis for intelligent and cyber-physical management [2]. In the technological aspect, they serve as the basis for making decisions based on experience, consequently we can introduce the concept of «ontological experience». A feature of ontological experience is a reduction in the number of options considered when making decisions in complex situations and in conditions of large amounts of data [3; 4]. To compress information when solving management problems, a model stereotype approach is used that consists in using model stereotypes that contain generalised management experience in specific situations. The use of dynamic spatio-temporal models is typical for management and control of mobile objects [5]. The use of model stereotypes requires specific information about the management situation and the state of the object. Unlike model stereotypes, metamodels contain generalisations of management experience regardless of a specific situation. They generalise management in a typological group of situations. To form metamodels, it is necessary to study groups of situations. It can be summarised that metamodels generalise theoretical experience, and model stereotypes use practical experience. Metamodels allow transition to ontologies that contain knowledge.

The *objective* of the work is to analyse the features of building and applying ontologies in the field of transport and transportation, comprising aspects of information uncertainty hampering ontology building.

RESULTS

Transport and transportation ontologies can be defined as «ontologies generalising experience in the field of transport and transportation management, including management of stationary objects».

At present, to ensure the reliability of cargo transportation, transport and transportation are now managed using ontological and architectural approaches [6] applying transport and transportation ontologies. A feature of transport and transportation ontology is that it uses existing

knowledge, helps to solve management problems and creates new spatial knowledge [7]. Among private transport and transportation ontologies, we can refer to ontologies of transportation networks (OTN) [8], which are formed as generalisation of geodata files. The private ontology of transport disruptions is also of note [9], which provides a formal structure for modelling events related to trip planning.

Development of the application of ontologies

The very first ideas of using ontology are associated with the philosophy of the ancient world. Ontologies and the system of ontologies were used to describe the existing world order [10]. In modern conditions, development of an ontological model of an enterprise at the initial stage requires formation of a glossary of terms and concepts that define the domain of activity of a specific enterprise [11], and while the term «enterprise» can be replaced by another object, for example, «cyberspace» or «transport infrastructure», the essence of the ontology construction will not change.

An ontological glossary can be considered as a systematised set of ontological units of information. Ontological units of information within transport and transportation ontology correspond to objects of the real world, comprising individuals, buildings, vehicles, railways, etc. If possible, this glossary, as the basis for ontology, should include concepts related to functioning of the transport infrastructure, comprising transport systems, technical, organisational, economic, managerial, information [12] and even cyber-spatial concepts. At the second stage, formation of ontologies requires the description or compilation of entity models formed from these concepts and related semantically. Currently, it is proposed to use the ontological approach to form semantic relationships [6].

The applied ontology or domain ontology can be considered as a technology for generalising the semantic web and a technology for generalising linked data, helping to improve the shared use or repeated use of data.

It is fully applicable to situations and management decisions in transport and transportation sphere. Thanks to digital transformation, information about entities related to transport infrastructure management can now be collected automatically. The concept of «entities» is related to the concept of «ontology», so transport and transportation ontologies can



represent knowledge in the transport domain and can use the information for digital management [13]. Transport ontologies as a type of applied ontologies are general representations of knowledge about the transport domain that define terms and relationships between them while transport and transportation ontologies are characterised by a specificity that lies in the need to generate information in real time [14].

The use of ontology to solve any management problem is based on integration of information that is carried out through various private schemes and contexts, since there is currently no general methodology [13]. The main problem of information integration for obtaining ontologies is heterogeneity of original information arrays that is because transport information is collected by different devices, sensors and systems and within application of different technologies. One of the ideas [6] of integration is based on the approach that it should be built based on standard information models and information structures. This entails the need to standardise information models and, ultimately, leads to the idea of standardised units of information or ontological units of information. Within the ontology, ontological units of information that form the entity of an enterprise are defined based on the business terms. This once again emphasises the importance of a business glossary for formation of ontologies.

Ontologies are characterised by a high level of generalisation. Due to this, ontologies are common regarding their formation. Ontology as a model is new in its provision of an unambiguous formalised information structure. As for transport and transportation ontology, it serves as a basis for structuring and integrating data and information to build a holistic management situation in which a moving object is located. A set of ontologies in digital form can serve as a tool for developing management applications based on network models which include a semantic network of terms and related data. Ontologies developed based on network models are useful for technology and strategic management specialists, as well as for academic researchers working in the field of transport, where there is a problem of forming a taxonomy of information integration methods for building ontologies.

Building of ontologies and, particularly, solving of problems of semantics organisation while working with big data, has recently involved artificial intelligence methods [3] and graph databases (GDB) that allow generalising and

compressing information, highlighting entities, effective describing and processing related geodata [3].

Ontologies are also formed using the technology called «information labelling» which includes the processes of supplementing descriptive information with empirical information: image sets, measurements received with sensors. Labelling is widely used in Petri nets and serves as a tool for process analysis which has allowed to propose, based on the labelling method, an approach to creating an automotive global ontology (AGO) [3] comprising creation of graph databases for modelling semantics in the automotive domain.

The problem of information systems.

The presence of many information systems in the transport and transportation domain does not guarantee by itself an effective transport and transportation management. Experience in implementing various systems shows that their value for the transport business is often lower than expected and, in some projects, the correlation of efficiency of transport companies with implementation of information systems [6] is traced mainly through optimisation of document flow and accountancy, and respective reduction in transaction costs. One of the conclusions drawn from the analysis of expertise is that strategically the growth in efficiency of management and activity as well as in competitiveness of transport companies depends first on coordination of the operation of implemented information systems, and ideally on the emergence of a synergistic effect from their joint use. It is a main prerequisite for a recent emergence of a basic concept of forming a single information management space for enterprises and transport facilities through enterprise architecture.

Over time, it became clear that only optimal construction of architecture is not enough for functioning of a transport enterprise. It is necessary to additionally develop methods for complementary behaviour of all parts and elements of the architecture. For this, it is necessary to use information about their entities, which inevitably leads to the use of the concepts of ontology and the need for a coordinated application of ontological and architectural approaches.

An additional feature of transport system is that the diversity of information systems leads to a variety of data formats and types. Big arrays of factual information used in modern transport management objectively contains information

uncertainty [15] which becomes an obstacle to building ontologies and should be eliminated.

Information uncertainty has different causes that can be associated with a certain attribute and thus such uncertainty can be defined as attributive information uncertainty.

For example, uncertainty in information volume is caused by the difficulties of analysing large volumes of information and replacing a complete analysis with a fragmentary one.

There is also uncertainty in diversity of information types caused by diversity of types of information models and the lack of experience of working with new types. As a result, new types or models are replaced by old ones, which entails inadequate results. This type of uncertainty is typical of multi-aspect electronic atlases [16] that can be considered as a graphical ontological glossary once they are systematised and spatial and terminological relations are consistent in it.

There is uncertainty in the fuzzy information caused by the objective situation of combination of quantitative and qualitative data, which is partially fuzzy. Such information cannot be processed without the theory of fuzzy sets.

There is also uncertainty in contradictory information [17] caused by the presence of explicit contradictory information and implicit contradictory information in the original content. To eliminate these contradictions, additional analysis is required.

There may be uncertainty in time, which is caused by the fact that a small time slot is allocated for decision-making, during which it is impossible to conduct a full analysis of the entire information array.

Reducing uncertainty requires the use of ontologies and special modelling [18]. Fuzzy or probabilistic information also demands application of ontologies and probabilistic measures [19]. Eliminating information uncertainty in contradiction requires a transition from formal logical reasoning to reasoning schemes that allow contradictions. All these schemes are included in the preprocessing of ontology building. Information uncertainty is also reduced with methods of systematisation, classification and semantic analysis. Clustering of heterogeneous information is used as a primary method [20].

Elimination of information uncertainty is of great importance in management of unmanned transport, digital railways [21], in transport cyber-physical systems [2; 22].

Elimination of uncertainty is necessary for immediate technological management and as a preliminary stage of ontology construction the use of which allows us to introduce the concept of «ontological management».

CONCLUSIONS

The experience cumulated in transport management, development of ontologies, as well as current technological pattern provide grounds for application of concepts and methodology based on «transport and transportation ontology» and «ontological management», which is essential for development of a full-fledged transportation system and modern management of transport infrastructure.

Nevertheless, currently, a single general ontology has not been created that would adequately describe cargo transportation. This problem is due to the relationship between the particular and the general, to the problems of integrating transport information from diverse sources, which increases the relevance of research in this area.

Experience shows that formation of a transport and transportation ontology should be performed in two stages. The first stage in a simple version includes compilation of an ontological glossary. In the system version, the first stage includes creation of a system of ontological units of information, which has more related terminological relations. At the second stage of creating a transport ontology, it is necessary to create a semantic network that will serve as the basis for the ontology. When creating such a network and in addition to it, it is advisable to use a graph database.

The problem of diversity of information systems in transport and transportation management requires particular attention since it often complicates management and formation of ontologies. Such a diversity creates information uncertainty, which has different causes and, accordingly, different types, within a set of which it is possible to identify a group of types of information uncertainties that hinder the normal construction of ontologies and ontological management. This group can be called «ontological uncertainty». Elimination of such ontological uncertainty is a mandatory stage of information preprocessing when forming ontologies.

Generally, from the standpoint of information management, ontologies can be considered as



a method of information compression and elimination of contradictions in the management system.

The proposed approaches to assessment of the role of transport and transportation ontologies and their construction are inherent components of a complex scientific problem and suppose systemic interdisciplinary research of a diversity of its interconnected aspects.

REFERENCES

- Dolgy, A. I., Rozenberg, I. N., Tsvetkov, V. Ya. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation. In: Proceedings of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering: MIP: Engineering-III – 2021, 29–30 April 2021, Krasnoyarsk, Russian Federation. *AIP Conference Proceedings*, 2021, Vol. 2402, Iss. 1, 050059. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0074851>.
- Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Cybernetics and Physical Systems for Transport Management. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 2 (75), pp. 138–145. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-2-13>.
- Urbietta, I., Nieto, M., García, M., Otaegui, O. Design and Implementation of an Ontology for Semantic Labeling and Testing: Automotive Global Ontology (AGO). *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, Iss. 17, 7782. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11177782>.
- Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Information Processes in Big Data Environment. *World of Transport and Transportation*, 2017, Vol. 15, Iss. 6 (73), pp. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2017-15-6-2>.
- Rosenberg, I. N., Tsvetkov V. Ya., Creation of dynamic spatio-temporal railroad control model. *Geodesy and cartography = Geodezia i Kartografija*, 2010, Iss. 71 (8), pp. 48–51. EDN: SNGVHJ.
- Dorofeev, A., Altukhova, N., Filippova, N., Pashkova, T., Ponomarev, M. Development of transportation management system with the use of ontological and architectural approaches to ensure trucking reliability. *Sustainability*, 2020, Vol. 12, Iss. 20, 8504. DOI: [10.3390/s12208504](https://doi.org/10.3390/s12208504).
- Rosenberg, I. N., Voznesenskaya, M. E. Geoknowledge and georeferencing. *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Natural Sciences*, 2010, Iss. 2, pp. 116–118. [Electronic resource]: <https://www.geocosedra.ru/jour/article/view/872>. Last accessed 13.02.2024.
- Lorenz, B., Ohlbach, H. J., Yang, L. Ontology of Transportation Networks. REVERSE Proj. Publ., 2005. [Electronic resource]: <https://www.macs.hw.ac.uk/bisel/reverse/deliverables/m18/a1-d4.pdf>. Last accessed 13.02.2024.
- Corsar, D., Markovic, M., Edwards, P., Nelson, J. D. The Transport Disruption Ontology. In: In: Arenas, M. [et al]. The Semantic Web – ISWC 2015. *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, Vol 9367, Springer, Cham, pp. 329–336. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25010-6_22.
- Dietz, J. L. G. Enterprise Ontology. Springer, Berlin, Germany, 2006, 244 p., pp. 16–83. ISBN 9783540331490.
- Negri, E., Perotti, S., Fumagalli, L., Marchet, G., Garetti, M. Modelling internal logistics systems through ontologies. *Computers in Industry*, 2017, Vol. 88, pp. 19–34. DOI: [10.1016/j.compind.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.03.004).
- Leukel, J., Kirm, S. A Supply Chain Management Approach to Logistics Ontologies in Information Systems. In: Abramowicz, W., Fensel, D. (eds). Business Information Systems. BIS 2008, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 2008, Vol. 7, pp. 95–106. DOI: [10.1007/978-3-540-79396-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79396-0_9).
- Zheng, Y., Törmä, S., Seppänen, O. A shared ontology suite for digital construction workflow. *Automation in Construction*, 2021, Vol. 132, 103930. DOI: [10.1016/j.autcon.2021.103930](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103930).
- Belyakov, S., Belyakova, M., Rozenberg, I. Approach to Real-Time Mapping, Using a Fuzzy Information Function. *Communications in Computer and Information Science*, 2013, Vol. 398, Part I, pp. 510–521. DOI: [10.1007/978-3-642-45025-9_50](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45025-9_50).
- Tsvetkov, V. Ya. Information Uncertainty and Information Certainty in Information Science. *Information technologies*, 2015, Vol. 21, Iss. 1, pp. 3–7. EDN: TGFRFH.
- Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A., Kostianoy, A. G., Gvozdik, S. A., Serykh, I. V., Krasnoperov, R. I., Sazonov, N. V., Dubchak, I. A., Popov, A. B., Kostianaia, E. A., Gvozdik, G. A. Electronic Atlas of Climatic Changes in the Western Russian Arctic in 1950–2021 as Geoinformatic Support of Railway Development. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, Iss. 9, 5278. DOI: [10.3390/app13095278](https://doi.org/10.3390/app13095278).
- Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. The contradiction between belief functions: Its description, measurement, and correction based on generalized credal sets. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2019, Vol. 112, pp. 119–139. DOI: [10.1016/j.ijar.2019.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.06.001).
- Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Modelling uncertainty with generalized credal sets: application to conjunction and decision. *International Journal of General Systems*, 2017, Vol. 47, Iss. 1, pp. 67–96. DOI: [10.1080/03081079.2017.1391805](https://doi.org/10.1080/03081079.2017.1391805).
- Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Ranking probability measures by inclusion indices in the case of unknown utility function. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2014, Vol. 13, Iss. 1, pp. 49–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10700-013-9169-6>.
- Chenhang Cui, Yazhou Ren, Jingyu Pu, Jiawei Li, Xiaorong Pu, Tianyi Wu, Yutao Shi, Lifang He. A Novel Approach for Effective Multi-View Clustering with Information-Theoretic Perspective. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2023, Vol. 36. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.13989>.
- Tsvetkov, V. Ya., Shaytura, S. V., Ordov, K. V. Digital management railway. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 2019, Vol. 105. *1st International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019)*, pp. 181–185. DOI: [10.2991/iscde-19.2019.34](https://doi.org/10.2991/iscde-19.2019.34).
- Tsvetkov, V. Ya. Control with the use of cyber-physical systems. *Perspectives of Science and Education*, 2017., Iss. 3 (27), pp. 55–60. EDN: ZCSISD. ●

Information about the authors:

Kudzh, Stanislav A., D.Sc. (Eng), Associate Professor, Rector of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia, rektor@mirea.ru.

Kurdyukov, Nikita S., Ph. D. Student at the Department of Instrumental and Application Software of the Institute of Information Technologies of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia, nskurdyukov@gmail.com.

Article received 05.08.2024, approved 19.08.2024, accepted 21.08.2024.



Features of Using the Method of Normalised Range and Fractal Analysis in Studying the Car Traffic Flow Intensity



Mikhail G. Boyarshinov

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.
ORCID: 0000-0003-4473-6776; Web of Science Researcher ID:
ACE-0166-2022; Scopus Author ID: 6506008407; Russian Science Citation
Index SPIN-code: 5958-2345; Russian Science Citation Index Author ID: 79853;
ColabID: R-38610-17352-TA830, Google Scholar: Y4AT3SUAAAAJ.
✉ mgboyarshinov@pstu.ru.*

Mikhail G. BOYARSHINOV

ABSTRACT

The relevance of studying the methods of studying traffic flows is due to the need to analyse their features, determine the allowable areas of their application in solving practical problems of the transport sector.

The objective of the work is to identify the results of application of modern methods of time series analysis that use the values of intensities of car traffic flows on the urban street-and-road network. The subject of the study is associated with the calculated Hurst and fractal dimension indices (fractal analysis), as well as with checking the validity of the quantitative relationship of these indicators, specified by B. Mandelbrot and used in applied research, on real data on intensity of car traffic flows. Digital data for the study were

obtained using «Azimuth» stationary measuring software and hardware photo and video recording complexes, located on the street-and-road network of the city.

The study has found that anomalous values of key indicators are encountered when using the normalised range method and fractal analysis: the Hurst exponent takes values outside the usually defined range, the relationship between the fractal dimension and the Hurst exponent does not fully correspond to the known B. Mandelbrot set. It seems necessary to conduct a deep and thorough study of the results obtained when using the above and, possibly, other methods for studying the intensity of traffic flows on street-and-road networks.

Keywords: traffic flow, car traffic intensity, Hurst exponent, fractal dimension, urban transport.

For citation: Boyarshinov, M. G. Features of Using the Method of Normalised Range and Fractal Analysis in Studying the Car Traffic Flow Intensity. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 149–159. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-2>.

*The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.*

INTRODUCTION

The intensity of the traffic flow as a time series (function of time), along with other random processes, belongs to a special class of elements of functional spaces which, unlike smooth (differentiable) functions, exhibit fractal properties, or self-similarity, that is, with repeated changes in the scale of variables, the structure of the function already recorded on previous scales is reproduced [1, P. 36]. To describe the special (fractal) properties of such functions, a specially defined concept of fractal, or fractional dimension of Hausdorff–Besicovitch [2, P. 22] (of Minkowski [3, P. 129]) is used.

Fractal analysis is successfully used to study self-similar stochastic processes characteristic of network traffic and data on solar flares [4], to study and predict earthquakes [5]. Modelling [6] of the multimodal distribution of porosity of oil and gas fields made it possible to identify the relationship between the fractal index and the degree of oil saturation of the soil.

Analysis of fractal properties of time series modelling real stochastic processes is provided in the work [7]. Identification of time series based on fractal analysis considering chaos is proposed in [8]. Classification of stationary, non-stationary and quasi-periodic signals was developed by the author of [9]. The works [10; 11] recommend using the critical value of fractal dimension as an indicator of the crisis state (catastrophe) of the system under consideration. According to [12], to assess the structure and influence of long-term memory of time series it is advisable to use the value of fractal dimension of functions describing phase transformations in the mechanical and physical systems under consideration.

Fractal dimension can be used to analyse quote trends and manage investment portfolios, to study and identify the dynamics of time series of financial activity indicators [13], to forecast the volatility of the oil products market [14] and to assess the significance of financial assets [15] based on the assumption [16] on the fractal nature of the market and the presence of history of market process (long-term or short-term memory).

The fractal approach [17] made it possible to optimise the shape of the bus body to reduce resistance to movement and reduce fuel consumption. Analysis [18; 19] of fractal indicators of the car traffic flow in the urban

street-and-road network (SRN), of probability distribution and correlation characteristics of traffic showed that empirical data on traffic flows correspond to fractal indicators and are satisfactorily described with their help. The study [20] found that the number of motor vehicles on the roads is largely determined not by the Poisson (simplest) process, but by factors of a fractal nature. To classify traffic flows, following their self-similarity and irregularity, it is advisable to use the hypothesis of the «multifractal» nature of the spectrum of the car traffic flow [21].

Along with the analysis of the fractal dimension, the method of normalised range is actively used, which is based on the calculation of the Hurst index. The Hurst index [22] is used to analyse the dynamics of electroencephalographic signals of patients to construct an index of healthy and abnormal brain activity. Quantitative assessment [23] of the morphological properties of the surface structures of tooth enamel based on the fractal dimension is used along with the traditionally determined index of surface roughness. The analysis of intensity of the car traffic flow in SRN of a metropolis using modern mathematical methods (statistical, wavelet and Fourier analysis, Hurst index) is described in [24–29].

For most time series generated by natural processes, direct (analytical) determination of fractal dimension is impossible, so special algorithms [30], the Hurst exponent [1, P. 348] or numerical procedures [31] must be used. The relationship between fractal dimension and the Hurst exponent has been studied in sufficient detail in the works [1, P. 353; 32–34].

The *objective* of the work is to reveal the results of modern methods of analysis of time series that use values of intensity of car traffic flows in street-and-road network obtained through an experiment with the help of measuring software and hardware systems.

DATA OBTAINED THROUGH FIELD OBSERVATIONS OF THE INTENSITY OF THE CAR TRAFFIC FLOW

Studies on characteristics of car traffic flow traditionally use the dependence of the traffic flow intensity on time [35; 36]. The intensity $N(t_i)$ of the car traffic flow at the section of the urban road network considered in the proposed study (using the city of Perm as an example) at an arbitrary time t_i was determined based on data

Table 1

Hurst exponent H and fractal dimension D of traffic flow intensity functions at sections of urban road networks [performed by the author]

№	Average intensity N , car/h	Hurst exponent H	Fractal dimension D	Pearson statistics χ^2
1	166	0,5392	1,6998	30,6
2	281	0,7330	1,6943	32,5
3	311	0,7612	1,7501	31,6
4	417	0,7433	1,7701	40,9
5	467	-0,0310	1,7259	45,4
6	599	0,0359	1,6414	325,8
7	719	0,0573	1,7081	36,7
8	830	0,0158	1,6928	3634,7
9	956	0,0085	1,6715	39,0
10	975	-0,0520	1,6823	32,0
11	1046	-0,0230	1,6801	56,3
12	1273	0,0200	1,6523	108,0
13	1377	-0,0590	1,6606	31,5
14	1398	0,0313	1,6463	71,5
15	1426	-0,0080	1,7021	31,4

received from the measuring software and hardware systems (MSHS) in real time, using the expression:

$$N(t_i) = \frac{n(t_i)}{\Delta}, \tag{1}$$

where $n(t_i)$ is number of vehicles at the entry point recorded during the time interval $[t_i - \Delta/2, t_i + \Delta/2]$, $i = \overline{1, m}$;

Δ – selected time interval;

m – total number of observation intervals.

MSHS of «Azimuth» series¹ [37] allows recognising state registration plates, measuring the speed of a vehicle in the control zone, its average speed, the time of movement between the control lines and other characteristics.

To calculate the Hurst exponents and fractal characteristics of the functions of the intensity of the car traffic flow, 15 streets of the city of Perm (Vavilova Street, Lasvinskaya Street, Podlesnaya Street, Stakhanovskaya Street, Kosmonavtov Highway, Yuzhnaya Damba and others) with different values of the average traffic intensity (Table 1) were selected.

Pic. 1 shows the dependences of the intensities of traffic flows on time, calculated according to (1), with $\Delta = 5$ min. The duration of observation of traffic flows varied from 350 to 700 minutes, during which the intensities $N(t)$ of car flows remained almost constant.

The normalised range method [1, P. 349; 24, 28] is based on the approximation of the

dimensionless R/S index with a power-law dependence of the form at^H , where a is a constant, H is the Hurst exponent (constant), t is time. Here:

$$R(M) = \max_{t_i \leq t \leq t_M} Z(t, M) - \min_{t_i \leq t \leq t_M} Z(t, M) \tag{2}$$

– the range of deviations of —

$$Z(t, M) = \sum_{i=1}^M [N(t_i) - \langle N \rangle]$$

of random values of intensity $N(t_i)$ of the car traffic flow from the average value

$$\langle N \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N(t_i); \tag{3}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [N(t_i) - \langle N \rangle]^2} \tag{4}$$

– standard deviation of the intensity $N(t_i)$ of the traffic flow.

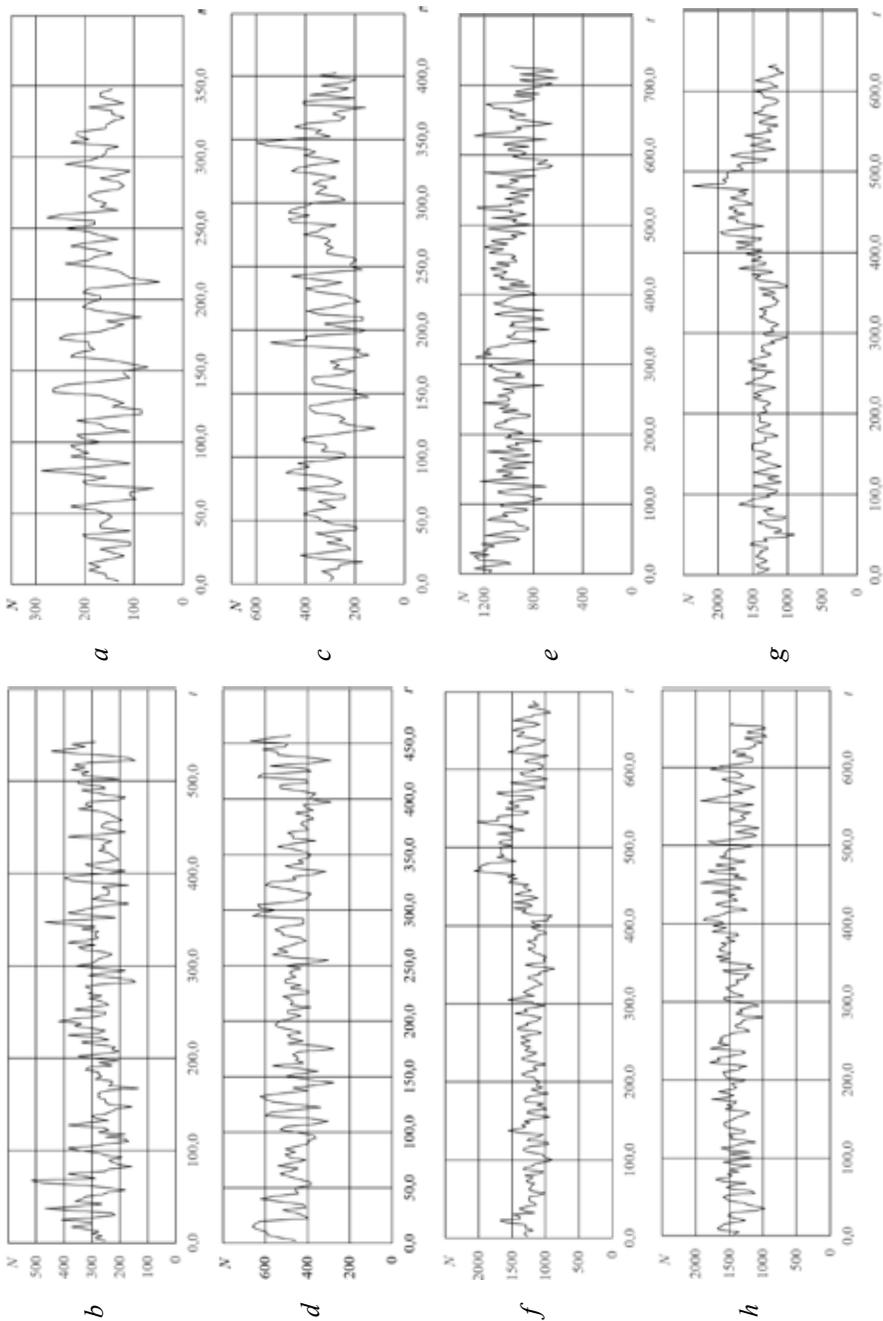
The exponent (Hurst index H) of at^H function approximating the R/S dependence allows us to identify the main types of time series behaviour [1, P. 351; 38]: when $H = 0,5$, the values of the time series are considered random, that is, the terms of the series do not exhibit a trend dependence; in other words, the history of the appearance of the «early» terms of the series does not affect the values of the subsequent ones.

When $0 \leq H < 0,5$, the time series is considered «anti-persistent», which reflects its instability.

When $0,5 < H \leq 1,0$, the observed process turns out to be «persistent», that is, it has a trend component; the history of the formation of the



¹ «Azimuth 2» MSHS. Road safety technologies. [Electronic resource]: <https://tbdd.ru/node/224>. Last accessed 11.01.2024.



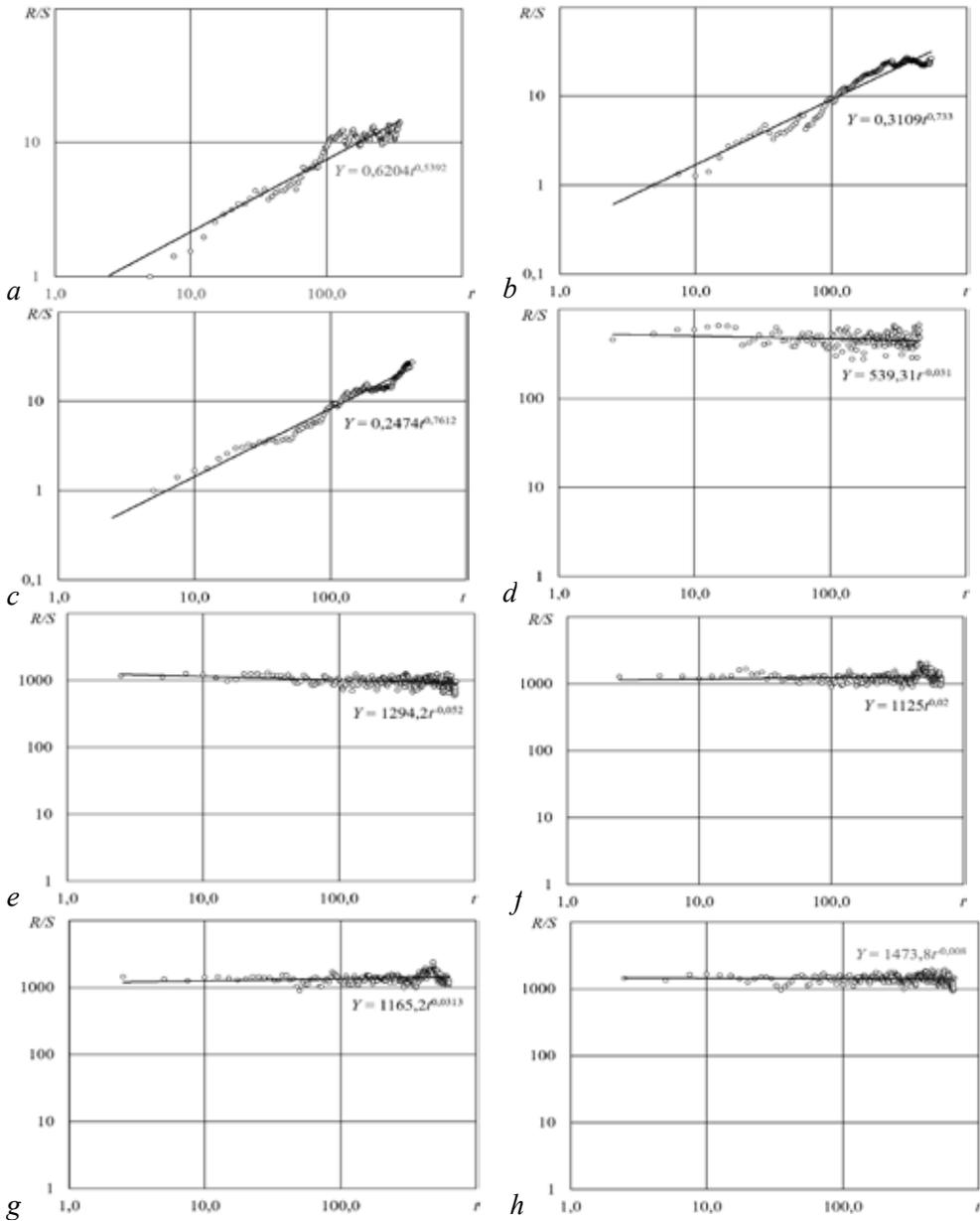
Pic. 1. Intensities N (car/h) of traffic flows as a function of time t (min); average values of intensities of traffic flows (car/h): 166 (a), 281 (b), 311 (c), 467 (d), 975 (e), 1273 (f), 1398 (g) and 1426 (h)[performed by the author].

«early» terms affects the values of the subsequent terms of the time series.

Pic. 2 presents in logarithmic coordinates the dependences of the functions of the normalised ranges R/S on time t for the functions of the intensity $N(t)$ of traffic flows at the considered road sections according to relations (2)–(4), as well as the approximation by the least squares method of these curves by power

functions. The corresponding values H of the Hurst exponent are given in Table 1. For several time series of intensities $N(t_i)$ of traffic flows, the values H of the Hurst exponent take negative values, which is not provided for by the classical interpretation of this indicator, $0 \leq H \leq 1, 0$ [1, P. 349; 37].

Calculation of fractal dimensions of the considered intensity curves (1) of traffic flows is



Pic. 2. Dependences of the indicators of the normalised range R/S of the functions $N(t)$ of the intensity of transport flows on time t (min, logarithmic coordinates); average values of the intensity N of flows: 166 (a), 281 (b), 311 (c), 467 (d), 975 (d), 1273 (e), 1398 (g) and 1426 (h) [performed by the author].

made with the box-counting method [1. P. 46; 2, P. 197; 3, P. 137], the idea of which is based on determining Hausdorff–Besicovitch dimension.

It is assumed that within the considered observation interval $[t_1, t_m]$ the function $N(t)$ with a finite number of breaks is known (it is these functions $N(t_i)$ that are considered as time series obtained with MSHS of «Azimuth» series). Within the segment $[t_1, t_m]$ a grid region $\omega_m = \{t_i = \delta \cdot i, i = \overline{1, m}\}$ is introduced, where $\delta = (t_m - t_0) / m$ is a grid step.

The considered function $N(t)$ is covered by square cells with a side of δ . As the size of δ decreases, the number of cells m covering the curve increases according to the power law [13]

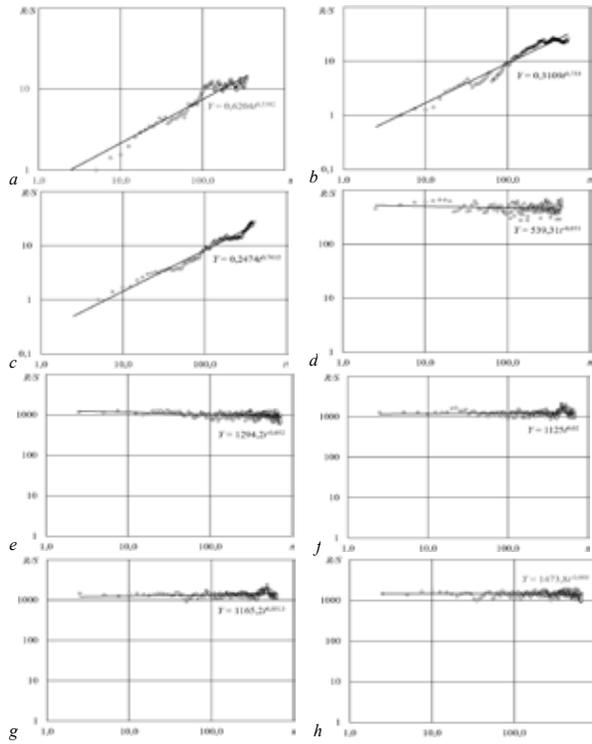
$$m(\delta) \sim \left(\frac{1}{\delta}\right)^D, \tag{5}$$

the exponent D defines the Hausdorff–Besicovitch dimension.

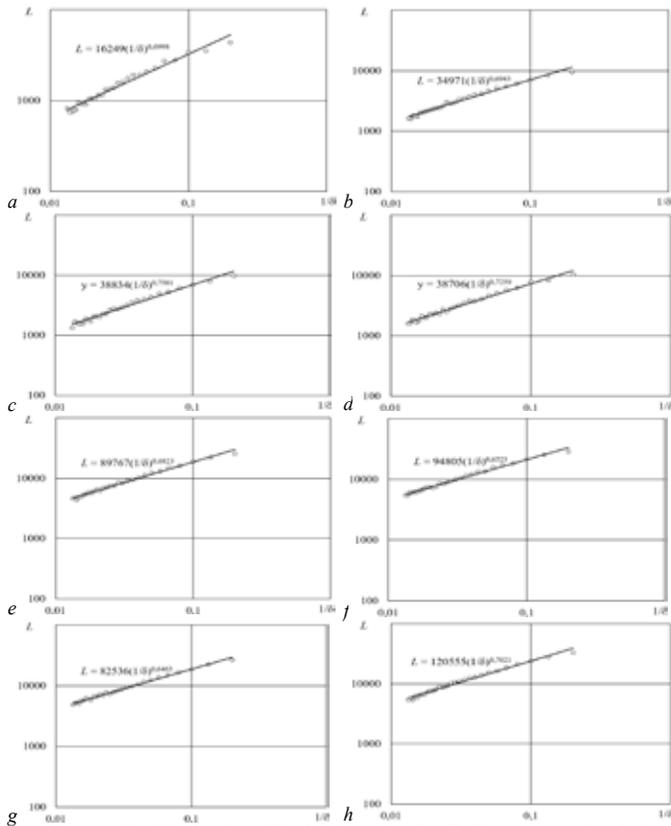
Taking the logarithm of expression (5) leads to the relation:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln m(\delta)}{\ln(1/\delta)}. \tag{6}$$

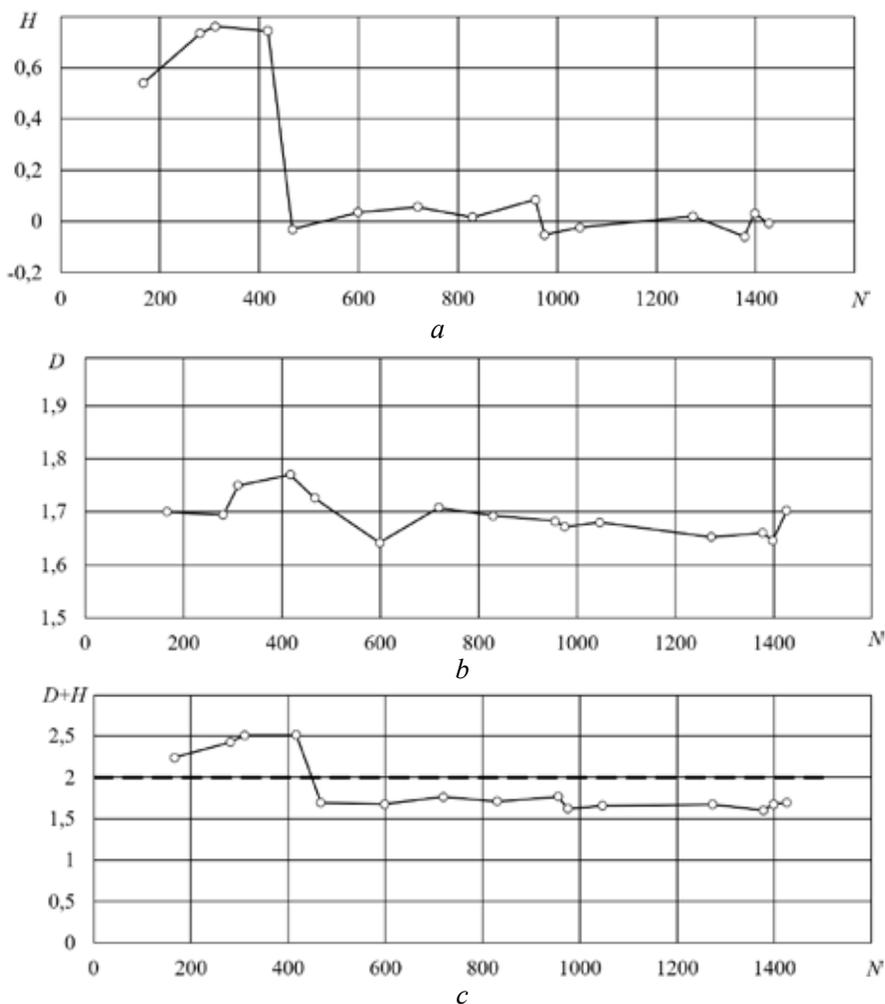




Pic. 2. Dependences of the indicators of the normalised range R/S of the functions $N(t)$ of the intensity of transport flows on time t (min, logarithmic coordinates); average values of the intensity N of flows: 166 (a), 281 (b), 311 (c), 467 (d), 975 (d), 1273 (e), 1398 (g) and 1426 (h) [performed by the author].



Pic. 3. Dependences of the length L of the functions $N(t)$ of the intensity of traffic flows on the value of $1/\delta$ (min–1, logarithmic coordinates $\ln(1/\delta)$ and $\ln L(\delta)$); average intensities of N flows: 166 (a), 281 (b), 311 (c), 467 (d), 975 (e), 1273 (f), 1398 (g) and 1426 (h) [performed by the author].



Pic. 4. Dependences of the Hurst exponent H (a), fractal dimension D (b) and the sum $D + H$ (c) on the average value N (car/h) of traffic flow intensity [performed by the author].

To calculate the fractal dimension D , the plane on which the function $N(t)$ under consideration is defined is initially covered with square cells of size δ_1 , and the number M_1 of cells covering the graph under study is counted. Then the size of the square cell is reduced to the value δ_2 , the number M_2 of cells covering the graph under study with cells of size $2\delta_2$ is counted, and so on.

For practical calculations, instead of the number m of cells covering the graph under study, it is convenient to use the length of the measured curve $L(\delta) = m\delta$. In this case, expression (5) is reduced to the form:

$$L(\delta) = \delta m(\delta) \sim \delta \left(\frac{1}{\delta}\right)^D = \left(\frac{1}{\delta}\right)^{D-1}. \quad (7)$$

The obtained empirical dependence $L(\delta)$ is approximated with the least squares method with a power function:

$$L(\delta) \approx a(1/\delta)^d. \quad (8)$$

From the comparison of (7) and (8) it follows that the fractal dimension D is determined by the value of the exponent d of the approximating function,

$$D = 1 + d. \quad (9)$$

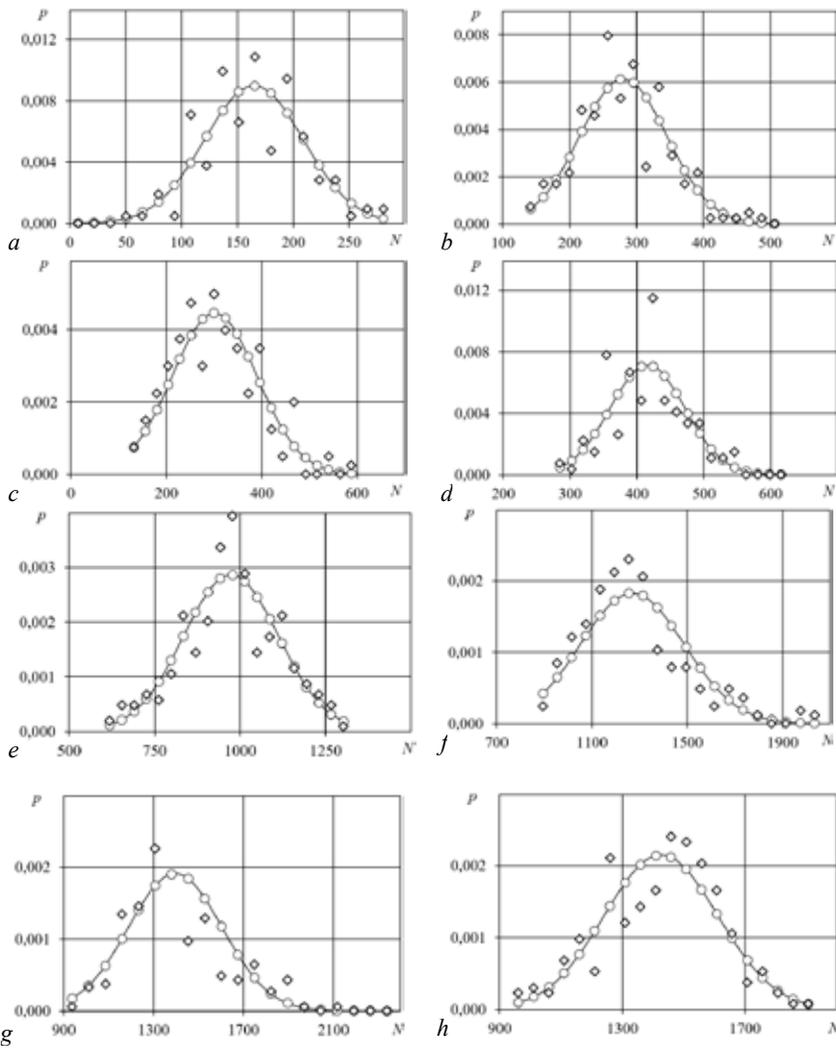
Pic. 3 shows the dependences of the length L of the functions $N(t)$ of the intensity of traffic flows at the considered road sections on the value $1/\delta$ (in logarithmic coordinates), determined according to the algorithm of the cell coverage method, as well as the approximation by the least squares method of these curves with power functions.

In the monograph [1, P. 353] B. Mandelbrot proposed a relationship between the Hurst index (exponent) H and the fractal dimension D :

$$D = 2 - H, \quad (10)$$

which is actively used by researchers to calculate the index H from the known value of D and,





Pic. 5. Gaussian (—o—) and empirical (◊) distributions of the density of probabilities p of the intensities N of traffic flows; values of the average intensities $\langle N \rangle$ of car traffic flows (car/h): 166 (a), 281 (b), 311 (c), 467 (d), 975 (e), 1273 (f), 1398 (g) and 1426 (h) [performed by the author].

conversely, to determine the dimension of D from the found value of the index H . The use of relation (10) is found in theoretical studies [30; 34; 38], in publications on economics [11; 15; 16; 39], physics [12], medicine [23], network technologies [41–44], industry development [45–47], transport problems [20; 48] and other disciplines. The monograph [32] is devoted to the study of relation (10) using a large amount of experimental data; it notes the presence of a certain discrepancy between this relation and the results of field measurements.

The availability of data on real traffic flow intensities following collection of data of MSHS installed in the road network of the city of Perm allows us to further study the issue of the conformity of the ratio (10) with the results of field measurements. For this purpose, the Hurst

indices H and the fractal dimension D were calculated at the selected sections of the street-and-road network (Table 1) with different traffic intensities.

Pic. 4 shows the dependences of the Hurst indices H (Pic. 4, a) and fractal dimensions D (Pic. 4, b), as well as the sum $D + H$ (Pic. 4, c) on the average intensities N of car traffic flows.

For values of the average traffic flow intensity $\langle N \rangle$ less than 420 car/h, the Hurst index takes values from 0,54 to 0,76, which characterises the time dependence of the traffic flow intensity as persistent, characteristic of natural processes [37].

At an average traffic flow intensity $\langle N \rangle$ of more than 420 car/h, the Hurst exponent drops to minimum values, including negative values (see data in Table 1, Pic. 2, d, e), characterising

the time dependence of traffic flow intensity as antipersistent, i.e. as chaotic. It should be noted that during computational processing of field observation data, negative values of the Hurst exponent were obtained (Pic. 2, *d, e, h*; 4, *a*; Tab). This contradicts the statement contained in some of the publications listed above that the Hurst exponent cannot take negative values.

The fractal dimension D of the time series (Pic. 4, *b*) depends little on the average traffic flow intensity and varies within the range from 1,65 to 1,77.

The sum $D + H$ (Pic. 4, *c*) at $\langle N \rangle < 420$ car/h exceeds the value 2 predicted by the relation (10); at $\langle N \rangle > 420$ car/h, the sum $D + H$ is less than the expected value. The relative deviation of the total value of $D + H$ from the value of 2 reaches 25,7 %.

In the monograph [1, P. 350] B. Mandelbrot indicates that the relationship (9) is obtained under the assumption that the random process under study should correspond to the Gaussian (normal) probability distribution. Pic. 5 presents data on the distribution of theoretical and empirical distributions of the probabilities p of the intensities N of car traffic flows in Perm SRN.

Table 1 presents the numerical values of the statistics of the Pearson criterion χ^2 for all the road sections considered. The critical value of the Pearson criterion for a significance level of 0,95 is 30,1, which is less than all the values of the criterion χ^2 given in Table 1 for the functions $N(t_i)$ of the intensity of car traffic flows given in this study.

It should be recognised that in all the cases considered, the probability distribution of the values of the time series of intensities $N(t_i)$ of transport flows cannot be considered as Gaussian (normal). This, apparently, explains the discrepancy between the relationship (10), established by B. Mandelbrot, and the results of field observations (Pic. 4, *c*).

It becomes obvious that before using the relationship (10), one should make sure that the probability distribution of the components of the time series under study is Gaussian (or close to it). Otherwise, the error in using formula (10) may be significant.

CONCLUSIONS

Processing of data from MSHS installed in the road network of the city of Perm allows to obtain reliable and meaningful information on

traffic flows in the street-and-road network of a modern city in real time.

Analysis of the data on traffic intensity obtained from MSHS revealed anomalies in the values of the Hurst exponent when using the normalised range method. It is traditionally believed that the Hurst exponent, which is a criterion for stability or instability of time series evolution trends, lies in the range from 0 to 1, whereas when calculating this indicator for the functions of traffic intensity in this study, the values obtained were beyond the specified range. The dependence of the Hurst exponent on the average value of traffic intensity was revealed: for small values of the average intensity, the Hurst exponent exceeds 0,5, which corresponds to the persistence of the observed process; for values exceeding 420 ... 450 car/h, this indicator sharply decreases, which is a sign of anti-persistence of the process of car traffic flow, and can take negative values.

It has been established that the traditionally used B. Mandelbrot relation, which links the fractal dimension and the Hurst exponent, when performing field measurements of the intensity of vehicle flows, is violated with a relative error of up to 25 %. An additional study has shown that the reason for such an error may be the failure to meet the condition of the Gaussian (normal) probability distribution for the obtained time series of car traffic flow intensities.

It seems necessary in practical studies to check the compliance of the probability distribution of the components of the time series with the Gaussian (normal) distribution to justify the correctness of applying the B. Mandelbrot relation.

The detected anomalies require further in-depth analysis of the considered and other methods and approaches used to analyse transport processes in the street-and-road networks of large cities.

REFERENCES

1. Mandelbrot, B. The Fractal Geometry of Nature [Edition in Russian]. Moscow, Institute of Computer Research, 2002, 656 p. ISBN 5-93972-108-7.
2. Feder, J. Fractals [Edition in Russian]. Moscow, Mir publ., 1991, 254 p. ISBN 5-03-001712-7.
3. Crownover, R. M. Introduction to fractals and chaos [Edition in Russian]. Moscow, Postmarket publ., 2000, 354 p. ISBN 5-901095-03-0.
4. Grahovac, D., Leonenko, N. N., Taqqu, M. S. Scaling Properties of the Empirical Structure Function of Linear Fractional Stable Motion and Estimation of Its Parameters. *Journal of Statistical Physics*, 2015, Vol. 158 (1), pp. 105–119. DOI: 10.1007/s10955-014-1126-4.



5. Lyubushin, A. A. Great Japan Earthquake Forecast [Prognoz Velikogo Yaponskogo zemletreseniya]. *Priroda*, 2012, Iss. 8 (1164), pp. 23–33. [Electronic resource]: https://elibrary.ru/download/elibrary_18042955_47303750.pdf. Last accessed 16.01.2024. EDN: PEVRQB.
6. Hasanov, A. B., Abbasova, G. G. Analysis of the fractal structure and stochastic distribution of pores in oil and gas reservoirs. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, Vol. 19, Iss. 3, pp. 228–239. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.3.
7. Smirnov, V. V., Spiridonov, F. F. Fractal models of stochastic processes [Fraktalnie modeli stokhasticheskikh protsessov]. *South Siberian Scientific Bulletin*, 2013, Iss. 1 (3), pp. 99–102. [Electronic resource]: https://elibrary.ru/download/elibrary_19107961_73506142.pdf. Last accessed 16.01.2024. EDN: QCDQDT.
8. Pashchenko, F. F., Amosov, O. S., Muller, N. V. Structural-parametric identification of time series using fractal and wavelet analysis [Strukturno-parametricheskaya identifikatsiya vremennogo ryada s primeneniem fraktalnogo i veyvlet-analiza]. *Information Science and Control Systems*, 2015, Iss. 2 (44), pp. 80–88. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=twbnmr&ysclid=m3ok83dhjp774512399>. Last accessed 17.01.2024. EDN: TWNBMR.
9. Klikushin, Yu. N. Method of fractal classification of complex signals [Metod fraktalnoi klassifikatsii slozhnykh signalov]. *Zhurnal Radioelektroniki*, 2000, Iss. 4, 6 p. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15111685>. Last accessed 16.01.2024. EDN: MSRXQN.
10. Neganov, V. A., Antipov, O. I., Neganova, E. V. Fractal analysis of time series describing qualitative transformation of systems, including disasters [Fraktalniy analiz vremennykh ryadov, opisyyayushchikh kachestvennie preobrazovaniya sistema, vkluchaya katastrofy]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2011, Vol. 14, Iss. 1, pp. 105–110. [Electronic resource]: https://elibrary.ru/download/elibrary_16337899_76189553.pdf. Last accessed 16.01.2024. EDN: NTN0XH.
11. Krivonosova, E. K., Pervadchuk, V. P., Krivonosova, E. A. Comparison of fractal characteristics of time series of economic indicators [Svravnenie fraktalnykh kharakteristik vremennykh ryadov ekonomicheskikh pokazatelei]. *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya*, 2014, Iss. 6, 113 p. [Electronic resource]: https://elibrary.ru/download/elibrary_22877127_95621621.pdf. Last accessed 16.01.2024. EDN: TGQDAZ.
12. Barabash, T. K., Maslovskaya, A. G. Computer modelling of fractal time series [Kompyuternoe modelirovanie fraktalnykh vremennykh ryadov]. *Bulletin of Amur State University. Natural and economic sciences*, 2010, Iss. 49, pp. 31–38. [Electronic resource]: https://vestnik.amursu.ru/wp-content/uploads/2017/12/N49_7.pdf. Last accessed 16.01.2024.
13. Garafutdinov, R. V., Akhunanova, S. A. Adapted box-counting method for assessment of the fractal dimension of financial time series. *Applied Mathematics and Control Issues*, 2020, Iss. 3, pp. 185–218. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.3.10.
14. Gerogiorgis, D. I. Fractal scaling in crude oil price evolution via Time Series Analysis (TSA) of historical data. *Chemical Product and Process Modeling*, 2009, Vol. 4, No. 5. DOI: <https://doi.org/10.2202/1934-2659.1370>.
15. Nekrasova, I. V. The Hurst index as a measure for the fractal structure and long-term memory of financial markets. *International Research Journal*, 2015, Iss. 7 (38), pp. 87–91. [Electronic resource]: https://research-journal.org/media/PDF/irj_issues/7-3-38.pdf#page=87. Last accessed 15.01.2024.
16. Simonov, P. M., Garrafutdinov, R. V. Modelling and forecasting of financial instruments dynamics using econometrics models and fractal analysis. *Bulletin of Perm University. Economics*, 2019, Vol. 14, Iss. 2, pp. 268–288. DOI: 10.17072/1994-9960-2019-2-268-288.
17. Generalova, A. A., Bychkov, D. S. Improving the aerodynamic properties of an intercity bus using fractal theory [Uluchshenie aerodinamicheskikh svoystv mezhdugorodnego avtobusa s primeneniem teorii fraktalov]. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*, 2015, Iss. 2 (14), pp. 158–166. [Electronic resource]: https://elibrary.ru/download/elibrary_24107892_77708413.pdf. Last accessed 13.01.2024.
18. Karablin, O. V. On the fractal nature of city automobile traffic [O fraktalnom kharaktere avtomobilnogo trafika goroda]. *Economy: yesterday, today, tomorrow*, 2018, Vol. 8, Iss. 9A, pp. 287–292. [Electronic resource]: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-economy-2018-9/32-karablin.pdf>. Last accessed 13.01.2024.
19. Pengjian Shang, Meng Wan, Santi Kama. Fractal nature of highway traffic data. *Computers and Mathematics with Applications*, 2007, Vol. 54, Iss. 1, pp. 107–116. DOI: doi.org/10.1016/j.camwa.2006.07.017.
20. Qiang Meng, Hooi Ling Khoo. Self-Similar Characteristics of Vehicle Arrival Pattern on Highways. *Journal of Transportation Engineering*, 2009, Vol. 135, Iss. 11, pp. 864–872. DOI: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:11\(864\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:11(864)).
21. Xuewei Li, Pengjian Shang. Multifractal classification of road traffic flows. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2007, Vol. 31, Iss. 5, pp. 1089–1094. DOI: doi.org/10.1016/j.chaos.2005.10.109.
22. David, S. A., Machado, J. A. T., Inacio, C. M. C., Valentim, C. A. A combined measure to differentiate EEG signals using fractal dimension and MFDA-Hurst. *Communications in Nonlinear Science Numerical Simulation*, 2020, Vol. 84, 105170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105170>.
23. Erofeeva, E. S., Lyapunova, E. A., Oborin, V. A., Gileva, O. S., Naimark, O. B. Structural and functional analysis of dental hard tissues in assessing the quality of whitening technologies [Strukturno-funktsionalniy analiz tverdykh tkanei zubov v otsenke kachestva tekhnologii otbelivaniya]. *Russian Journal of Biomechanics*, 2010, Vol. 14, Iss. 2 (48), pp. 47–55. [Electronic resource]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15105346_39403207.pdf. Last accessed 16.01.2024.
24. Boyarshinov, M. G. The method of normalised range for the analysis of traffic flow intensity [Metod normirovannogo razmakha dlya analiza intensivnosti transportnogo potoka]. *Bulletin of the State Budgetary Institution «Scientific Center for Life Safety»*, 2020, Iss. 2 (46), pp. 35–46. [Electronic resource]: https://elibrary.ru/download/elibrary_44788054_61375863.pdf. Last accessed 15.01.2024.
25. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. The deterministic component of the traffic flow intensity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020) 27th – 29th October 2020, Saint-Petersburg, Russian Federation, 2021, 1111 (1), 012013 (10p). DOI: 10.1088/1757-899X/1111/1/012013.
26. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. Using the complex of photo and video recording of traffic violations to identify deterministic and stochastic components of the traffic flow intensity. *Intellekt. Innovacii. Investicii*, 2021, Iss. 3, pp. 61–71. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-3-61.
27. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. Fourier analysis of the traffic flow intensity. *Intellekt. Innovacii. Investicii*, 2021, Iss. 4, pp. 46–59. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-4-46.
28. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vaskina, E. V. Application of the Hurst index to research the traffic flow

- intensity. *Intellekt. Innovacii. Investicii*, 2022, Iss. 2, pp. 68–81. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-68.
29. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vaskina, E. V. Application of wavelet analysis to investigate traffic flow intensity. *Intellekt. Innovacii. Investicii*, 2022, Iss. 4, pp. 72–87. DOI: doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-72.
30. Grassberger, P., Procaccia, I. Characterization of Strange Attractors, *Physical Review Letters*, 1983, 50, pp. 346–349. [Electronic resource]: https://e-l.unifi.it/pluginfile.php/591014/mod_resource/content/0/PhysRevLett.50.346.pdf. Last accessed 16.01.2024.
31. Krylova, O. I., Tsvetkov, I. V. A software package and algorithm for calculating the fractal dimension and linear trend of time series. *Software products and systems*, 2012, Iss. 4, pp. 106–110. [Electronic resource]: <https://swsys.ru/index.php?page=article&id=3320&lang>. Last accessed 16.01.2024. EDN: OXSJMU.
32. Deshcherevsky, A. V. Fractal dimension, Hurst exponent and slope angle of the time series spectrum. Moscow, Institute of Seismology, Joint institute of Physics of the Earth named after O. Yu. Schmidt, Russian Academy of Sciences, 1997, 34 p. [Electronic resource]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26650013_92379281.pdf. Last accessed 16.01.2024. EDN: WLESYZ.
33. Starchenko, N. V. Fractality index and local analysis of chaotic time series. Abstract of Ph.D. (Physics and Mathematics) thesis [*Indeks fraktalnosti i lokalniy analiz khaoticheskikh vremennykh ryadov. Avtoref. diss...kand. fizmat nauk*]. Moscow, MEPhI (State University), 2005, 24 p. [Electronic resource]: https://viewer.rusneb.ru/ru/000200_000018_RU_NLR_bibl_1085207?page=1&rotate=0&theme=white. Last accessed 16.01.2024.
34. Anisimov, I. A., Osipov, G. S. Comparison of classical and modified methods for calculating the fractal dimension of time series using the Hurst exponent [*Sravnenie klassicheskogo i modifitsirovannogo metodov rascheta fraktalnoi razmernosti vremennykh ryadov s pomoshchyu pokazatelya Hersta*]. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2020, Vol. 10–2 (49), pp. 6–10. DOI: 10.24411/2500-1000-2020-11104.
35. Drew, D. R. Traffic flow theory and control [Edition in Russian]. Moscow, Transport publ., 1972, 424 p.
36. Silyanov, V. V. The theory of traffic flows in road design and traffic organization [*Teoriya transportnykh potokov v proektirovaniy dorog i organizatsii dvizheniya*]. Moscow, Transport publ., 1977, 303 p.
37. Sutcliffe, J., Hurst, S., Awadallah, A. G., Brown, E., Hamed, Kh. Harold Edwin Hurst: the Nile and Egypt, past and future. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, Vol. 61, Iss. 9, pp. 1557–1570. DOI: 10.1080/02626667.2015.1019508.
38. Golub, Yu. Ya. Fractal dimensionality of time series multiplied by a number and multiplication of other time series [*Izychenie fraktalnoy razmernosti vremennogo riada na chislo i umnozheniya vremennykh riadov*]. *Science and Business: Ways of Development*, 2016, Iss. 5 (59), pp. 72–76. [Electronic resource]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26384218_98248727.pdf. Last accessed 13.01.2024. EDN: WFNJCD.
39. Golub, Yu. Ya. Analytical Analysis of the Fractal Dimensionality of a Cross Rate of One Currency in Relation to Another [*Analiticheskoe rassmotrenie fraktalnoi razmernosti kross-kursov odnoi valyuty po otnosheniyu k drugoi*]. *Science and Business: Ways of Development*, 2014, Iss. 7 (37), pp. 42–45. [Electronic resource]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22309341_13493325.pdf. Last accessed 14.01.2024. EDN: SUFBVT.
40. Mikhailov, V. V., Kirnosov, S. L., Gedzenko, M. O. Fractal model of processing streaming data in the task of forecasting weather conditions [*Fraktalnaya model obrabotki potokovykh dannykh v zadache prognozirovaniya uslovii pogody*]. *Problems of ensuring safety in elimination of consequences of emergency situations*, 2013, Vol. 2, Iss. 1 (2), pp. 43–46. [Electronic resource]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26293729_82151009.pdf. Last accessed 13.01.2024. EDN: WDKAMR.
41. Li Li, Zhiheng Li, Yi Zhang, Yudong Chen. A Mixed-Fractal Traffic Flow Model Whose Hurst Exponent Appears Crossover. Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Conference Publishing Service, 2012, pp. 443–447. DOI 10.1109/CSO.2012.103.
42. Kaklauskas, L., Sakalauskas, L. Study of on-line measurement of traffic self-similarity. *CEJOR*, 2013, Vol. 21, pp. 63–84. DOI 10.1007/s10100-011-0216-5.
43. Mehrvar, H. R., Le-Ngoc, T. Estimation of Degree of Self-Similarity for Traffic Control in Broadband Satellite Communications. Proceedings 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Montreal, QC, Canada, 1995, Vol. 1, pp. 515–518. DOI: 10.1109/CCECE.1995.528187.
44. Glavatskiy, S. P. Statistical analysis of social media traffic [*Statisticheskiiy analiz trafika sotsialnykh setei*]. *Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova*, 2013, Iss. 2, pp. 94–99. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21597433>. – Last accessed 14.08.2023.
45. Zhmurko, D. Yu., Osipov, A. K. Forecasting the development indicators of the sugar industry using fractal analysis methods [*Prognozirovanie pokazatelya razvitiya sakharnoi otrasli s primeneniem metodov fraktalnogo analiza*]. *Bulletin of Udmurt University. Economics and Law*, 2018, Vol. 28, Iss. 2, pp. 185–193. [Electronic resource]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35078230_18865640.pdf. Last accessed 14.08.2023. EDN: LVBFMT.
46. Lopukhin, A. M. Application of fractal analysis methods to forecasting development indicators of coffee industry enterprises [*Primenenie metodov fraktalnogo analiza k prognozirovaniyu pokazatelya razvitiya predpriyatiy kofeinoi otrasli*]. *Continuum. Mathematics. Computer science. Education*, 2020, Iss. 4, pp. 70–77. DOI: 10.24888/2500-1957-2020-4-70-79.
47. Shmyrin, A. M., Sedykh, I. A., Shcherbakov, A. P. Nonlinear analysis methods in investigating clinker production characteristics [*Metody nelineinogo analiza pri issledovanii kharakteristik proizvodstva klinkera*]. *Vestnik TGU*, 2014, Vol. 19, Iss. 3, pp. 923–926. [Electronic resource]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21830477_25858437.pdf. Last accessed 14.08.2023. EDN: SJSQBH.
48. Can Ye, Huiyun Li, Guoqing Xu. An Early Warning Model of Traffic Accidents Based on Fractal Theory. 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Qingdao, China, 2014, pp. 2280–2285. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958055. ●

Information about the author:

Boyarshinov, Mikhail G., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Automobiles and Technological Machines of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, mgboyarshinov@pstu.ru.

Article received 10.01.2024, approved 05.07.2024, accepted 24.07.2024.





Integrated Digital Railway Space

**Irina A. Dubchak**

Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Russian Science Citation Index SPIN-code: 1330–5849;

Russian Science Citation Index Author ID: 1152475.

✉ dia.rut.mii@gmail.com.

Irina A. DUBCHAK

ABSTRACT

The article offers the conclusions following the results of the study on de facto shaped integrated space of the digital railway. It is shown that the digital railway The integrated space of the digital railway had the information space as a primary source, but in the process of development became more complex and specific differences have appeared making it more diverse and, thanks to the integration of the information space with the Internet of Things technology, closer to cyberspace.

The relationships between the integrated space, the geoinformation space and the coordinate space demonstrate multifunctionality of the integrated space comprising functions of communication, navigation, coordination, positioning and control that are implemented as a method to optimise train timetables and ensure uninterrupted operation in the transport infrastructure system based on complementary provision of control of groups of objects, corporate management and management of single objects.

Keywords: *transport, integrated space, control, digital railway, complex systems.*

For citation: Dubchak, I. A. Integrated Digital Railway Space. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 160–164. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-3>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The digital railway (DR) has emerged following digital technological transformation. It is based on dynamic spatio-temporal models of railway management [1]. The DR has greater freedom in choosing the modes of movement, but greater freedom is associated with greater uncertainty, in view of which it is necessary to use modelling [2] and uncertainty reduction [3] methods. The tasks of the DR require the use of reasoning and the selection of dominant factors in the conditions of fuzzy information [4]. The uncertainty that exists in DR-linked situations leads to the need to apply probabilistic measures regarding switch indices in the case of an unknown utility function [5].

The DR [6] can be considered as a complex «system of systems», and, particularly, its operation requires not only information, but also geoscience [7]. Like a regular taxi, the DR uses electronic maps and atlases [8] to plot routes and travel modes, while the solution to the problems of obtaining cartographic information models should occur in real time as well [9].

DR is developing complementarily with digital transport technologies: digital logistics [10], unmanned transport [11], digital communications [12], cyber-physical systems [13; 14]. As a self-developing system, DR belongs to the class of systems based on subsidiarity [15]. As a spatial phenomenon, DR is related to geoinformatics, geodesy and spatial economics [16]. Since modern management [17] is closely related to information spaces and other spaces as management tools, then DR also uses control space, which should be considered integrated. This space is formed by communication

and information spaces and technologies.

The *objective* of the study was to analyse features and relationships within the integrated space of the digital railway.

RESULTS

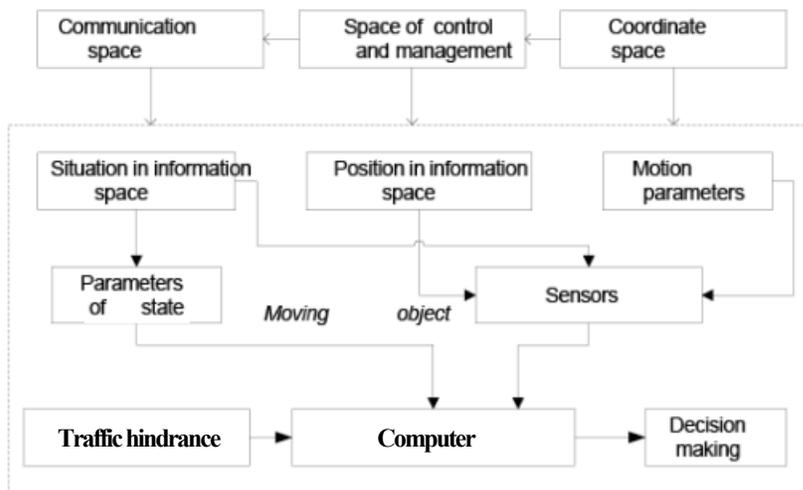
The Structure of the Integrated Space of the Digital Railway

To help to better understand the features of an integrated space, Pic. 1 shows its generalised structure.

The integrated space of the Digital Railway includes three main spaces: *communication*, *coordinate* spaces and that of *control and management*.

Since the Digital Railway is a spatial system, it uses spatial control and applies spatial logic [18]. Spatial control requires a *coordinate space*, which is created using geodetic methods. The coordinate space englobes global navigation satellite systems (GNSS) technologies, with the help of which the coordinates of a moving object are calculated in real time. The coordinate space is created based on geodetic networks (state geodetic network) and local networks while dedicated survey grids are used for railways.

The *communication space* englobes communication networks and digital communicology devices, mobile communication, which is a mandatory component of the Digital Railway [12], as well as a radio relay information space, which provides radio surveillance of moving objects in addition to visual surveillance in conventional transport systems, being a necessary component in unmanned transport control [18]. The communication space contains also the satellite communication space, the



Pic. 1. The structure of the integrated space of the Digital Railway [compiled by the author].

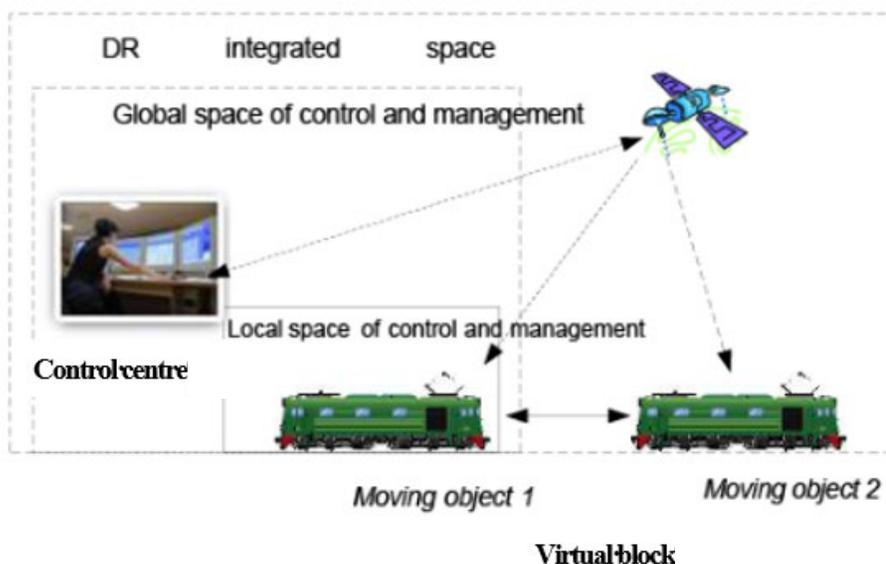


Fig. 2. Global and local space of control and management of the Digital Railway [compiled by the author].

satellite navigation space and the satellite coordinating space. These spaces are supported by GNSS. The satellite navigation space solves the problems of orientation and navigation of a moving object.

Coordinating space is actually a coordinate space, it solves the problems of determining the location of an object in an absolute and relative coordinate system, and then GNSS is included in both the coordinate and communication space.

The satellite communication space supports communication through space communication systems. The communication space solves information security problems.

The space of control and management of the Digital Railway is an information control space. It is divided into local and global ones; the difference between them is shown in Pic. 2.

The global space of control and management of the Digital Railway includes many local spaces and has a core in the form of a control centre (Pic. 2). The global space of control and management of the Digital Railway implements also the technology of the «Internet of Things».

The local space of control includes a static and dynamic (sliding) information situation. The static information situation is associated with stationary objects of the route environment and traffic hindrance [15], and the dynamic information situation is associated with a moving object and so moves with it. Information from this situation enters the intelligent systems that controls this object or global ITS.

Technological Features of the Digital Railway

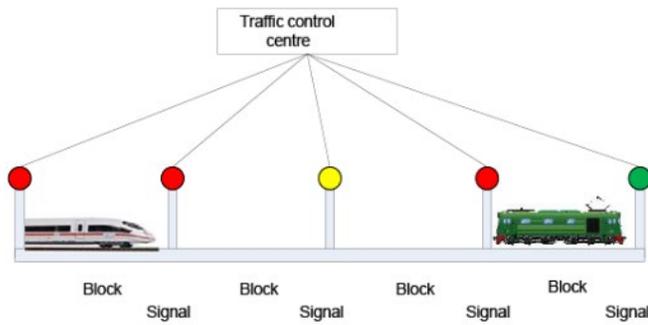
The first technological feature of the Digital Railway is the use of integrated space. The second technological feature of the Digital Railway is the use of moving blocks. This feature, also called Moving Block Signalling (MBS), is shown in Pic. 4. The normal movement is shown in Pic. 3.

The signalling system used in conventional traffic is called exactly signalling block system since it uses a system of blocks fixed in space and a signalling system separating the blocks. The signal gives a command to move or stop. Pic. 3 shows the traffic density when using signalling block system and with which some blocks (from 30 to 50 %) are empty.

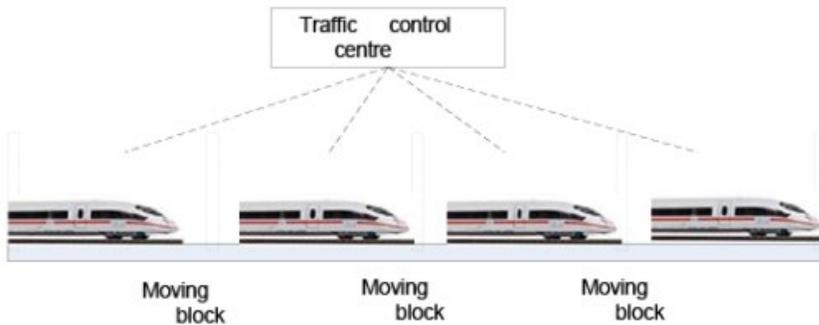
As an alternative, Pic. 4 shows a diagram of digital traffic with the technology of moving blocks (or «envelopes»).

The moving block is implemented through a communication system. The mobile object calculates the permissible approach to the next object and moves synchronously with it, thus fixed signalling and fixed blocks are not needed. The moving block is a sort of a dynamic information situation that slides along the route, and the mobile object is inside such a situation. With such movement, there are no empty blocks, and the intensity of traffic increases significantly.

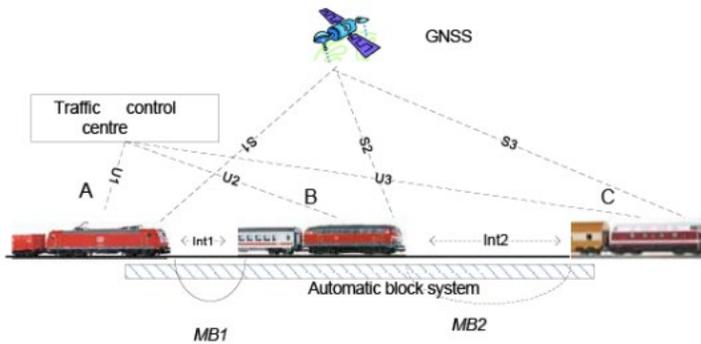
In MBS technology, the mobile object has a built-in computer that forms the dimensions of the block and through the communication space



Pic. 3. The principle of conventional traffic [compiled based, i.e. on [6]].



Pic. 4. The principle of digital movement [compiled based, i.e. on [6]].



Pic. 5. The operating principle of the integrated space of the Digital Railway [compiled by the author].

carries out communication interaction with other mobile objects.

Basics of DR Operation

Pic. 5 shows the operating principle of the integrated information space of the Digital Railway.

Three mobile objects (A, B, C) shown have satellite communication and satellite coordination. This communication is shown as S1, S2, S3. Besides, there is a coordination and information communication (U1, U2, U3) between the traffic control centre and the mobile objects. There is a coordinating and information

communication (Int1, Int2) between the mobile objects. Through this communication they transmit information about their own position, traffic speed and acceleration that is used in the traffic control centre for adaptation of transportation, traffic optimisation and for calculation of mobile blocks.

Pic. 5 shows in substance the objective need for the integrated space of the Digital Railway as a tool for transportation management. Using this technology, the intensity of transportation increases significantly (Pic. 4) together with the complexity of traffic management and control.



CONCLUSION

The integrated space of the Digital Railway born based on integration of the information space with the technology of the «Internet of things» and having englobed functions of communication, navigation, coordination and positioning, has predetermined its own role of a quite uncontested backbone framework of railway management and development.

For example, the technology of virtual coupling, closely linked to virtual blocks [20], increases the efficiency of the Digital Railway and, referring to the local information space of the moving object, can be considered as a technology of the integrated space of the Digital Railway.

Besides, the integrated digital railway space allows solving optimisation problems within itself, without resorting to external computers.

Generally, the study has shown high promising nature of applying the concept of integrated digital railway space to analyse, system developing and implementing of interrelated technological solutions focused on growing efficiency of railway transportation.

REFERENCES

- Rosenberg, I. N., Tsvetkov, V. Ya. Creation of dynamic spatio-temporal railroad control mode. *Geodesy and cartography*, 2010, Iss. 8, pp. 48–51. EDN: SNGVHJ.
- Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Modelling uncertainty with generalized credal sets: application to conjunction and decision. *International Journal of General Systems*, 2018. Vol. 47, Iss. 1, pp. 67–96. DOI: 10.1080/03081079.2017.1391805.
- Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. The contradiction between belief functions: Its description, measurement, and correction based on generalized credal sets. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2019, Vol. 112, pp. 119–139. DOI: 10.1016/j.ijar.2019.06.001.
- Bozhenyuk, A., Belyakov, S., Knyazeva, M., Rozenberg, I. On Computing Domination set in Intuitionistic Fuzzy Graph. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2021, Vol. 14, Iss. 1, pp. 617–624. DOI: 10.2991/ijcis.d.210114.002.
- Bronevich, A. G., Rozenberg, I. N. Ranking probability measures by inclusion indices in the case of unknown utility function. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2014, Vol. 13, Iss. 1, pp. 49–71. DOI: 10.1007/s10700-013-9169-6.
- Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Digital Railway: Principles and Technologies. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 3 (76), pp. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-3-5>.
- Rosenberg, I. N., Voznesenskaya, M. E. Geoscience and georeference [Geoznaniya i georeferentsiya]. *Bulletin of Moscow State Regional Pedagogical University. Geographical Environment and Living Systems*, 2010, Iss. 2, pp. 116–118.

[Electronic resource]: <https://www.geoecosreda.ru/jour/article/view/872/842>. Last accessed 29.05.2024.

- Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A., Kostianoy, A. G., Gvozdk, S. A., Serykh, I. V., Krasnoperov, R. I., Sazonov, N. V., Dubchak, I. A., Popov, A. B., Kostianiaia, E. A., Gvozdk, G. A. Electronic Atlas of Climatic Changes in the Western Russian Arctic in 1950–2021 as Geoinformatic Support of Railway Development. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, Iss. 9, pp. 5278. DOI: 10.3390/app13095278.
- Belyakov, S., Belyakova, M., Rozenberg, I. Approach to Real-Time Mapping, Using a Fuzzy Information Function. *Communications in Computer and Information Science*, 2013, Vol. 398, PART I, pp. 510–521. DOI: 10.1007/978-3-642-45025-9_50.
- Chung-Shan Yang, Moses Shang-Min Lin. The impact of digitalization and digital logistics platform adoption on organizational performance in maritime logistics of Taiwan. *Maritime Policy & Management*, 2023, pp. 1–18. DOI: 10.1080/03088839.2023.2234911.
- Yuan Shuyun, Ying Li, Fangwen Bao, Haoxiang Xu. [et al.] Marine environmental monitoring with unmanned vehicle platforms: Present applications and future prospects. *Science of The Total Environment*, 2023, Vol. 858, Part 1, 159741. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159741.
- Sneps-Sneppé, M., Fedorova, N., Sukonnikov, G., Kupriyanovsky, V. Digital Railway and the transition from the GSM-R network to the LTE-R and 5G-R – whether it takes place? *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, Vol. 5, Iss. 1, pp. 71–80. [Electronic resource]: <http://injoit.org/index.php/ji/article/view/379/346>. EDN: XNRUKL. Last accessed 29.05.2024.
- Khaitan, S. H., McCalley, J. D. Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey. *IEEE Systems Journal*, 2015, Vol. 9, Iss. 2, pp. 350–365. DOI: 10.1109/JSYST.2014.2322503.
- Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Cybernetics and Physical Systems for Transport Management. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 2, pp. 138–145. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-2-13>.
- Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya., Dzyuba, Yu. V. Subsidiarity-Based Management and Control Systems for Railway. *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 4, pp. 22–35. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-22-35.
- Tsvetkov, V. Ya. Spatial Relations Economy. *European Journal of Economic Studies*, 2013, Vol. 3, Iss. 1, pp. 57–60. EDN: PZTGYF.
- Kovalenko, N., Rosenberg, I., Tsvetkov, V. UC aims system in the management of the economic activities of the track complex of JSC «Russian railways». *E3S Web of Conferences*, 2023, Vol. 376, 04001. DOI: 10.1051/e3sconf/202337604001.
- Dolgy, A. I., Rozenberg, I. N., Tsvetkov, V. Ya. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation. AIP Conference Proceedings, 2021, Vol. 2402, Iss. 1, 50059. DOI: 10.1063/5.0074851.
- Rosenberg, I. N., Tsvetkov V. Ya. Dynamic Information Situation in the Transport Sector. *Nauka I tehnologii zheleznikh dorog*, 2022, Iss. 1, pp. 3–8. [Electronic resource]: <https://niias.ru/upload/iblock/e29/ojxkwyvwwmimhgmf0uml56anvww9he6x.pdf> [full text of the issue]. Last accessed 29.05.2024.
- Yuan Cao, Jiakun Wen, Lianchuan Ma. Tracking and collision avoidance of virtual coupling train control system. *Future Generation Computer Systems*, 2021, Vol. 120, pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.future.2021.02.014. ●

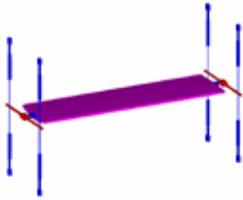
Information about the author:

Dubchak, Irina A., Head of the Directorate of New Projects and Technologies of Russian University of Transport, Moscow, Russia, dia.rut.mit@gmail.com.

Article received 29.05.2024, approved 24.06.2024, accepted 28.06.2024.

T

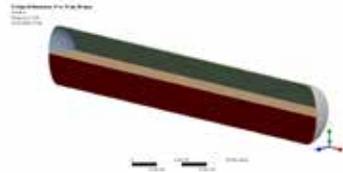
SCIENCE AND ENGINEERING



BRIDGES 166, 177

Aerodynamic stability of long-span bridges: impact of traffic.

Visual programming while designing bridges based on information and parametric modelling.

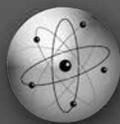


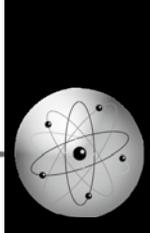
ROLLING STOCK 183, 190, 197

Tank wagon: relationship between liquid transported and frequency characteristics of the boiler shell.

Racing cars: analysis of patent activity.

Ultrasound flaw detection for solid-rolled wheels.





The Impact of Traffic on the Aerodynamic Stability of Long-Span Bridges



Olga I. PODDAEVA



Alexey A. LOKTEV



Pavel S. CHURIN



Anastasia N. FEDOSOVA

*Olga I. Poddaeva*¹, *Alexey A. Loktev*², *Pavel S. Churin*³, *Anastasia N. Fedosova*⁴

^{1, 3, 4} National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

² Russian University of Transport, Moscow, Russia.

¹ORCID 0000-0003-1969-6696; Web of Science Researcher ID: H-1030-2019; Scopus Author ID: 56002141900; Russian Science Citation Index SPIN-code: 4857-5428; Russian Science Citation Index Author ID: 410581.

²ORCID 0000-0002-8375-9914; Web of Science Researcher ID: W-1762-2017; Scopus Author ID: 35618959900; Russian Science Citation Index SPIN-code: 5766-6018; Russian Science Citation Index Author ID: 16528.

³ORCID 0000-0003-1509-6108; Web of Science Researcher ID: AAD-1005-2022; Scopus Author ID: 56002171000; Russian Science Citation Index SPIN-code: 4017-7152; Russian Science Citation Index Author ID: 690208.

⁴ORCID 0000-0002-2339-0289; Web of Science Researcher ID: S-2955-2016; Scopus Author ID: 56001803200; Russian Science Citation Index SPIN-code: 1503-9064; Russian Science Citation Index Author ID: 676314.

✉ ² aaloktev@yandex.ru.

ABSTRACT

Under certain conditions, wind effects on long-span bridges can cause aeroelastic instability phenomena. Currently, the main method for studying such structures for occurrence of aeroelastic instability phenomena is experimental modelling in wind tunnels.

Experimental modelling is usually based on the assumption that the cross-sectional shape of the bridge remains unchanged over time. Obviously, such a proposal cannot be true, since the

presence of vehicles on the bridge structure changes the cross-sectional profile of the bridge. In this regard, it is extremely important to find out whether it is justified to ignore the change in the cross-sectional profile of bridges due to the presence of traffic. The present study is aimed at obtaining, using experimental modelling in wind tunnels, a notion of the effect of changes in the cross-section of the bridge due to the presence of traffic on its aerodynamic stability.

Keywords: transport infrastructure, long-span bridges, bridge stability, traffic, wind effects, wind tunnels.

Funding: this work was supported by a 2024 grant for fundamental and applied scientific research (R&D) for research teams of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, project No. 01-392/130.

Acknowledgment: the work was carried out using the equipment of the Leading Regional Shared Research Centre and Large Research Gradient Wind Tunnel, the unique scientific installation of the National Research Moscow State University of Civil Engineering.

For citation: Poddaeva, O. I., Loktev, A. A., Churin, P. S., Fedosova, A. N. The Impact of Traffic on the Aerodynamic Stability of Long-Span Bridges. World of Transport and Transportation, 2024. Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 166–176. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-4>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

In the classical analysis of bridge structures for aeroelastic instability phenomena using both experimental and numerical modelling, car traffic is usually ignored [1–5]. Traffic means the location of motor (or railway) vehicles on the span structure. Obviously, such an approach significantly simplifies the study of the aerodynamics of long-span bridges. If we consider the traffic on the bridges, the cross-sectional profile of the bridge will constantly change due to the moving traffic flow. As a result, the changed cross-sectional profiles of the bridge along the span structure will differ significantly even at the same time; besides, the profiles will also change due to the road and wind conditions at different times. Because of this, the question of whether it is justified to ignore the change in the cross-sectional profile of bridges due to the presence of traffic flow seems significant.

Compared to studies of the influence of traffic as of external dynamic loads on the bridge, studies of the effect of changes in the cross-sectional profiles of the bridge on the aerodynamic behaviour of structures are quite rare.

The authors of [6] conducted a series of experiments in a wind tunnel to study the effect of stochastic traffic on flutter derivatives. Several scenarios were tested to obtain an idea of the changes in flutter derivatives at different sections of the bridge and at different points in time. In the work [7], devoted to the effect of changes in the bridge profile due to the presence of traffic flow on the aerodynamic characteristics of the structure, the authors, having conducted experimental modelling, showed that a change in the cross-section of the bridge due to the presence of traffic can significantly affect the aeroelastic properties of long-span bridges. The work [8] examined a change in the aerodynamic and aeroelastic characteristics of the bridge caused by stationary vehicles with different locations of vehicles on the bridge deck. It was found that for a system with two degrees of freedom, stationary vehicles have a rather beneficial effect on stability of the bridge. The work [9] has studied the wind load on a railway bridge, which makes part of a high-speed line. The authors have come to a qualitative conclusion about the constant fluctuations of the aerodynamic resistance coefficients of the «span structure» – «vehicles» system for various combinations of the positions of the vehicles on the bridge crossing, including for high-speed lines.

One of the *tasks* solved in this work is the study of the influence of traffic flow density and the location of individual vehicles on the span structure on the aerodynamic behaviour of long-span bridges.

For this purpose, a series of *experiments* was conducted in a wind tunnel for two different models of long-span bridge crossings in several settings: the absence of vehicles on the structure (classical setting) and the presence of car traffic, leading to a change in the cross-section of the bridge.

RESULTS

Research Object № 1

Statement of the problem

A span structure with a length of 265,41 m was selected as the object of study (Pic. 1).

Methodology for conducting aerodynamic experimental studies

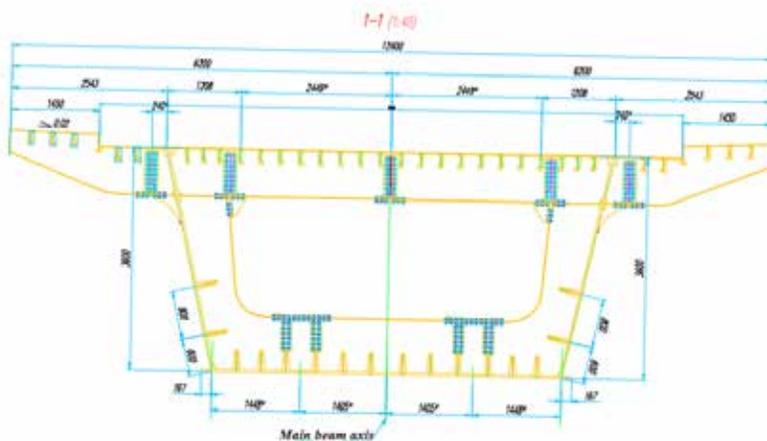
According to domestic regulatory documents¹, the aerodynamic stability of such a structure should be tested using experimental modelling in wind tunnels. Currently, depending on the size and main objectives of the tests, the world community of wind energy and industrial aerodynamics (International Associations for Wind Engineering) has officially adopted two methods for studying the wind effect on bridge structures:

1. Testing sectional (cut-off) models of span structures.
2. Testing full-scale models [10].

Conducting full-scale experiments in wind tunnels is associated with several direct and indirect constraints, which include the use of full-sized models, which is associated with the geometric, financial and time aspects of this type of work. Although creation of full-scale models of the object can provide complete reliable information on the actual state and behaviour of the structure under aerodynamic effects, since this is associated with the need for accurate reproduction of the mass-inertial and frequency parameters of the bridge structure, the study of aeroelastic instability phenomena is associated with complexity of scaling models and interpreting the results obtained after the

¹ Code of rules SP 35.13330.2011. Bridges and Pipes. Updated version of SNIp [Construction standards and rules] 2.05.03–84*. [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849>. Last accessed 05.05.2024.





Pic. 1. Cross-section diagram of bridge № 1 [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].

experiment² [11–16]. In the process of modelling, it is important to be able to vary a wide range of model parameters, since when conducting scientific and technical support for design of a bridge crossing, design and other engineering solutions can change [10]. It is then proposed to test bridge span structures in wind tunnels in the form of rigid sections, geometrically similar to a real structure, with three degrees of freedom and suspended in the working area of the pipe in a six-coordinate system. This model representation allows for fairly accurate reproduction of real aerodynamic effects in laboratory conditions: various types of aerodynamic flows, changes in wind speed by height, variations in wind flow intensity, various angles of attack, vertical and horizontal load pulsations, visualisation of wind flow distribution in the vicinity of the blown structure, etc. [10].

Sectional tests are the most common research method. This method is appropriate for beam bridges in the absence of high-rise pylons and the need to consider the impact of the cable-stayed system on the span structure.

When testing a sectional model, the section of the longest bridge span is modelled as the most susceptible to dynamic wind effects. Practical experience in conducting experiments in wind tunnels, as well as the requirements set in regulatory documents, allows us to assert that for the most accurate modelling, it is necessary to make the sectional model of the span structure

² Guide for the assessment of wind actions and effects on structures National Research Council of Italy. CNR-DT 207/2008

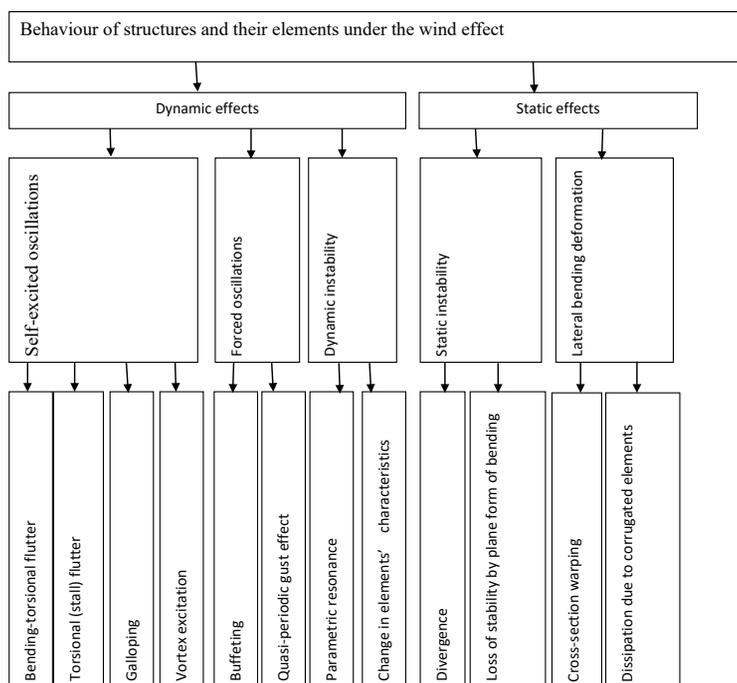
as absolutely rigid one, and model the elastic characteristics using spring hangers on a specialised stand-table. Detailed requirements were previously described in ODM [road industry's methodological document] 218.2.040–2014 «Methodological recommendations for assessing the aerodynamic characteristics of sections of bridge spans»³. Now valid is GOST R 59635–2022, a national standard of the Russian Federation «Motor roads of public use. Bridges. Rules for calculating and confirming aeroelastic stability»⁴. Features not specified in the document are comprehended and then considered by empirically varying the characteristics at the beginning of blowing on the model.

Aerodynamic effects, like any other load, are usually divided into static and dynamic ones; they are based on aerodynamic forces and elastic forces (flutter, buffeting); one of the additional causes of the appearance of dynamic effects are inertial forces.

The classification presented in Pic. 2 covers almost all known forms of motion of elastic bodies in a wind flow [10].

³ ODM 218.2.040-2014 «Methodological recommendations for assessing the aerodynamic characteristics of sections of bridge spans». Confirmed by the order of Federal Road Agency, dated 24.03.2014 № 478-r. [Electronic resource]: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/prikazy-rasporyazheniya/13183>. Cancelled by the order of Federal Road Agency, dated 05.05.2022 № 1414-r. [Electronic resource]: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/prikazy-rasporyazheniya/522301>. Last accessed 05.05.2024.

⁴ State standard GOST R 59625-2022. «Motor roads of public use. Bridges. Rules for calculating and confirming aeroelastic stability». [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200182851>. Last accessed 05.05.2024.



Pic. 2. Classification of aeroelastic phenomena by M. I. Kazakevich [10] [performed by A. A. Loktev].

The impacts to which bridge structures are exposed can also be divided into technogenic and natural, depending on the nature of their occurrence, but given the nonlinear nature of most of them, the results of their combined action cannot be obtained by the usual aggregation of single phenomena. Since the contribution of individual types of impacts to the final result can be significant, researchers are forced to sophisticate the applied approaches and models, combining, for example, the effect of vehicles being on the bridge deck and snow (and/or ice) deposits, the location of which can also change depending on the direction and intensity of the wind.

For example, during the physical modelling of the snow load on the model of the artificial structure, a special plastic powder was used, the fractions of which correspond to the parameters of scaling the structure, considering the humidity in the laboratory room, to prevent the effects of adhesion and additional moisture absorption.

The proposed approach to modelling does not allow considering the effects of melting or, conversely, freezing of additional ice on structural elements, that is, it is actually reduced to an additional quasi-static load, the local intensity of which can change due to the transport of particles due to wind. At the same time, the distribution of particles imitating snow makes it possible to predict the appearance of hazardous

areas for workers on the structure and in the vicinity of it, associated with increased wind flow speeds and current restrictions as part of ensuring occupational safety.

A physical model of a section of the span structure forms the basis of experimental studies for the bridge crossing in a wind tunnel (Pic. 3). The model is suspended on spring fasteners and then subjected to wind action to detect bending and torsional vibrations with aggregation of various vibration modes with their subsequent separation [10].

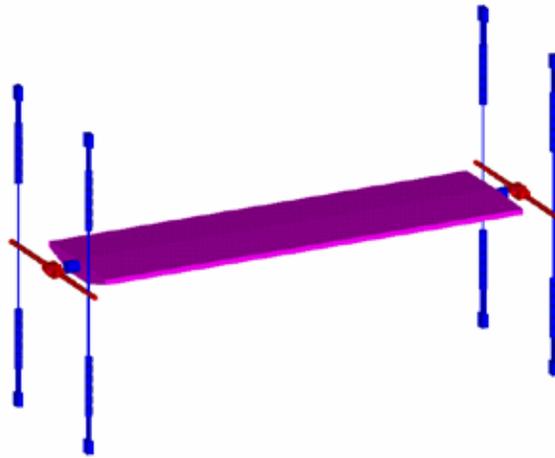
The physical model is installed in the centre of the cross-section of the wind tunnel on a special stand, the supports of which are rigidly attached to the floor of the chamber and on them, in turn, the span structure is suspended on springs (Pic. 4). This layout of the experiment allows for both static and dynamic testing of the bridge crossing [10; 16].

During dynamic tests of the bridge superstructure, the parameters of forced oscillations of the model under the influence of an aerodynamic load are determined:

- Amplitudes of oscillatory movements.
- Frequency spectra of oscillations.
- Ordinal forms of oscillations.
- Spectral characteristics of oscillations.

Static tests of the bridge section are necessary to verify the load characteristics and compare

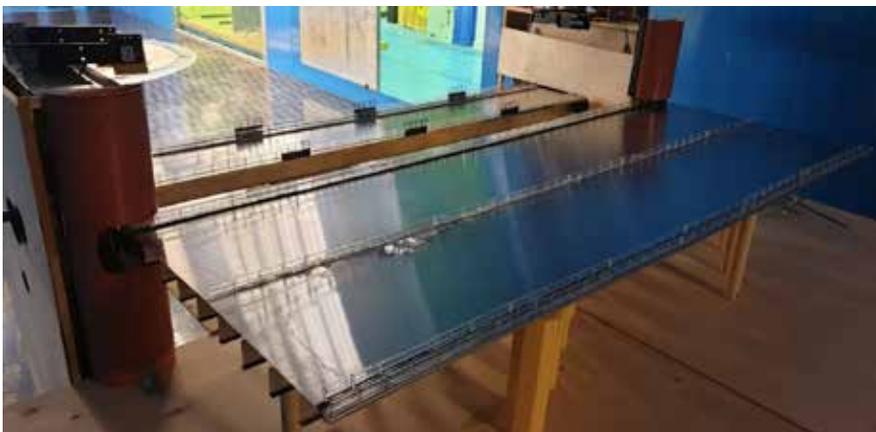




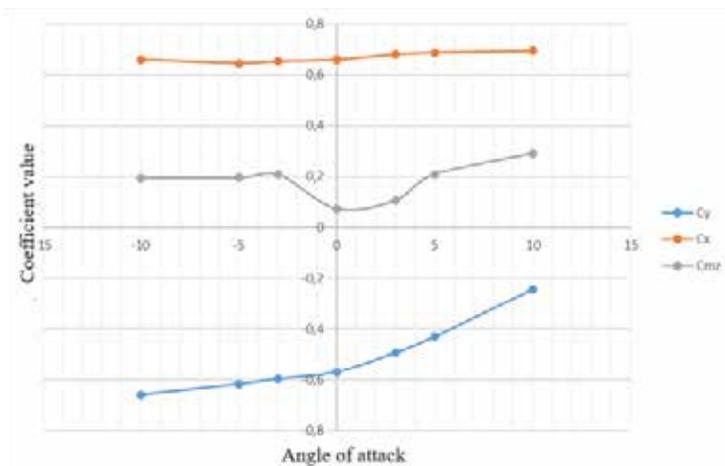
Pic. 3. Scheme of suspension of a section of a span structure on spring braces [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



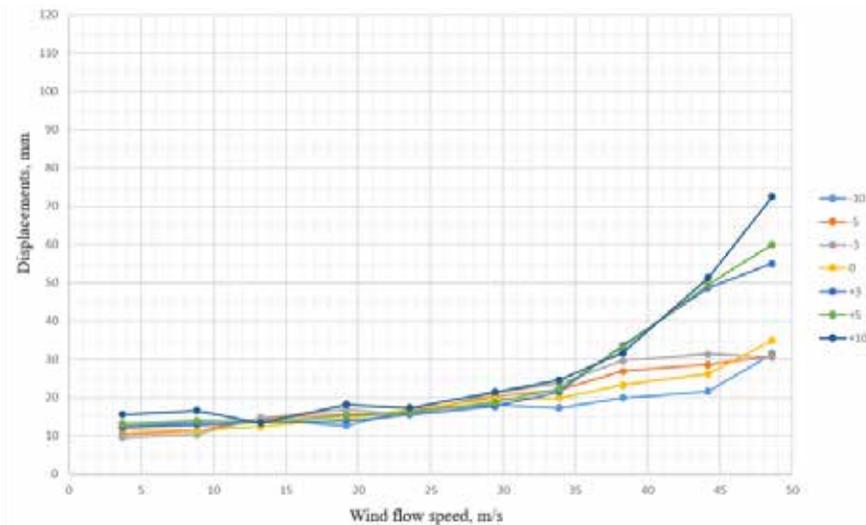
Pic. 4. Installation for testing a model of a bridge crossing in a wind tunnel [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



Pic. 5. Model № 1 of the bridge span structure [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



Pic. 6. Graphs of the dependence of the lift force (C_y), drag force (C_x) on the angle of attack of the flow [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



Pic. 7. Dependence of displacements during oscillatory movements of a model of a span structure on the speed of the wind flow in its various directions [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].

them with the parameters of the load acting on the actual structure of the transport infrastructure:

- Drag of a characteristic longitudinal or transverse section.
- Lift force acting both on the span section and on the entire installation.
- Torsional moment around the longitudinal axis of the bridge span section model.

The unique scientific installation «Large Research Gradient Wind Tunnel» (registration number 585332, webportal «Scientific and technological infrastructure of the Russian Federation. Centres for shared use of scientific equipment and unique scientific installations»; registration date: 04.05.2018) is used as an

experimental installation for conducting aerodynamic experimental research.

Designing a model

Considering the cross-section of the working area of the wind tunnel (4 x 2,5 m), from the condition of «transparency» and uncluttered air flow, the optimal scale of the model is 1:40 (Pic. 5). To simultaneously ensure geometric similarity, the required ratio of mass and rigidity of the span structure, it is proposed to use flat sheets of aluminium, from which the section of the bridge span is assembled using bolted and riveted joints.

The proposed design solutions for creating the model ensure not only the correct geometric





Fig. 8. Scheme of the experiment to assess the number and location of vehicles on the span structure for its aerodynamic stability [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].

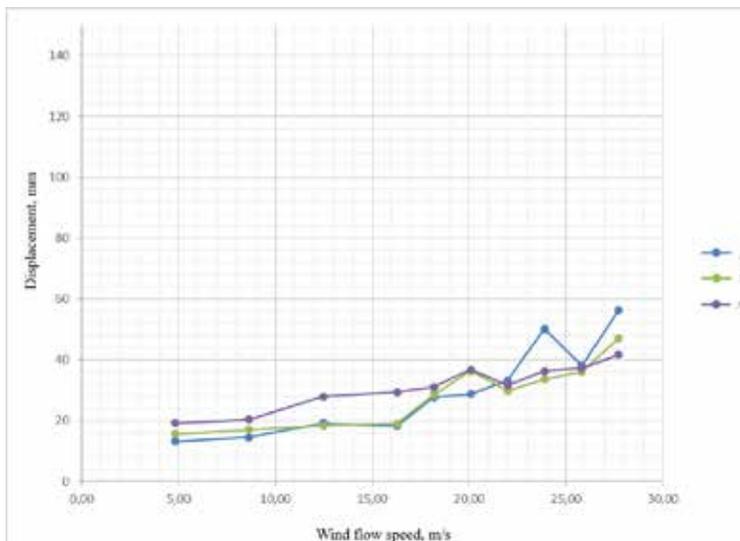


Fig. 9. Dependence of the amplitude of oscillations of the model of the span structure on the wind flow speed for different loading conditions of the structure [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].

similarity, but also a reliable distribution of linear masses, in which the centres of mass of the model and the real structure coincide in relative coordinates.

Thus, the designed model corresponds to the full-scale object by the following parameters:

- Geometric similarity.
- Correspondence of mass distribution.
- Correspondence of geometric centres of mass and moments of inertia.

These parameters fully satisfy the requirements for experimental studies.

The correct choice of structural elements allows for similarity in mass and inertial forces, which will allow for the behaviour of the span structure model

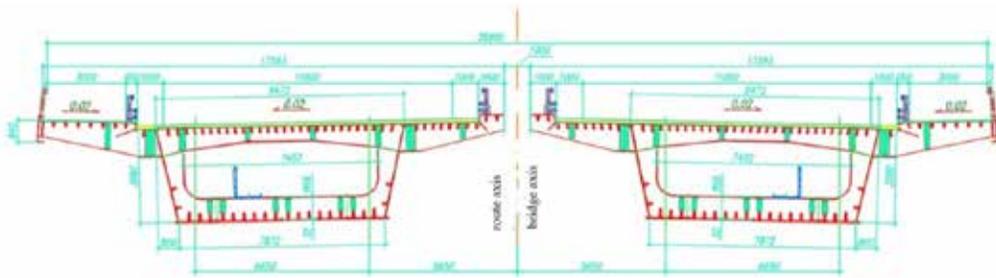
to be matched to the behaviour of the real transport infrastructure facility under aerodynamic impacts of varying intensity and direction [16].

All frequency characteristics of the span structure are modelled by specialised springs of the measuring stand.

Experimental studies are carried out in two stages:

- Static tests, during which the values of lift force (C_y), drag force (C_x) and aerodynamic moment (C_mz) are determined.

- Dynamic tests aimed at calculating the amplitudes of bending and torsional vibrations at different values of speed and wind flow directions (α).



Pic. 10. Cross-section diagram of the bridge [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



Pic. 11. Model of the span structure [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].

Static tests

As a result of static tests, the following graphs were obtained showing the dependence of the lift force (C_y), drag force (C_x) on the angle of attack of the flow (Pic. 6).

Based on the obtained values of the aerodynamic coefficients (Pic. 6) for model № 1, it is possible to check the necessary condition for the occurrence of aeroelastic instability of galloping – the Glauert – Den-Hartog criterion [10]:

$$[C_L(\alpha) + C_D(\alpha)] < 0. \quad (1)$$

As can be seen from Pic. 6, the lift coefficient increases within the interval, and the drag coefficient is positive, accordingly, the Glauert-Den Hartog criterion is not satisfied, and galloping is impossible.

Dynamic tests

The studies on the dynamic impacts of the span section are carried out on the stand described above (Pic. 3, 4), while the parameters of the spring suspension rigidity are linked to the wind flow speeds and are set in the model during its design. The results of the tests are shown in Pic. 7.

The impact of car traffic on aerodynamic stability also was assessed (Pic. 8, 9).

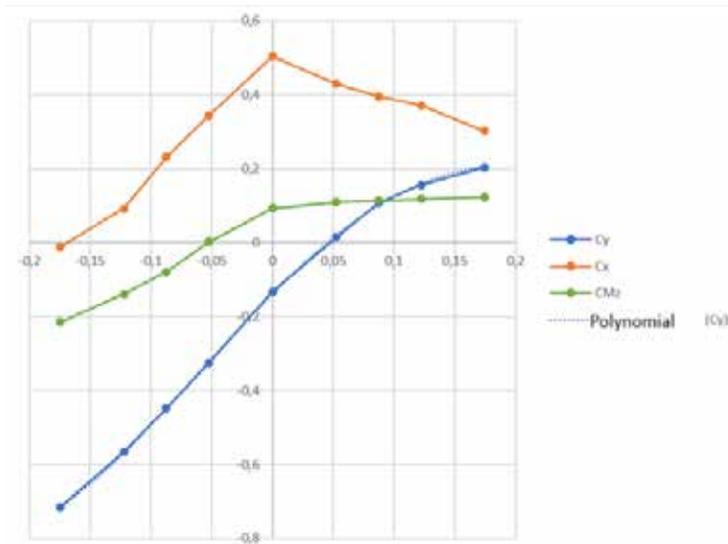
Tests were conducted for the windward and leeward spans of the bridge under study in the following configurations:

- A. Free span (Pic. 5).
- B. Span with car traffic (Pic. 8).
- C. Span with car traffic and snow deposits.

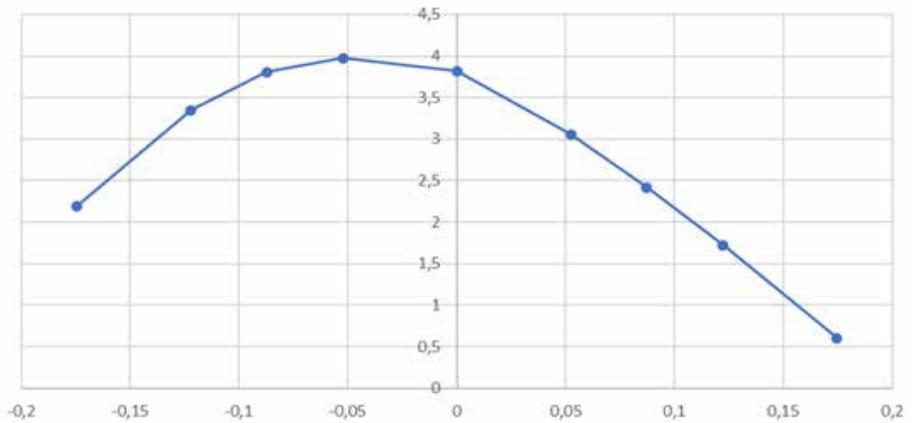




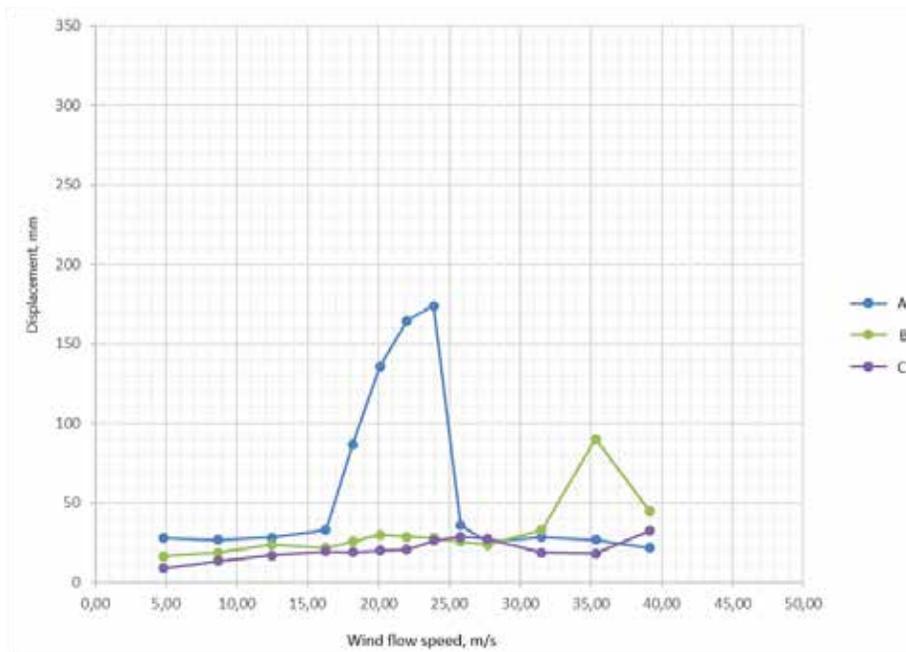
Pic. 12. Model of the bridge span structure (car traffic) [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



Pic. 13. Graphs of the dependence of the lift force (Cy), drag force (Cx), torque (Cmz) on the angle of attack of the flow at angles of attack (-10° – +10°) [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



Pic. 14. Graph of the dependence of the Glauert – Den-Hartog criterion value on the flow attack angle at attack angles (-10° – +10°) [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].



Pic. 15. Dependence of maximum displacements of bridge span points during oscillatory movements on wind flow speed with its direction $\alpha = 00^\circ$) [performed by O. I. Poddaeva, P. S. Churin, A. N. Fedosova].

Test results

The results of the physical experiments conducted for two directions of wind flow with an attack angle varying in the range from -10° to $+10^\circ$ showed that the phenomena of aerodynamic instability, according to the classification (Pic. 2), do not occur.

The results of the experiment also showed that the presence of vehicles and locally cumulated snow bags does not significantly affect the aerodynamic stability of the span structures in the considered quasi-static setting of car traffic. The determining factor is the influence of the existing bridge crossing located in the immediate vicinity. The influence of road traffic in this case is negligible.

Research Object № 2

Statement of the problem

A span structure with a length of 600 meters is being studied (Pic. 10).

Designing a model

The 1:70 scale model is made of sheet aluminium (Pic. 11).

The results of static tests for the bridge span model considering car traffic (Pic. 12) are shown in Pic. 13.

The Glauert – Den-Hartog criterion was tested using formula (1): for some angles of

attack, the necessary galloping condition is met (Pic. 14).

For clarity of the results obtained during the experimental dynamic tests, a graphical dependence of the superstructure displacements on the average wind flow speed is shown on a scale corresponding to the real situation at the transport infrastructure facility. In fact, it is possible to observe a change in the stability function of the bridge structure.

The tests were conducted for the windward and leeward spans of the bridge under study in the following configurations:

A. Free span (Pic. 11).

B. Span with snow accumulation and car traffic.

C. Span with car traffic (Pic. 12).

The situation of accumulation of road vehicles in two directions of traffic alternately (traffic jam) was simulated. In accordance with the average statistical dimensions of vehicles, the following dimensions were taken as a basis for the simulation:

– trucks – $4 \times 18 \times 2,5$ m;

– passenger vehicles – $1,5 \times 4,2 \times 1,7$ m.

Pic. 15 shows the graphical dependencies of the maximum displacements of the span structure on the wind flow speed for various cases of loading the span structure section at an attack angle of $+3^\circ$.



CONCLUSIONS

Physical tests conducted with a physical model of the structure regarding possible loss of aerodynamic stability of sections of bridge spans considering car traffic have shown that the presence of car traffic, when studied at individual angles of attack, has a favourable effect on the aerodynamic stability of the span, which is consistent with the conclusions of work [8]: for a system with two degrees of freedom, stationary vehicles have a rather beneficial effect on stability of the bridge. This is primarily due to additional turbulence of the wind flow over the span, which, considering the different dimensions of car traffic at its individual sections, prevents the formation of a stable von Karman vortex street path and the occurrence of resonant vortex excitation.

The results obtained appear to offer a possibility of creating more accurate models of aerodynamic loads on bridge structures considering the influence of vehicle traffic and additional snow load.

REFERENCES

- Jain, A., Jones, N. P., Scanlan, R. H. Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-Span Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1996, Vol. 122, Iss. 7, pp. 716–725. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:7\(716\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:7(716)).
- Poddaeva, O., Churin, P. Experimental study of aerodynamic stability of a long-span bridge under wind loads. *Energy Reports*, 2023, Vol. 9, Suppl. 9, pp. 370–375. DOI: [10.1016/j.egyrs.2023.05.273](https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2023.05.273).
- Gosteev, Yu. A., Obukhovskiy, A. D., Salenko, S. D. Numerical simulation of the transverse flow over spans of girder bridges. *Vestnik of Don State Technical University [Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)]*, 2018, Iss. 4, pp. 362–378. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378>.
- Simiu, E., Scanlan, R. H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. 3rd ed. Wiley Interscience, 1996, 704 p. ISBN 978-0471121572.
- Soloviev, S. Yu. Aerodynamic stability of long-span bridges [*Aerodinamicheskaya ustoichivost bolsheproletnykh mostov*]. *Transport of the Russian Federation*, 2016, Iss. 5 (66), pp. 47–50. EDN: WZJSVT.
- Chen, S., Nelson, R., Chen, F., Chowdhury, A. Impact of Stochastic Traffic on Modified Cross-Section Profiles of a Slender Long-Span Bridge: Wind Tunnel Experimental Investigation. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, Vol. 139, Iss. 3, pp. 347–358. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000444).
- Wu, J., Zhou, Yu., Chen, S. Wind-induced performance of long-span bridge with modified cross-section profiles by stochastic traffic. *Engineering Structures*, 2012, Vol. 41, pp. 464–476, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.004>.
- Pospisil, S., Buljac, A., Kozmar, H., Kuznetsov, S., Macháček, M., Král, R. Influence of Stationary Vehicles on Bridge Aerodynamic and Aeroelastic Coefficients. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, Vol. 22, Iss. 4, 05016012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001017](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001017).
- Loktev, A. A., Korolev, V. V., Shishkina, I. V., Poddaeva, O. I., Gribach, Yu. S. Study of a bridge crossing of a high-speed railway under aerodynamic influences [*Issledovanie mostovogo perekhoda vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali pri aerodinamicheskikh vozdeystviyakh*]. *Transport Urala*, 2022, Iss. 3 (74), pp. 55–59. DOI: [10.20291/1815-9400-2022-3-55-59](https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-3-55-59).
- Kazakevich, M. I. Wind safety of structures. Theory and practice. Moscow, Giprostroymost Institute, 2015, 288 p.
- Kazakevich, M. I. Classification of aerodynamic experimental studies [*Klassifikatsiya aerodinamicheskikh eksperimentalnykh issledovaniy*]. *Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2011, Iss. 4, pp. 154–157. EDN: WYGTEK.
- Kazakevich, M. I. Aerodynamics of bridges. Moscow, Transport publ., 1987.
- Kazakevich, M. I. Aerodynamics of engineering structures. Moscow, Giprostroymost Institute, 2014, 167 p.
- Solari, G., Bartoli, G., Gusella, V., Piccardo, G., Pistoletti, P., Ricciardelli, F., Vintani, A. The new CNR-DT 207/2008 Guidelines on Actions and Effects of Wind on Structures. In: 5th European & African conference on wind engineering (EACWE): Florence Italy, July 19th-23rd 2009. Conference proceedings 2009. Eds. Borri, C., Augusti, G., Bartoli, G., Facchini, L. Firenze University Press, 517 pp. [Electronic resource]: <https://www.iawe.org/Proceedings/5EACWE/164.pdf>. Last accessed 05.05.2024.
- Salenko, S. D. Non-stationary aerodynamics of poorly streamlined multi-beam structures. D.Sc. (Eng) thesis [*Nestatsionarnaya aerodinamika plokhobtekaemykh mnogobalochnykh konstruktii. Diss...dokt. tekh. nauk*]. Novosibirsk, Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 2005, 332 p.
- Poddaeva, O. I. Fundamentals of Ensuring Technosphere Safety of Critically Important Transport Infrastructure Facilities within the Life Cycle. Abstract of PhD (Eng) thesis [*Osnovy obespecheniya tekhnosfernoi bezopasnosti kriticheski vazhnykh obektov transportnoi infrastruktury v predelakh zhiznennogo tsikla. Avtoref. dis.dokt. tekh.nauk*]. Moscow, RUT publ., 2023, 48 p., pp. 41–48.

Information about the authors:

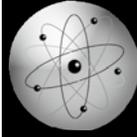
Poddaeva, Olga I., D.Sc. (Eng), Associate Professor, Head of the Educational, Scientific and Production Laboratory for Aerodynamic and Aeroacoustics Testing of Building Structures of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, poddaevaoi@gmail.com.

Loktev, Alexey A., D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Transport Construction of Russian University of Transport, Moscow, Russia, aaloktev@yandex.ru.

Churin, Pavel S., Ph.D. (Eng), Deputy Head of the Educational, Scientific and Production Laboratory for Aerodynamic and Aeroacoustics Testing of Building Structures of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, pashok_@inbox.ru.

Fedosova, Anastasia N., Ph.D. (Eng), Senior Researcher at the Educational, Scientific and Production Laboratory for Aerodynamic and Aeroacoustics Testing of Building Structures of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, mgsu-misi@list.ru.

Article received 05.05.2024, approved 22.07.2024, accepted 26.07.2024.



Features of Visual Programming for Designing Bridge Structures Based on Information and Parametric Modelling



WIN Ko Myint Thu

Russian University of Transport, Moscow, Russia / Magway, Myanmar.
ORCID 0009-0001-1751-5348.

✉ winkomyintthu@mail.ru.

Win Ko Myint Thu

ABSTRACT

The widespread adoption of Building Information Modelling (BIM) in construction project management has been greatly facilitated by technological advances. Despite this, the BIM approach has been mainly applied to building construction projects, with limited attention paid to infrastructure projects such as bridges.

The projects of this kind often present significant geometric and semantic differences between structures, making it difficult to leverage existing BIM data schemas. Recent research suggests that parametric modelling can provide a viable solution to improve design efficiency and interoperability. However, the number of existing scientific sources on the topic remain extremely scarce. The objective of the study presented in the paper is to address this knowledge gap by developing

parametric bridge elements capable of generating all types of bridge structures from a single parametric file.

The parametric scripts used in this study were developed using Grasshopper, a visual programming language, and subsequently integrated into Tekla Structures, a popular Building Information Modelling (BIM) software, for modelling purposes. The resulting BIM integration enables exploration and creation of advanced designs with complex geometries, ultimately leading to cost-effective solutions. Compared to traditional design methodologies, the results obtained demonstrate significant improvements in terms of time savings, increased design flexibility, and optimised structural performance.

Keywords: transport infrastructure, BIM, bridge, parametric modelling, bridge element, programming, Tekla Structures, Grasshopper.

For citation: Win Ko Myint Thu. Features of Visual Programming for Designing Bridge Structures Based on Information and Parametric Modelling. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 177–182. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-5>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The technologies used in the architecture, engineering, construction and operations (AECO) industry are constantly improving, but development of new requirements for them is also accelerating. Large infrastructure projects such as bridges are becoming more common, requiring development of new technologies for creating plans and documents, as well as handling changes and incoming information during the design process.

Previous drawing software (e.g., AutoCAD) made it possible to create design documents, store them electronically and make the necessary changes. However, this approach is being replaced by information modelling, which offers significant advantages in terms of data integration. As a result, BIM systems generate an object-oriented 3D model linked to a database of all elements and materials. Architectural design (geometry of building elements, spatial relationships, connectivity), structural design (design documents, structural diagram) and information about construction and maintenance processes of the building are all included in the information modelling system [1].

The design of bridge elements is a critical aspect of infrastructure development, requiring careful consideration of various factors such as structural integrity, durability, aesthetics and environmental impact. The traditional manual design process can be labour-intensive, error-prone and result in long design cycles. A review of several publications (e.g., [2]) has shown that a parametric design approach is one that improves the efficiency of this process and interoperability.

Building information and parametric modelling technologies are increasingly used in infrastructure design thanks to BIM design tools [3]. The use of building information and parametric modelling improves the design process by reducing time and effort [4; 5]. The method is based on the introduction of parameters and numerical dependencies between elements to create flexible models. The geometry is implemented in parametric modelling using a programming language, and most parametric modelling situations are centred around visual scenarios [6].

The *objective* of the study is to develop parametric bridge elements capable to generate all types of bridge structures out of a single parametric file.

RESULTS

Methodology. Advantages of parametric modelling

In parametric modelling, the script developer enters parameters that serve as the basis for creating geometry and then performing all the necessary analyses and calculations. To simplify the process, complex structures can be divided into manageable components, such as the main bridge, approach bridges and auxiliary structures. Then, by combining these individual sections, a single visual model can be created that provides a comprehensive view of the overall structure.

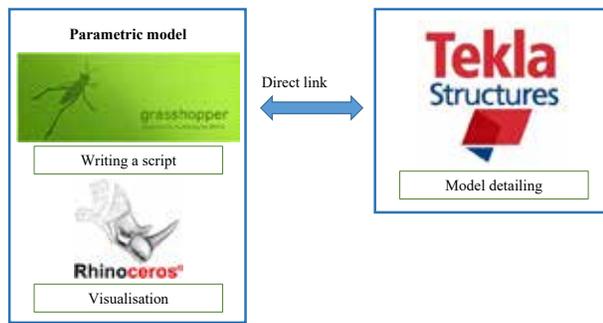
The methodology described in this article aims to overcome the limitations that arise in the design process by using the tools available in the Grasshopper environment, which uses visual scripts and does not require the designer to have programming skills.

The article also discusses examples of developed parametric bridge elements, using which it is possible to speed up the process of creating and modifying parametric models of a structure without the need for manual adjustment of individual components. This innovation is aimed at optimising the design process, increasing work productivity and reducing the likelihood of errors. The parametric elements required in the project are developed in the BIM environment and then connected to form a single structural organism. The direct link between Grasshopper and Tekla Structures enables the entire process to be completed. With direct links between software such as Tekla Structures and visual programming tools such as Grasshopper, designers can implement the workflow without programming experience. The process of interaction between information modelling and visual programming software is briefly presented in Pic. 1.

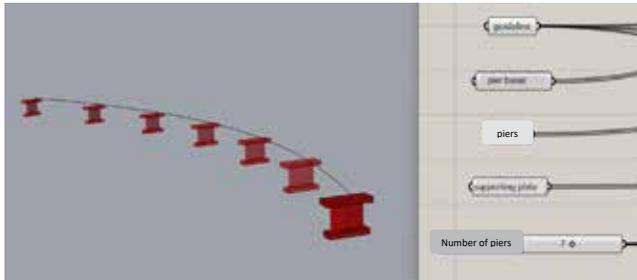
Stages of creating parametric elements

The application of algorithmic design in bridge construction offers promising opportunities for innovation. To illustrate this potential, let's consider the example of creating parametric elements for a bridge in the Republic of Myanmar.

A bridge is always built from scratch, from the piers to the deck [7]. This is well suited for modelling. In the Grasshopper environment, the user can define the bridge axis by specifying three points (coordinates of the start, middle and end



Pic. 1. Workflow between Grasshopper and Tekla Structures [performed by the author].



Pic. 2. A simple Grasshopper script for concrete bridge piers [performed by the author].

points) or directly extract a curve from the bridge axis by re-parameterising the geometry obtained from direct modelling using the «curve» element. The user can then simply create a script to build the piers according to the bridge axis. To obtain a stable and convenient model for the designer, users can split the model into several sub-models associated with each bridge element (deck, piers, guardrails, etc.). Pic. 2 shows a script developed for bridge piers.

The next step is to design the bridge beam elements. The beams provide the primary support for the bridge deck and transfer the weight to the piers. Since the «I» shape is structurally efficient, the beams are often shaped like this. The top and bottom flanges of the «I» shape provide horizontal support and resistance to bending, while a vertical web connects two flanges and provides resistance to shear pressure. In Grasshopper, I-beams are created by first defining a profile and then using various elements to build the geometry. The beams are designed in such a way that the user can modify the section specifications as desired.

The beam is created using polylines, which are then segmented based on connection points or length specifications. Regions can be defined in the structural model where the beam properties change, such as the effective width of concrete elements or the cross-sectional properties of a solid beam. These parameters can be modified

using a parametric approach. For example, a parametric I-beam was created using a BIM-based algorithm (Pic. 3), demonstrating the potential of this approach.

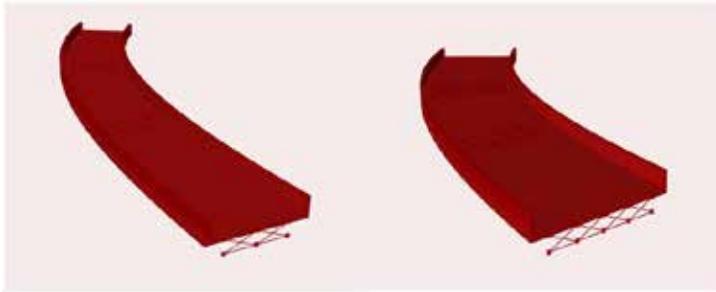
The creation of a bridge span is usually one of the challenging aspects for designers due to the uniqueness of the input data, which is the guide curve for the bridge [8]. The length of the bridge and other characteristics are considered when arranging the piers. The script allows creating piers of different lengths and connecting them to the main beams or cross beams [9]. During the modelling process, it is possible to select different types of cross beam profiles and their number depending on the features. To prove the adaptability to changes in parameter values and conditions, the geometry generation process goes through several stages. Once the Grasshopper bridge model is completed, it can be used as a template for other projects by connecting it to the database [10; 11]. The result of using the bridge deck width parameterisation and how it changes when the parameter related to the number of beams changes is shown in Pic. 4.

With direct connections between BIM software such as Tekla Structures and visual programming tools such as Grasshopper, designers can implement a parametric workflow without prior programming experience [12].

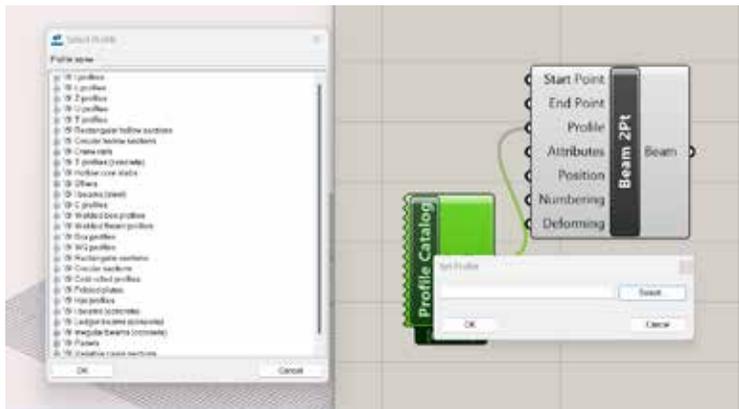




Pic. 3. Parametric I-beams in Grasshopper and Tekla Structures [performed by the author].



Pic. 4. The number of beams determines the change in the deck of the bridge [performed by the author].



Pic. 5. Large number of profiles in Tekla plugin in Grasshopper [performed by the author].

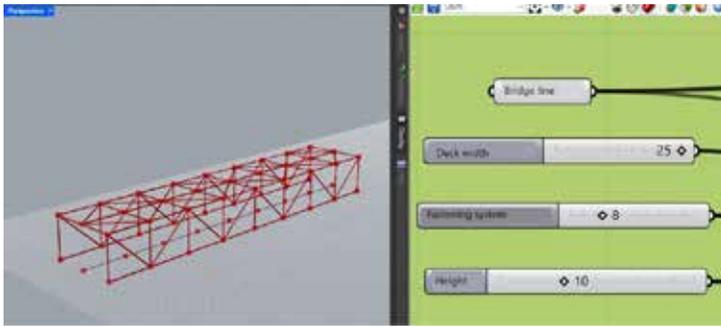
If desired, the user only needs to generate a Grasshopper-based element, add it to the Tekla component catalogue, and use it with ease. Since Tekla offers an extensive library of profiles for different sections (Pic. 5), the software is particularly effective in developing parametric parts for bridges [13].

By working on computer-aided design using algorithms, designers can overcome the limitations of standard CAD software and 3D computer graphics tools, achieving a degree of complexity beyond the ability of humans to interact with digital objects [14]. To take advantage of these capabilities, the operator must be familiar with the basics of programming

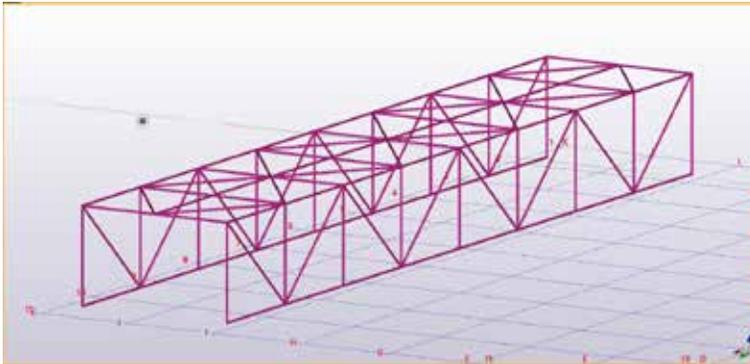
languages such as C# or Python.

A simplified parametric design of a steel truss for a bridge is shown in the final section of this study. Developing a simple and efficient process that is useful during conceptual design, early reviews and decision making is the goal while we continue to work on parametric elements for all the many bridge types that Grasshopper offers.

Creating a parametric frame in Grasshopper involves using a variety of elements and tools to define parameters, relationships and geometry. To create such a design, it is necessary to define key parameters, establish algorithms or mathematical relationships that govern the frame geometry and structural elements, and use Grasshopper elements



Pic. 6. Parametric truss section in Grasshopper [performed by the author].



Pic. 7. Parametric truss section in Tekla Structures [performed by the author].

to transfer these rules into a parametric 3D model. Through this iterative process, designers can refine and optimise the design according to the stated goals and constraints. The final result is a parametric truss that is easily adaptable to changing design requirements and is automatically updated in Tekla Structures (Pic. 6; 7).

CONCLUSIONS

The integration of modern technologies into design, construction and operation of transport infrastructure allows finding effective and optimal solutions at any stage of the life cycle of the structure [15; 16]. Using plug-ins to combine specialised software with information modelling, operators and designers can minimise the likelihood of errors and optimise the design process. The implementation of additional programs and plug-ins facilitates creation of an information model of the bridge, as well as execution of necessary calculations at any stage of the facility's operation, considering the results of monitoring. In addition, parametric modelling allows engineers to work with complex geometry, automate repetitive design tasks and create customised workflows, thereby optimising the design process and increasing overall efficiency.

In the presented work, parametric elements for bridges are created using Grasshopper add-in, a visual programming language and environment that enables creation of a flexible generative model ready for testing in Tekla Structures. The algorithm generates the geometry of bridge elements based on parametric input parameters, where each structural element has its own set of input values that define the dimensions of the geometry. By changing these input values, the width, height, length, and inclination of individual structural elements can be changed. An operator query determines which values need to be parameterised, allowing for efficient and targeted design changes. The proposed visual scenarios demonstrate improved performance in terms of computational costs and resource-efficient design and analysis, outperforming traditional incompatible processes. This approach enables the efficient creation of bridges with complex geometries and facilitates the optimisation of design parameters, ultimately reducing the time and resources required for design and analysis.

REFERENCES

1. Svoboda, L., Novák, J., Kurilla, L., Zeman, J. A framework for integrated design of



algorithmic architectural forms. *Advances in Engineering Software*, 2014, Vol. 72, pp. 109–118. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.05.006.

2. Chokhachian, A. Studies on Architecture Design Procedure A Framework for Parametric Design Thinking. Thesis for: Master of Science in Architecture, 2014. [Electronic resource]: <https://www.researchgate.net/publication/261182442>. Last accessed 27.12.2023.

3. Quispe, L., Ulloa, W. Application of BIM Tools in Parametric and Generative Design for the Conception of Complex Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, Vol. 1203, 022070. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/2/022070.

4. Smirnova, O. V., Jo, S. A. Adaptation capabilities of the Tekla program for designing of steel bridge elements. *Transport construction*, 2017, Iss. 10, pp. 20–21. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34957184>. EDN: XNZIMP.

5. Smirnova, O. V., Smirnov, K. V. Creating automation tools with BIM-programs for designing elements of metal bridges. Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2017, St. Petersburg, 2017, pp. 773–775. DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085940.

6. Sardone, L., Greco, R., Fiore, A., Moccia, C., Tommasi De, D., Lagaros, N. D. A preliminary study on a variable section beam through Algorithm-Aided Design: A way to connect architectural shape and structural optimization. *Procedia Manufacturing*, 2020, Vol. 44, pp. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.264>.

7. Reis, A. J., Oliveira Pedro, J. J. Bridge Design: Concepts and Analysis. Wiley, 2019, 552 p. ISBN: 978-0-470-84363-5.

8. Girardet, A., Boston, C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis. *Automation in Construction*, 2021, Vol. 126, 103679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103679>.

9. Win Ko Myint Thu. Possibilities and advantages of using parametric scripts in

information modelling of bridge structure. *Transport construction*, 2024, Iss. 2, pp. 27–29. EDN: AYYRUK.

10. Katz, C. Parametric Description of Bridge Structures. Proceedings of the IABSE Conference on Information and Communication Technology for Bridges, Buildings and Construction Practice, Helsinki, Finland, 2008. In: IABSE Reports, 2008, No. 94, pp. 17–27. DOI: 10.2749/222137808796105847.

11. Humppi, H. Algorithm-Aided Building Information Modeling: Connecting Algorithm-Aided Design and Object-Oriented Design. Tampere University of Technology School of Architecture Master's Thesis, 2015. [Electronic resource]: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/123456789/23492/3/Humppi.pdf>. Last accessed 15.12.2023.

12. Preisinger, C. Linking Structure and Parametric Geometry. *Architectural Design*, 2013, Vol. 83, Iss. 2, Special Issue: Computation Works: the Building of Algorithmic Thought, pp. 110–113. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1564>.

13. Boretti, V., Sardone, L., Bohórquez Graterón, L. A., Masera, D., Marano, G. C., Domaneschi, M. Algorithm-Aided Design for Composite Bridges. *Buildings*, 2023, Vol. 13, Iss. 4, Special Issue Study on Building Simulation, 865. DOI: 10.3390/buildings13040865.

14. Ibrahim, R., Rahimian F. P. Comparison of CAD and manual sketching tools for teaching architectural design. *Automation in Construction*, 2010, Vol. 19, Iss 8, pp. 978–987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.003>.

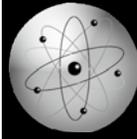
15. Ge Gao, Yu-Shen Liu, Pengpeng Lin, Meng Wang, Ming Gu, Jun-Hai Yong. BIMTag; Concept-based automatic semantic annotation of online BIM product resources. *Advanced Engineering Informatics*, 2017, Iss. 31, pp. 48–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.10.003>.

16. Xichen Chen, Chang-Richards, A., Pelosi, A., Yaodong Jia. Implementation of technologies in the construction industry: a systematic review. *Engineering Construction & Architectural Management*, 2021, Vol. 29, Iss. 8, pp. 3181–3209. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0172>.

Information about the author:

Win Ko Myint Thu, Ph. D. Student at the Department of Computer Aided Design Systems of Russian University of Transport, Moscow, Russia / Magway, Myanmar, winkomyinthu@mail.ru.

Article received 12.12.2023, updated 29.07.2024, approved 26.08.2024, accepted 30.08.2024.



Study of Liquid Cargo Influence on Frequency Characteristics of Tank Wagon Boiler Shell



Pavel S. GRIGOREV



Sergey N. KORZHIN



Sherzod R. IBODULLOEV

*Pavel S. Grigorev*¹, *Sergey N. Korzhin*², *Sherzod R. Ibodulloev*³

¹ *Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

³ *National Research University «Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanisation Engineers», Tashkent, Republic of Uzbekistan.*

¹ *ORCID 0000-0002-5841-341X; Scopus Author ID: 57966694500; Russian Science Citation Index SPIN-code: 2014-9531; Russian Science Citation Index Author ID: 841994.*

² *ORCID 0009-0003-4783-3413; Scopus Author ID: 57223093144; Russian Science Citation Index Author ID: 4350996.*

³ *ORCID 0000-0002-1436-3844; Scopus Author ID: 57982866900; Russian Science Citation Index SPIN-code: 8498-3972; Russian Science Citation Index Author ID: 947316.*

✉ ¹ *grigorev.p@gmail.com.*

ABSTRACT

The article is devoted to the study of the effect of the fill level of liquid cargo on frequency characteristics of the shell of a tank wagon boiler.

The study has applied within its framework an approach used to estimate the frequencies and modes of natural oscillations of steel tanks under the influence of seismic loads. This approach assumes considering two components of natural frequencies: pulse and convective ones. To determine the listed frequencies and modes of natural oscillations, the finite element method using FLUID221

acoustic elements was selected. The choice of the method is justified in the previous studies of the authors.

Using the selected method, convective natural frequencies of oscillations of the free surface of the liquid and pulsed frequencies of natural oscillations with different fill levels of the tank wagon boiler with liquid cargo were studied. Confirmation of reliability of the results for pulse frequencies of the shell containing the liquid is ensured by consistency with the data obtained by the authors in previous works using the semi-momentless theory of shells.

Keywords: railways, tank wagon, tank wagon boiler, oscillation frequencies, oscillation forms, free surface, convective frequencies, pulse frequencies.

For citation: Grigorev, P. S., Korzhin, S. N., Ibodulloev, Sh. R. Study of Liquid Cargo Influence on Frequency Characteristics of Tank Wagon Boiler Shell. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 183–189. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-6>.

**The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.**

INTRODUCTION

In the process of developing railway rolling stock design, the main focus is on conducting comprehensive studies aimed at a thorough assessment of the dynamic characteristics. Such studies are critically important due to the specific operating conditions in which wagon structures operate. In particular, the analysis of natural frequencies of oscillations and their modal forms for cargo wagons becomes an integral element of the design¹, ensuring safe and reliable operation of the wagon structure. Understanding the frequency characteristics of structures allows engineers to prevent dangerous resonance phenomena that can lead to emergency situations.

The main *objective* of the study is to assess the natural frequencies and vibration modes of the tank wagon boiler shell. One of the key problems complicating the process of calculating these parameters is the need to consider the characteristics of the transported cargo. In this regard, the main purpose of the study is to consider the interaction of the cargo with the tank wagon boiler structure, which, as practice and theoretical studies show, has a noticeable effect on the frequency characteristics of the system. In calculation practice, considering liquid in tanks subject to various types of dynamic loads requires special attention during design to ensure safety and reliability of the structure.

REVIEW OF THE SOURCES

Problems of this kind are given much attention in the field of calculations of steel tanks for seismic impacts. The basis for calculating the mathematical model of the «tank – liquid» system was laid in 1954 by G. W. Housner in his work [1]. This approach considered a simplified mathematical model consisting of a system of discrete masses, which made it possible to significantly simplify the process of calculating hydrodynamic forces. The proposed model included two types of kinematic freedom: impulsive, which related to movement of the tank shell together with the main mass of its contents, and convective, associated with movement of waves on the surface of the liquid inside. Based on the assumption that the container walls are absolutely non-deformable, and the liquid is ideally incompressible and has no internal

¹ GOST [Russian state standard] 33788–2016 «Cargo and passenger cars. Methods of testing for strength and dynamic properties». [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200137251>. Last accessed 21.02.2024.

friction, G. W. Housner applied simplified computational approaches to deriving formulas related to a number of different types of containers, including cylindrical ones. Currently, in some countries, the Haroun and Housner model [2] is used for tanks with flexible walls, and the Veletsos and Yang model [3] is used for tanks with rigid walls. In domestic calculation practices, the recommendations developed by I. I. Goldenblat and N. A. Nikolaenko [4] have become widespread.

For the problem under consideration, the expression for determining the splash frequency of the free surface of a liquid is of interest:

$$\omega_n = \frac{g}{R} \lambda_n \operatorname{th} \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right), \quad (1)$$

where λ_n are the zeros of the modified Bessel function (to determine the first form of the splash wave, λ_n is taken to be equal to 1,84);

n – oscillation mode,

g – acceleration of gravity,

H – height of a cylindrical tank,

R – inner radius of a tank.

Despite the rather extensive research in the field of estimating the frequencies of liquid tanks, considering both convective and impulsive frequencies, such calculations have not been performed for tank wagon boiler shells. The works [5; 6] consider analytical approaches to estimating the frequency characteristics of tank wagon boiler shells, considering the level of filling them with liquid cargo. The results of these calculations showed satisfactory agreement with the results obtained by researchers earlier [6] and the results obtained based on experimental studies [7; 8].

The authors of the article [9] considered approaches to estimating the natural frequencies of tank wagon boilers and various methods for estimating the effect of liquid on natural oscillations using numerical methods. Such methods include the analysis of natural frequencies using the Acoustic body extension, accounting for liquid as a distributed mass, modelling liquid as a solid body, using the FLUID80 element and applying acoustic elements.

According to the results of the conducted study, the most acceptable approach was to consider the liquid inside the tank using acoustic elements.

The article [10] shows an example of calculating the frequency characteristics, including natural frequencies and oscillation

modes of a square tank using the finite element method with the FLUID221 acoustic elements. This approach made it possible to estimate the impulsive and convective frequencies of the tank at different fill levels and under different conditions. The reliability of the approach considered is described in detail in [11; 12] by comparing various analytical and numerical methods for estimating the frequencies of natural vibrations of the «mechanical system – liquid» system or the so-called fluid structure interaction (FSI).

The work [11] considered several options for numerical modelling of considering liquid as an acoustic body, including as the FLUID80 liquid element and as various types of the FLUID30/220/221 liquid acoustic element.

MATERIALS AND METHODS

FLUID80

The FLUID80 element is a single fluid element that uses the material properties of density (DENS) and bulk modulus (EX). Separate but coincident nodes are used to model the fluid–solid interaction at the FSI interface. These nodes are connected to the solid such that they can slide in the tangential direction relative to the body but are bonded in the normal direction. This can be achieved by creating appropriate meshes at the fluid–solid interface and at the solid–fluid interface. The coincident nodes are then connected in the normal direction. These elements have the degrees of freedom UX, UY, and UZ. In [13; 14], this element is applied to model liquid storage tanks. Note that the Block Lanczos method [15; 16] is also suitable for these elements. The element can generate several low-frequency sloshing modes of fluid oscillations that can occur with little or no motion of the solids. Therefore, it is recommended to skip or ignore low-frequency fluid modes when evaluating the pulse frequencies of natural oscillations. These modes can also be identified by their low mass participation coefficient.

FLUID30, FLUID220, and FLUID221

FLUID30 is an acoustic fluid element that shares nodes with neighbouring solid elements. This element uses the fluid density (DENS) and sound velocity (SONC) to define the material properties. Previously, the FLUID30 element used an asymmetric matrix, which required an asymmetric solver. Accordingly, the modal analysis could not be accompanied by forced

response and power spectral density analysis. To model the fluid-solid interaction (FSI), two types of FLUID30 elements were used: fluid adjacent to the solid and fluid not in contact with the solid. The fluid adjacent to the solid has the degrees of freedom UX, UY, UZ, and pressure (PRES) to describe the interaction between the solid and the fluid. The fluid that does not interact with the solid has the degree of freedom PRES only to interact with other fluid elements. Later, FLUID30 elements were used, allowing creation of a symmetric matrix. Unlike FLUID80 elements, FLUID30 elements are less sensitive to grid density.

FLUID220 and FLUID221 are higher-order variants of FLUID30.

Based on the analysis of practical calculations, we will use the FLUID221 element, which is a three-dimensional solid 20-node element of higher order (see Pic. 1). The FLUID221 element is used to model a liquid medium and an interface in problems of fluid-structure interaction.

Initial data

Further in the calculations we will use the following initial data, shown in Table 1.

The following assumptions are accepted for further calculations:

- The liquid is ideal, incompressible.
- The liquid movement is irrotational.
- The boiler shell has an ideal cylindrical shape with elliptical bottoms.

RESULTS AND DISCUSSION

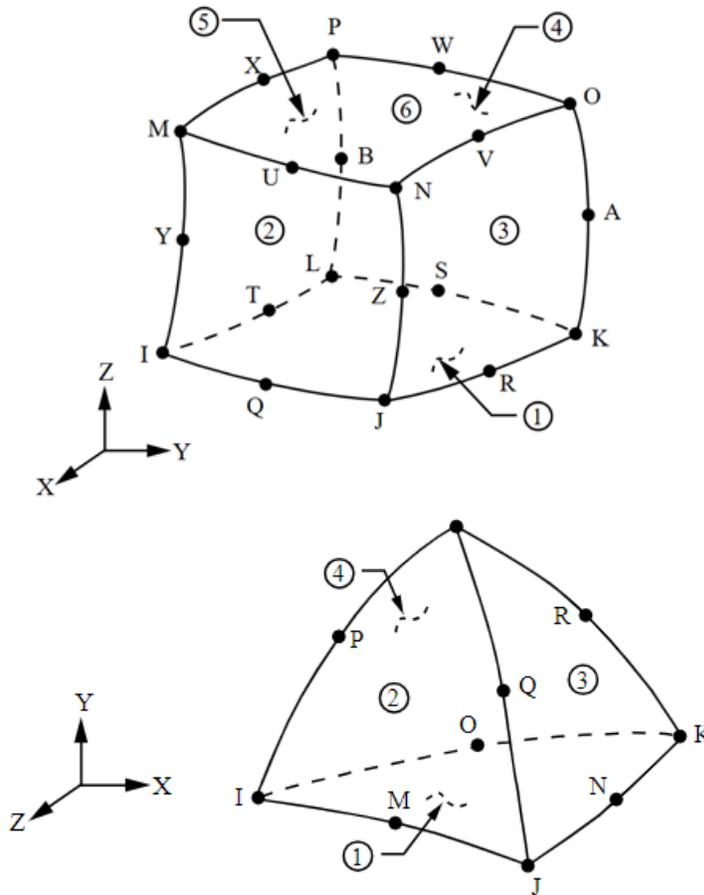
Pics. 2 and 3 show the solid model under study.

For clarity, the Pic. 3 shows a model cut in the XOY plane, and the fill level corresponding to 90° (or a fill factor of 0,5).

The model was divided into elements as follows: elements of the SOLID187 type were used for the solid body, elements of the FLUID221 type were used for the liquid, and the contact between the solid body and the liquid was provided using CONTA174 elements. The CONTA174 element is necessary to create a sliding contact between the elements of the solid body and the liquid.

The first forms of oscillations of pulse and convective frequencies are shown in Pics. 4 and 5, respectively. Table 2 shows the results obtained using the finite element method and the energy approach [9] proposed by the authors using the semi-momentless shell theory. When comparing the calculation results, it was found that they





Pic. 1. Geometry, location of nodes and coordinate system of the FLUID220 element (left) and FLUID221 element (right) [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_FLUID220.html; https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_FLUID221.html].

correlate fairly well with each other and are in the same frequency range. We consider these results satisfactory.

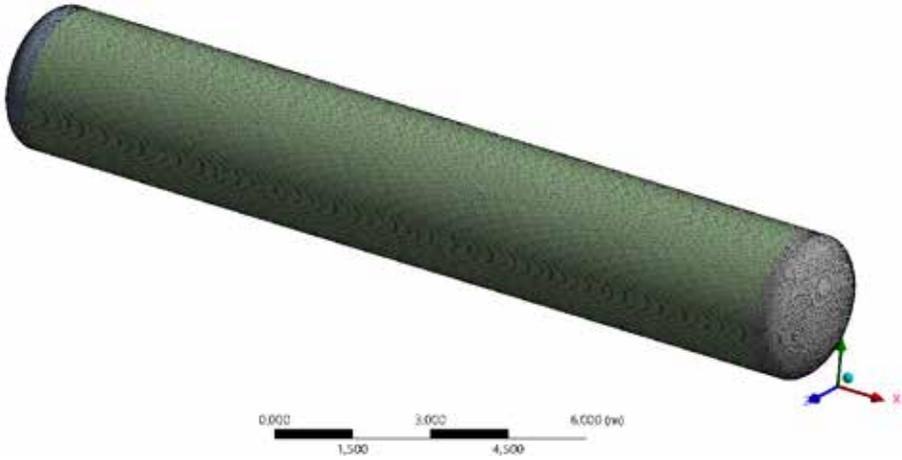
Let us estimate the effect of the liquid on the frequencies of natural oscillations of the shell

itself, that is, on the so-called pulse frequencies. Table 2 clearly shows that with an increase in the filling level, the natural frequency of oscillations decreases. For example, when the fill level changes from 0° to 171°, the natural frequency

Table 1

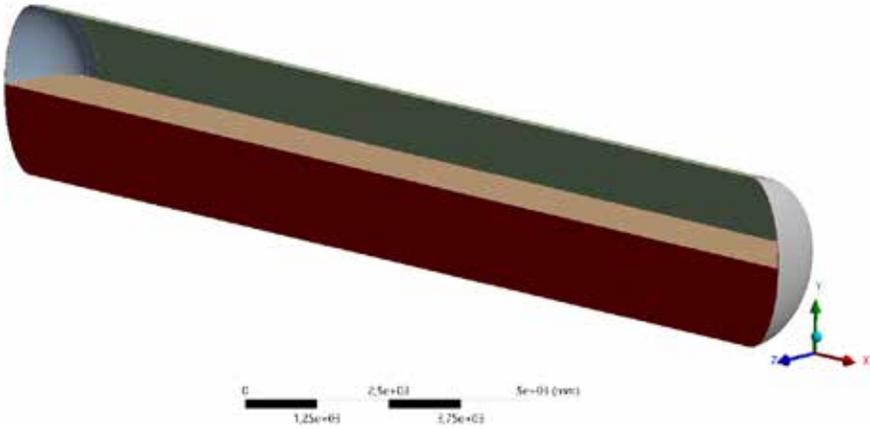
Initial data (performed by the authors)

Designation	Name	Parameter	Dimension
E	Modulus of elasticity of the boiler material	210	GPa
μ	Poisson's ratio	0,3	–
g	Acceleration of gravity	9,81	m/s ²
ρ_{st}	Density of the shell material	7850	kg/m ³
ρ_l	Density of liquid cargo material	1000	kg/m ³
C	Velocity in the acoustic environment of liquid cargo	1435	m/s
D	Inner diameter of the cylindrical part of the shell	3	m
h	Boiler shell thickness	10	mm
L_c	Length of the cylindrical part of the shell	17	m
L_{bot}	Length of the elliptical bottom overhang	0,45	m
β_{fill}	Liquid cargo filling angle	0° – 180°	–



Pic. 2. General view of the solid model [performed by the authors].

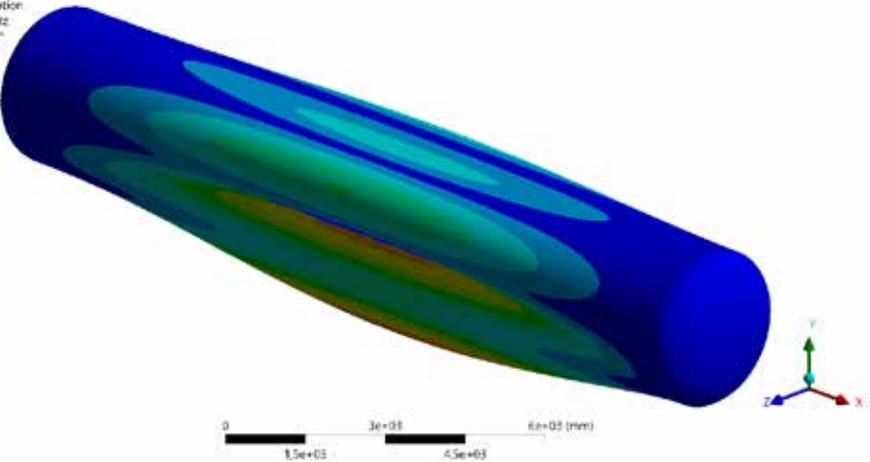
F: Copy of Импулсиш_17 м_10 мм_90 град
 Solution
 Frequency: N/A
 15.01.2024 17:49



Pic. 3. Finite element model of the boiler shell [performed by the authors].

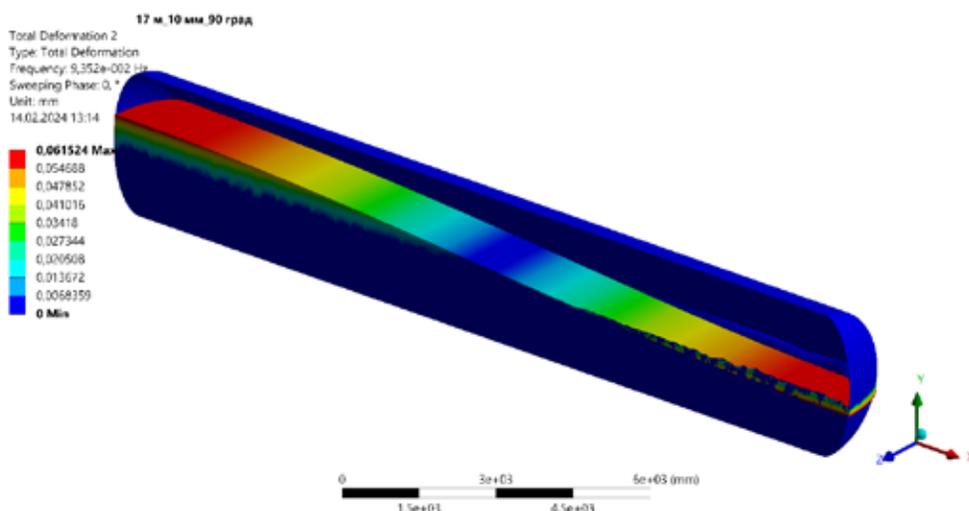
E: Импулсиш_17 м_10 мм_90 град
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Frequency: 4,8551 Hz
 Sweeping Phase: 0 °
 Unit: mm
 22.02.2024 16:45

0,012134 Max
 0,010705
 0,0094372
 0,008089
 0,007409
 0,0053927
 0,0040445
 0,0026903
 0,0013482
 0 Min



Pic. 4. The first natural form of pulse oscillations of the shell of a tank wagon boiler filled with liquid [performed by the authors].





Pic. 5. The first convective form of oscillations of the free surface of a liquid [performed by the authors].

of oscillations of the shell of the model under consideration decreases by more than 50 %.

Convective frequencies deserve special attention. The study of liquid splashing in the boiler of a tank wagon is an urgent and rather complex task. In Table 2, opposite each fill level, two frequencies of pulse oscillations of the free surface of the liquid f_{conv} are presented. The first frequency corresponds to one half-wave of oscillations of the liquid in the longitudinal direction, the second – to one half-wave of liquid oscillations in the transverse direction. In our opinion, these types of liquid oscillations are easily excited when a tank wagon moves along uneven track surfaces. For example, if the tank wagon boiler is filled to a filling angle of 153° and forced oscillations occur with a galloping frequency of 0,19 Hz, this can lead to liquid movements that affect the dynamics of the wagon.

CONCLUSIONS

The frequencies and modes of natural oscillations of the tank wagon boiler shell were calculated considering different levels of filling it with liquid cargo. The calculation was performed using the finite element method, in which the FLUID221 element was used. This approach made it possible to obtain two types of natural frequencies – pulse and convective ones. The calculation results showed satisfactory convergence with the approaches proposed by the authors for solving similar problems in their previous works based on energy approaches and shell theory.

Based on the results of the studies, the following conclusions can be made:

- The use of the finite element method and the energy approach based on shell theory gives similar results in estimating the pulse frequencies of natural oscillations.

Table 2

Calculated values of pulse and convective frequencies [performed by the authors]

Fill level	Natural frequency of the shell considering the liquid (pulse frequency)		Natural frequency of the free surface of a liquid (convective frequency)	
β_{fill}	f_{pulse} , Hz		f_{conv} , Hz	
	Energy approach	FEM	FEM	
171°	4,12	4,24	0,32	–
153°	4,17	4,35	0,19	0,83
126°	4,15	4,52	0,13	0,59
90°	5,45	4,86	0,093	0,47
54°	7,69	6,21	0,057	0,42
0°	10,81	10,89	–	

– The approach used in the study allows us to estimate the convective natural frequencies of the free surface of the liquid, which are significantly lower than the pulse frequencies.

– Filling the tank wagon boiler with liquid cargo significantly reduces the natural frequency of its shell. For the case under consideration, filling with liquid leads to a decrease in the natural frequency of the boiler by more than 57 %.

– The convective frequency of the free surface of the liquid increases with the increase in the fill level of the liquid cargo.

– In the strength calculations of tank wagon boilers, attention should be paid to the change in the natural frequency of its shell when they are filled with liquid cargo.

REFERENCES

1. Housner, G. W. Earthquake Pressures on Fluid Containers. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1954, 42 p.
2. Haroun, M. A., Housner, G. W. Seismic design of liquid storage tanks. *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 1981, Vol. 107, Iss. 1, pp. 191–207. DOI: <https://doi.org/10.1061/JTCAD9.0000080>.
3. Veletsos, A. S., Yang, J. Y. Earthquake response of liquid storage tanks. In: *Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics*, Second Annual Engineering Mechanics Division Specialty Conference, Raleigh, North Carolina, United States, May 23–25, 1977, 616 p., pp. 1–24.
4. Goldenblat, I. I., Nikolaenko, N. A., Shtol, A. T., Tumasov, V. R. Recommendations for the calculation of reservoirs and gas holders regarding seismic impacts [*Rekomendatsii po raschetu rezervuarov i gazgolderov na seismicheskoe vozdeistviya*]. Central Scientific Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko of the USSR State Construction Committee. Moscow, Stroyizdat publ., 1969, 47 p.
5. Grygoriyev, P. S., Suvorova, K. E. The assessment of free frequency and dynamic stress encased in a tank shell [*Otsenka chastot sobstvennykh kolebaniy i dinamicheskikh napryazheniy v obolochke kotla tsisterny*]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2017, Iss. 4, pp. 637–643. EDN: YMOZLU.
6. Tran Phu Thuan, Grigoriev, P. S., Suvorova, K. E. Calculated Dependencies and Estimates of Frequencies and Vibration Modes of Shells of Rail Tank Wagons. *World of Transport and Transportation*, 2018, Iss. 5 (78), pp. 84–90. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-5-7>.
7. Morzinova, T. G. Oscillations of boiler shells of tanks considering their design features. Ph.D. (Eng) thesis [Kolebaniya obolochek kotlov tsistern s uchetom ikh konstruktivnykh osobennostei. Dis...kand.tekh.nauk]. Moscow, MIIT publ., 1983, 118 p.
8. Bepalko, S. V. Development and analysis of models of damaging effects on tank boilers for transportation of cryogenic products. D.Sc. (Eng) thesis [*Razrabotka i analiz modelei povrezhdayushchikh vozdeistviy na kotly tsistern dlya perevozki kriogennykh produktov*]. Dis..dokt.tekh.nauk]. Moscow, MIIT publ., 2000, 427 p.
9. Grigorev, P. S., Tran Phu Thuan, Ibodulloev, Sh. R. Approaches to assessing the natural frequencies of tank wagon boilers considering the influence of liquid. *Rakhmatullin readings: Abstract of the report of the international scientific and practical conference* / compiled by A. Kh. Zakirov, Sh. R. Ibodulloev. Tashkent, National University of Uzbekistan, 2023, pp. 51–52.
10. Anagha, B. V., Nimisha, P., Jayalekshmi, B. R. A study on effect of fluid on the modal characteristics of ground supported water tanks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 936, Iss. 1, 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/936/1/012027>.
11. Rafatpanah, R. M., Yang, Jianfeng. Simulating fluid-structure interaction utilizing three-dimensional acoustic fluid elements for reactor equipment system model. *Proceedings of the 23rd international conference on nuclear engineering*, 2015, ICONE23–1732, pp. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2015.23._ICONE23-1_362.
12. Chiu, J., Brown, A. M. Characterization of the modal characteristics of structures operating in dense liquid turbopumps. In: *ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, June 26–30, 2017, Charlotte, North Carolina, USA. Vol. 7B: Structures and Dynamics, ISBN: 978-0-7918-5093-0, paper No. GT2017-63633, V07BT36A008. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2017-63633> [Limited access to subscribers].
13. Kangda, M. Z. An approach to finite element modeling of liquid storage tanks in ANSYS: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, Vol. 6, Iss. 4, 226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00589-8>.
14. Jhung, Myung Jo; Yu, Seon-Oh; Lim, Yeong-Taek. Dynamic characteristics of a partially fluid filled cylindrical shell. *Nuclear Engineering and Technology*, 2011, Vol. 43, Iss. 2, pp. 167–174. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.2011.43.2.167>.
15. Vakhidov, U. Sh., Sogin, A. V., Shapkin, V. A., Shapkina, Yu. V. Numerical studies of vibrations of vehicle units [*Chislennye issledovaniya kolebaniy uzlov avtomobilei*]. *Proceedings of R. E. Alekseev NSTU*, 2014, Iss. 3 (105), pp. 145–153. [Electronic resource]: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2014/03/145-153.pdf>. Last accessed 19.02.2024.
16. Zhang, X., Zhao, Y., Li, Sh. FEM modal analysis of vehicle frame based on ANSYS. *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*. IEEE, Xianning, China, 2011, pp. 2237–2240. DOI: <https://doi.org/10.1109/CECNET.2011.5768490> [limited access for subscribers]. ●

Information about the authors:

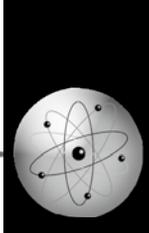
Grigorev, Pavel S., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Electric Trains and Locomotives of the Institute of Transport Engineering and Control Systems of the Russian University of Transport, Moscow, Russia, grigorev.p@gmail.com.

Korzhin, Sergey N., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Wagons and Wagon Facilities of the Institute of Transport Engineering and Control Systems of Russian University of Transport, Moscow, Russia, korzhin@mit.ru.

Ibodulloev, Sherzod R., Senior Lecturer at the Department of Mechanics and Computer Modelling of National Research University «Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanisation Engineers», Tashkent, Republic of Uzbekistan, sherzod_uzmu@inbox.ru.

Article received 20.02.2024, approved 28.04.2024, accepted 30.04.2024.





REVIEW ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-7>

Analysis of the Patent Activity in the Field of Racing Cars



Roman S. NIKOLAEV



Olga A. ZHDANOVICH

Roman S. Nikolaev¹, Olga A. Zhdanovich²

^{1,2}Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.

² Russian Science Citation Index SPIN-code: 9956–6500; Russian Science Citation Index Author ID: 711591.

✉ ¹ r.s.nikolaev@mospolytech.ru.

ABSTRACT

Motorsport is one of the fastest growing technological areas, and technical solutions related to racing cars are often subsequently implemented in civilian automobile manufacturing. Thus, development of racing cars has a direct impact on development of the entire automotive industry.

In the framework of the study, a patent search in the field of racing cars was conducted using patent databases; a patent analysis of the market was performed, and the features of patenting individual technical solutions were considered. The objective was to identify trends in development of patent activity in the field of racing car technologies. The purpose was to

identify leading countries and organisations in terms of patent application and activity, and to reveal a common trend for them regarding racing car technologies. The analysis revealed the general dynamics of technology development, characterised by periods of confident growth and decline in activity, and the absolute leadership of China and Chinese organisations in terms of the number of applications and patents. The study can be applied both to determine the dynamics of technology development in the field of racing cars and to establish the level of interest of individual countries, researchers and organisations towards this area.

Keywords: racing car, motorsport, patent analysis, automobile transport, Formula 1 car.

Acknowledgments: the article was developed during the implementation of the «Priority – 2030» strategic academic leadership program.

For citation: Nikolaev, R. S., Zhdanovich, O. A. Analysis of the Patent Activity in the Field of Racing Cars. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 190–196. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-7>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Motorsport is one of the fastest growing technological areas, requiring constant improvement due to its competitive nature. This large industry plays an important role in the economic sector, attracting tourists and fans from all over the world. However, as the popularity of motorsport grows, so do the problems associated with, among other things, the technological side. For example, the impact of this sport threatens the environment [1]. To solve this problem, the process of modernisation of technologies is constantly taking place: e.g., hybrid power plants are integrated into motorsport. Thus, new technologies appear that require legal protection as the results of intellectual activity.

Protection of the results of intellectual activity in the field of racing cars has its own specifics. Often, inventions in this area are not limited to racing competitions but are also used in civil automotive engineering. The results of intellectual property related to racing cars describe not only the racing cars themselves, but also the devices necessary for their operation, design features, parts, control systems and much more. It can be said that motorsport is a kind of «testing ground» for automobile manufacturers wishing to test the latest technological achievements. In addition, racing competitions are a strong impetus for development of technologies, since motorsport is largely based on a technological race, forcing participants to constantly modernise and enrich their own developments. In this regard, relevant are various scientific studies, for example, concerning development of motorsport within a separate municipality [2] for which automotive industry plays the role of urban development backbone. Even more spread are research works analysing the technical side, in particular the design features of racing cars (e.g., [3–8]). It is also worth mentioning research describing various electronic systems for racing cars (e.g., [9–15]).

The *objective* of the study is the analysis of racing car technologies using patent search tools.

The patent search was carried out using the Espacenet patent database by keywords (racing AND car OR racing vehicle; bolide AND car OR bolide AND vehicle; motorsport AND car OR motorsport AND vehicle; formula AND car OR formula AND vehicle), in retrospect from 2012 to 2022, with a restriction on the IPC (International Patent Classification) (B60, B62, B65, B66, F16, G01, G05, G06, H01, H02, H08) and without

restrictions on the countries of the priority application. When analysing patent activity, only patents for inventions and utility models were considered.

RESULTS

Approaches of analysis of patent indicators

The main difference in protection of intellectual property concerning racing car technologies is that it is quite difficult to keep the secret of production within the framework of racing competitions, since, according to the sports regulations, it is strictly forbidden to cover any part of the car with screens, covers and other parts that can hide the design of both the entire car and individual parts in particular (e.g., [16]). Of course, competitors do not have access to the technical side of the designs (drawings and other technical documentation), but engineers who are experts in the field are able to discern an inventive innovation even from the outside.

Most often, authors resort to fixing copyrights in relation to such developments by publishing scientific articles that describe the technical solution to one degree or another, since this is faster and easier.

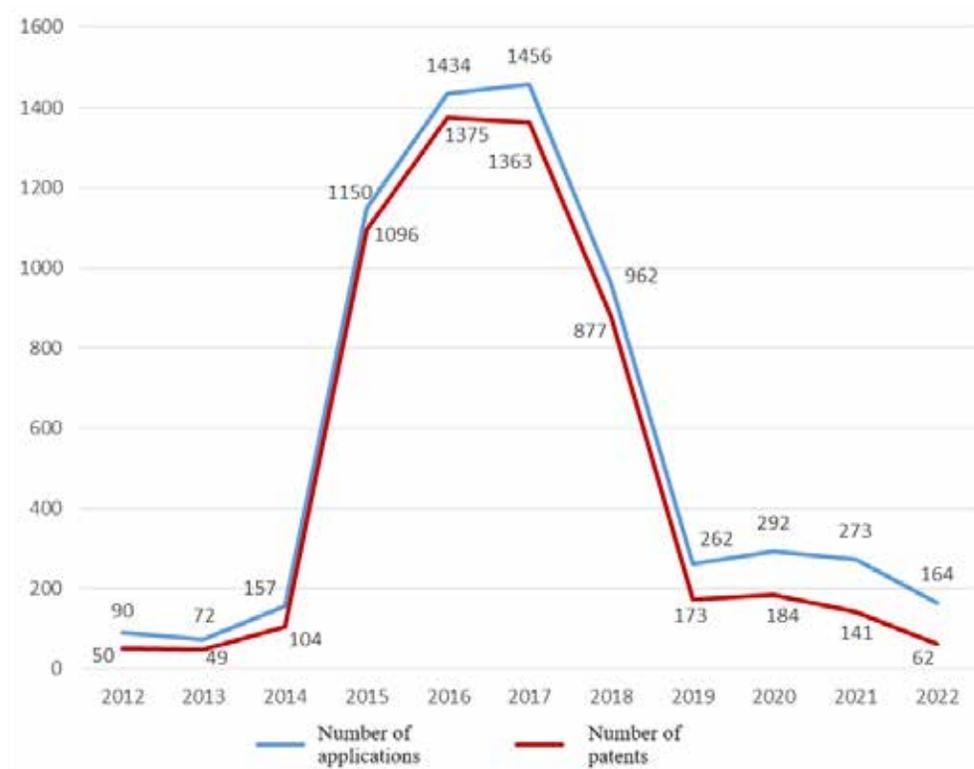
Therefore, it is possible to note in advance a rather low level of patenting in the racing car industry. There are several reasons for this:

- The industry is developing so rapidly that patenting new technologies becomes meaningless. A technical solution may lose its relevance within 3–4 months, and the procedure for obtaining a patent takes an extremely long time, which is critical for such a rapidly developing industry.
- Competitors can easily spy not only on the external expression of design features, but also on the essence of the technical solution.
- Court proceedings on the results of intellectual property in this area are quite expensive and take a lot of time and effort from companies.

- Even though most technical solutions in this area are protected not by patent documents, but by a commercial secrecy regime, there is a risk of disclosure of technical solutions by competitors, for example, with the help of defector employees, etc.

These nuances create a specificity of patent activity in the racing car industry. Probably, most technical solutions remain outside the field of view of patent analysis, due to the above factors. However, the level of patenting revealed by the study is still sufficient to draw conclusions about





Pic. 1. Dynamics of applications and patents for the period 2012–2022 [according to the Espacenet patent database].

the state of the technical industry, the pace of development and future trends. Therefore, the main purpose of the study is to demonstrate the development of patenting in the racing car industry, identify patenting features, as well as leaders among countries and companies.

ANALYSIS RESULTS

Patenting dynamics

The dynamics of applications and issued patents for the period 2012–2022 (Pic. 1) demonstrates the active growth of racing car technologies in 2014, continued until 2017. In 2014–2017, 4197 applications and 3938 patents were registered, which accounts for most of the patent activity for eleven years-long period. The number of registered applications and issued patents is approximately equal, which indicates the patentability of most of the presented technical solutions. In 2018, there was a significant decline in application and patent activity. Subsequently, the dynamics did not reach the previous peak indicators. However, this fact can be explained by the time lag of the patent database, caused by the fact that many patent documents are still undergoing examination procedures, and therefore cannot be reflected in

the open access of the search engine. Nevertheless, now, the results of the patent analysis demonstrate a trend of declining interest in patenting during the period 2018–2022¹.

Patented objects

The racing car technology market is quite diverse and includes many technical solutions aimed at achieving such technical results as safety, efficiency and other performance indicators of the car. A racing car is a complex system that requires both parts and devices as well as electronic systems. Also, depending on the type of competition, the requirements for the design of the car vary greatly. In this analysis, all technical solutions related to racing cars in general were considered, without restraints on the types of competitions.

As an example of such technical solutions, we should consider patent CN108050173B of Taiyuan University of Technology. This invention describes a bionic structure braking system for a Formula 1 racing car and as stated in the description solves the problems of low braking efficiency and short service life of existing braking systems. The described braking system includes a brake disc, a four-piston calliper,

¹ World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 190–196

a guide bolt, two friction blocks and a return spring. This braking system is based on the bionic principle (imitation of a rough surface), which increases the wear resistance of the system.

Also, it is worth considering the patent KR102478299B1 of Honam University Industry (University Cooperation Centre). This invention describes a suspension device of a racing car based on the rolling phenomenon, which helps to improve the stability of the car when turning. According to the description of the invention, when the vehicle makes a sharp turn, the front wheels turn in the direction opposite to the rolling, thereby improving the stability of the vehicle when turning.

Distribution of applications and patent activity by countries and organisations

In the context of application and patent activity of individual countries, it is necessary to highlight the absolute leadership of China. Chinese applications make up 93 % of the total array of technical solutions related to racing cars, and patents – 96 % (according to the patent database Espacenet¹⁾. Such a large gap between Chinese activity and competitors is a consequence of the fact that many foreign companies involved in racing cars outsource the development of technical solutions to Chinese research centres and universities due to lower costs and faster implementation of developments, and they, in turn, secure the results of developments for themselves with the help of patents. This is confirmed by the fact that some patent documents have a priority application from China but are published in a foreign patent office (for example, in the USA, Japan, Italy and other countries).

Among other countries, there are applications from Japan, South Korea, Germany, the USA, France, Russia and other countries but their share, compared to China, in the total array is so small that it is impossible to talk about full-fledged quantitative competition. Chinese patent documents have almost completely filled the market of racing car technologies, and not only on the national territory.

The ranking of the top 10 leading organisations by the number of filed applications and patents (Pic. 2) also demonstrates the absolute leadership of Chinese organisations. Only one organisation (TOSHIBA KK) represents Japan, while the rest of the ranking positions are represented by Chinese companies. Based on the data, it is clear that the distribution of filed applications and

patents is uneven. For example, Guangdong University of Technology (UNIV GUANGDONG TECHNOLOGY in Pic. 3) ranks 3rd with 47 applications and 23 patents. However, State Grid Corporation of China (STATE GRID CORP CHINA) has fewer applications, but more patents (31 applications and 31 patents).

Based on the patent search data, it follows that out of the total array of applicants, universities account for 41 % of organisations, private organisations – for 56 %, and individuals – for 2 %. Private organisations form the largest part of the application and patent activity in the field of racing cars. For example, in the ranking of top organisations regarding patent activity, five out of ten organisations are private organisations, the remaining five positions are represented by universities. Among private organisations, there are both private research centres and large automobile manufacturing companies. For example, in the ranking of leading organisations (Pic. 2) there are such large automobile manufacturing companies as SAIC, FAW, BAIC.

Universities also form a large part of patent and application activity. For example, the Jilin University is the leader of application and patent activity (Pic. 2), entities affiliated with universities occupy five positions among top 10 organisations.

Individuals occupy the smallest share of the total array of application and patent activity. The identified patent documents of individuals describe technical solutions for the entire automotive industry, applicable, among other things, to racing cars, rather than specialised devices exclusively for racing cars. In this case, the value of patents increases, since their area of their application expands, but at the same time this confirms the fact that inventions to be used exclusively in racing cars are patented quite rarely, due to the rapid obsolescence of technical solutions. It is possible to extend the relevance of such a patent in the technology market only by expanding its area of application, therefore, often protected technical solutions in the field of racing cars are also applicable to general automotive engineering.

Publication activity

Special attention should be paid to the analysis of publication activity on racing car technologies. Patents and research publications together provide a complete picture of development of technologies and scientific research. Patents show which technologies are



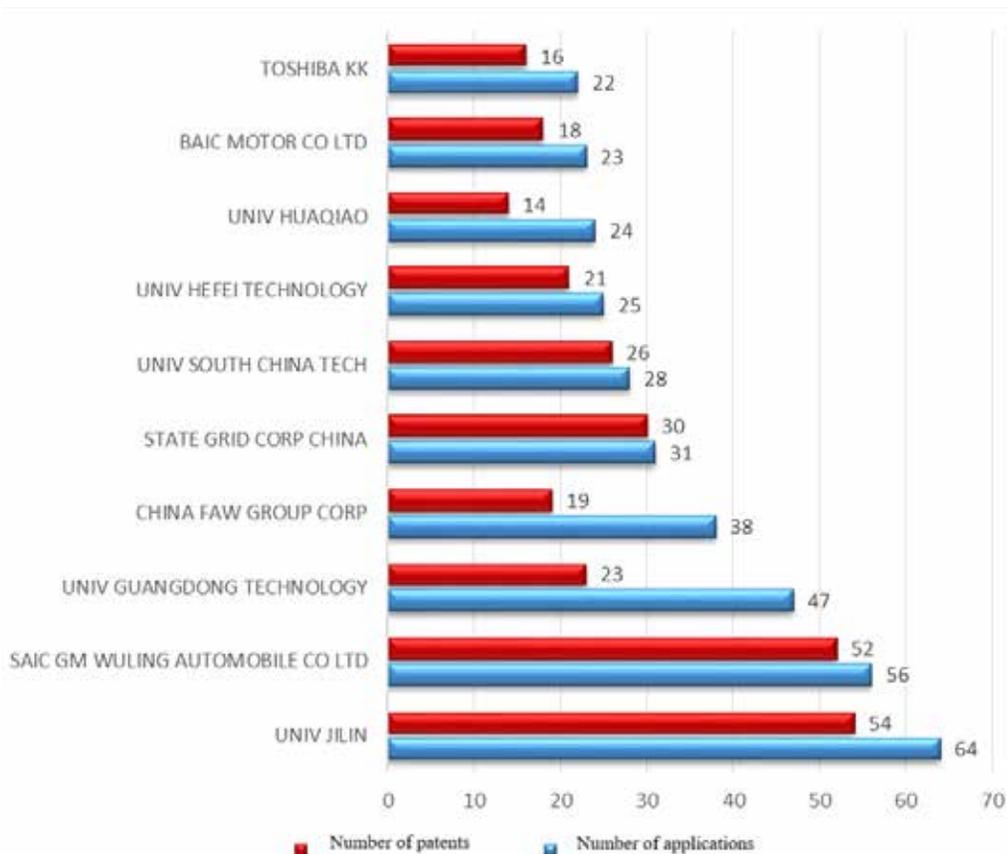


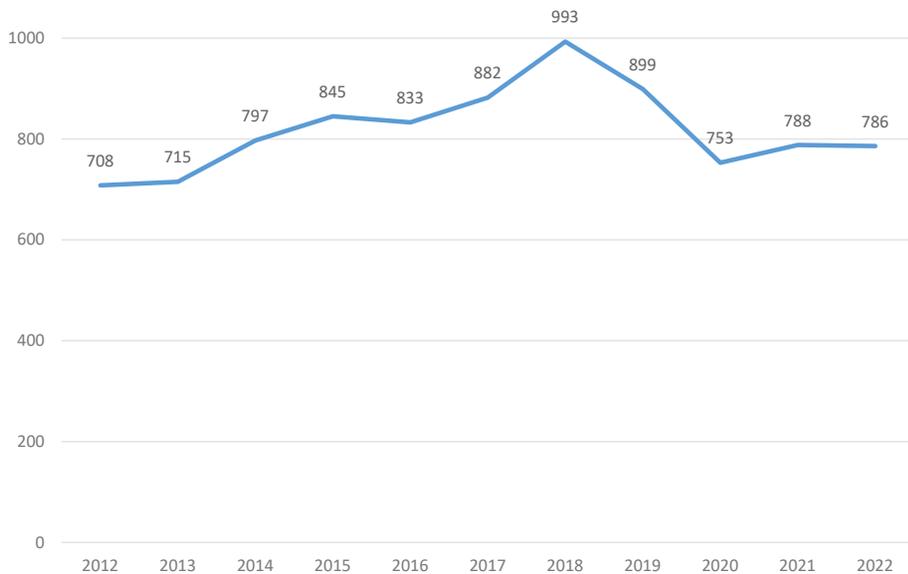
Fig. 2. Number of applications and patents by organisations for the period 2012–2022 [according to the Espacenet patent database¹].

protected and can be commercialised, while scientific publications show what research is being conducted and what areas are considered promising in the academic community. The analysis of publication activity was carried out using keyword searches similar to patent searches, with a limitation on the type of scientific publications (Articles only) in the Dimensions, CORE publication databases, while the main array of scientific publications for analysis was taken from the Open Alex database.

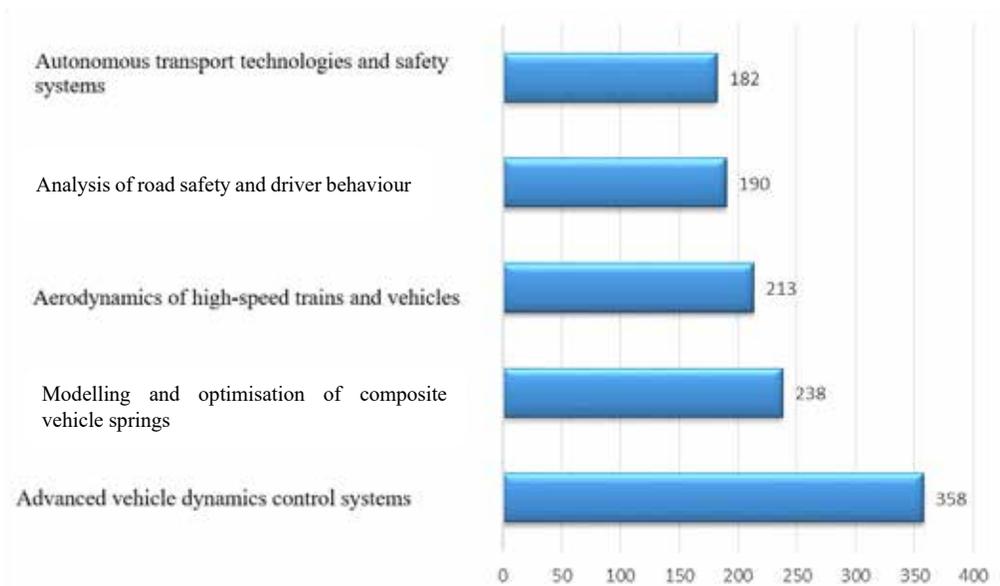
The dynamics of scientific article publications for the period 2012–2022 (Pic. 3) demonstrates a relatively uniform growth in publication activity. For the period 2012–2018, the number of annual publications increased from 708 to 993 publications, which is the peak value for the entire analysed period. However, starting from 2019 and until 2022, the dynamics begin to show downward trends. Thus, during the specified period, the number of publications decreased from 899 to 786, which, however, is not a critical drop in publication activity.

Also, the subject headings to which the mentioned publications belong were analysed (Pic. 4). The largest number of publications (358 publications) were noted in the topic referring to advanced vehicle dynamics control systems, which indicates high interest and active research in this area, possibly due to the relevance and significance of improving the controllability and safety of vehicles. Also, in this ranking were noted publications on the topic of «Modelling and optimisation of composite springs of vehicles» (238 publications), «Aerodynamics of high-speed trains and vehicles» (213 publications) and others.

Thus, publication activity demonstrates a relatively uniform development trend. It is worth noting that the noted decline in the period 2019–2022 is not critical and does not demonstrate a rapid rate of decline in publication activity, however, it should be considered in the long-term analysis of the industry. When comparing patent and publication activity indicators, it is noticeable that the peak values of publication activity are



Pic. 3. Dynamics of publications of scientific articles for the period 2012–2022 [according to the Open Alex database].



Pic. 4. Number of publications of scientific articles by subject topics for the period 2012–2022 [according to the Open Alex database].

much lower than similar values of patent activity. Nevertheless, the rate of development of publication activity demonstrates a more stable nature.

CONCLUSIONS

The patent activity analysis data shows that, in general, the level of patent activity in the racing car field has experienced both

a steady rise and a significant decline. Even though most of the technical solutions are probably protected as know-how and are not available for open patent analysis, it was possible to trace a continuous increase in patent activity over the period 2014–2017. The bulk of the application and patent activity occurred during the above-mentioned period, after which a decline in activity was observed.



Regarding the application and patent activity of individual countries, the undisputed primacy of the world leader – China – was revealed, both in the number of applications related to racing cars and in the number of patents issued. China also leads in the number of the most active organisations and is unlikely to give up its position in the coming years. The leading role in application and patent activity for racing car technologies is played by private organisations and universities, providing most of the technical solutions.

REFERENCES

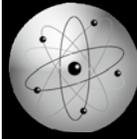
1. Ekanem, I., Ikpe, A., Abia, E. Evolution of formula one (F1) motorsports and its top-notch advancement in engineering innovations across the racing industry. In: Atlas. 11th International Congress on Advanced Scientific Studies and Interdisciplinary Research, Marrakesh, Morocco, January 16–18, 2024. Proceedings Book. Eds. Prof. Abuharris, A., Kidiryüz, M. Liberty Academic Publishers, 2024, pp. 107–127. ISBN: 978–1–955094–94–8.
2. Doronkin, V. G., Lyamin, A. S. Development of automobile sports in Togliatti city: 1966–2016 [Razvitie avtomobilnogo sporta v gorode Tolyatti: 1966–2016]. *Baltic Humanitarian Journal*, 2017, Vol. 6, Iss. 1 (18), pp. 90–93. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28921917>. EDN: YIXJAF. Last accessed 15.05.2023.
3. Bernatsky, V. V., Krasavin, P. A., Martin, G. K. To the question of investigation of the hardness characteristics of the rams of racing vehicles [K voprosu issledovaniya zhestkostnykh kharakteristik ram gonochnykh]. *Car. Road. Infrastructure*, 2019, Iss. 3(21), P. 11. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41152477>. EDN: UQTIYI. Last accessed 15.05.2023
4. Degtev, D. N., Lavrenov, S. V., Osipov, A. A. [et al.] Static analysis of the front steering knuckle for Formula Student racing car [Staticheskiy analiz perednego povorotnogo kulaka gonochnogo avtomobilya klassa «Formula Student»]. *High technologies in the construction complex*, 2021, Iss. 1, pp. 61–67. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46141472>. EDN: WZOEVH. Last accessed.
5. Sorokin, P. A., Khryakov, K. S., Mishin, A. V. Spectral analysis of «Dallara T12» race car front wing vibrations [Spektralniy analiz vibratsii perednego antikryla gonochnogo avtomobilya «Dallara T12»]. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*, 2015, Iss. 7–1, pp. 221–226. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25070439>. EDN: VCQAMN. Last accessed 15.05.2023.
6. Khryakov, K. S. Issues of performance in aerodynamic elements of racing cars [Problemy effektivnoi raboty aerodinamicheskikh elementov gonochnykh avtomobiley]. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*, 2014, Iss. 11–2, pp. 193–196. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23050864>. EDN: TKKZCX. Last accessed 15.05.2023.
7. Pletin, D. A. Design features of Formula racing cars [Osobennosti konstruktivnykh gonochnykh avtomobiley klassa Formula]. *Izvestia MGTU «MAMI»*, 2014, Vol. 1, Iss. 1 (19), pp. 63–66. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21834415>. EDN: SJUWHX. Last accessed 15.05.2023.
8. Evseev, K. B. Analysis of mechanical properties of carbon fiber suspension guide elements of a Formula Student car [Analiz mekhanicheskikh svoystv ugleplastikovyykh napravlyayushchikh elementov podveski avtomobilya klassa «Formula student»]. *Youth Scientific and Technical Bulletin*, 2013, Iss. 10, P. 11.
9. Bikbulatov, R. I., Fedorov, S. V. Telemetry system of a racing car [Sistema telemekhaniki gonochnogo avtomobilya]. *Achievements of science and education*, 2019, Iss. 5(46), pp. 14–21. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37347336>. EDN: YLSVOG. Last accessed 15.05.2023.
10. Krasin, P. S., Volchenko, N. A. Experimental calibration of racing car [Eksperimentalnaya kalibrovka datchikov gonochnogo avtomobilya]. *Electronic online polythematic journal «Scientific Works of KubSTU»*, 2015, Iss. 2, pp. 205–212. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23028910>. EDN: TJYMJB. Last accessed 15.05.2023.
11. Turenko, A. N., Uzhva, A. V., Lukashov, I. V. [et al.] Use of GPS navigation satellite system for trajectory playback of a racing vehicle [Isposolovanie navigatsionnoi sputnikovoi sistemy GPS dlya vosproizvedeniya traektorii dvizheniya gonochnogo avtomobilya]. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 2013, Iss. 60, pp. 083–089. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21120196>. EDN: RUEMYH. Last accessed 15.05.2023.
12. Suranovich, D. I., Korukhova, Yu. S. A System for Automated Driver's Errors Detection in Motor Racing [Sistema avtomatizirovannogo vyavleniya oshibok vodielya v avtogonkakh]. *Scientific service on the Internet*, 2018, Iss. 20, pp. 454–458. [Electronic resource]: <https://keldysh.ru/abrau/2018/theses/51.pdf>. EDN: YPOHCX. Last accessed 15.05.2023.
13. Shinde, T., Chavan, R., Savadkar, P. [et al.] Failure Analysis of a Wheel Hub of Formula Student Racing Car. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 2021, Vol. 102, Iss. 1, pp. 73–78. DOI: 10.1007/s40033-020-00244-z.
14. Susca, L., Mandorli, F., Rizzi, C., Cugini, U. Racing car design using knowledge aided engineering. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AI EDAM)*, 2000, Vol. 14, Iss. 3, pp. 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890060400143057> [Access limited for subscribers].
15. Manaf, M. Z. A., Latif, M. F. A., Razak, M. S. A. [et al.] Suspension kinematic analysis of UTeM's FV Malaysia electric vehicle racing car. *International Review of Mechanical Engineering*, 2016, Vol. 10, Iss. 4, pp. 294–300. DOI: 10.15866/ireme.v10i4.8626.
16. Kamalyan, A. M. Protection of Scientific Research Results and Scientific Information in Elite Sports («Formula 1» Case Study). *Actual Problems of Russian Law*, 2021, Vol. 16, Iss. 2 (123), pp. 175–182. DOI: 10.17803/1994-1471.2021.123.2.175-182.

Information about the authors:

Nikolaev, Roman S., Analyst at the Engineering and Methodological Centre of the Advanced Engineering School of Electric Transport of Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, r.s.nikolaev@mospolytech.ru.

Zhdanovich, Olga A., Deputy Director of the Advanced Engineering School of Electric Transport of Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, o.a.zhdanovich@mospolytech.ru.

Article received 15.05.2023, updated 15.03.2024, approved 05.06.2024, accepted 29.06.2024.



Improving the Efficiency of Ultrasonic Testing of Solid-Rolled Wheel Rims During Repair of Car Wheelsets



Alexander G. OTOKA



Oleg V. KHOLODILOV

Alexander G. Otoka¹, Oleg V. Kholodilov²

^{1,2} Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus.

¹ Gomel wagon depot of the RUE «Gomel branch of the Belarusian Railway», Gomel, Republic of Belarus.

¹ ORCID 0009-0003-9926-9439; Russian Science Citation Index SPIN-code: 2466-5708; Russian Science Citation Index Author ID 1220168.

² ORCID 0009-0005-5799-0097; Russian Science Citation Index SPIN-code: 1818-4103; Russian Science Citation Index Author ID 188646.

✉ ¹ otokaa@mail.ru.

✉ ² olhol@tut.by.

ABSTRACT

Increasing the efficiency of ultrasonic testing in railway transport is possible due to improvement and modification of the existing technology. One of the main tasks of increasing efficiency is to improve reliability and information content of ultrasonic testing of wheel rims during repair of wheelsets.

The contact method of ultrasound input for wheel rims is still predominant at the enterprises of the wagon and locomotive facilities of railways.

The article covers the techniques of ultrasonic flaw detection of the rim of solid-rolled wheels during repair of wagon wheelsets

in accordance with the existing regulatory technical documents. The problems of detecting defects by piezoelectric transducers with input angles of 0°, 40°, 50° when testing the rim from the lateral inner surface and 90° from the side of the tread area are described.

A version of a new method for testing the wheel rim from the side of the tread area using piezoelectric transducers with input angles of 65°–74° is proposed. A comparative analysis was conducted to simultaneously identify eight reflectors in a test sample using 2.5R65°69°74°, P121–2.5–70° RDM and P121–0.4–90° transducers.

Keywords: solid-rolled wheels, Rayleigh waves, ultrasonic testing, tread, wheel rim, growing efficiency.

For citation: Otoka, A. G., Kholodilov, O. V. Improving the Efficiency of Ultrasonic Testing of Solid-Rolled Wheel Rims During Repair of Car Wheelsets. *World of Transport and Transportation*, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-8>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Today, ultrasonic testing in railway transport occupies a special place due to the need to ensure safety of cargo and passenger transportation. It is the basis for identifying internal defects, surface cracks revealed by the depth in various parts of wheelset axles, as well as in rims and disks of solid-rolled wheels¹.

To check the rims of solid-rolled wheels for defects, the main method is ultrasound (US) input from the inner edge of the wheel with piezoelectric transducer (PET) input angles of 0°, 40°, 50°. However, in practice, when US is input from the inner edge, there is a «dead» zone in which a defect may occur. For example, the standardised «dead» zone for PET for input angles of 40°, 50° is ≈6 mm, and for an input angle of 0° – 10 ... 15 mm. At the same time, the contact method of US input may not provide the required sensitivity of the method in places of scoring and chips, which may be on the inner edge of the wheel [1]. The wheel rim thickness also affects the detection of defects in the case of a fixed position of PET in the USK-5A wheel scanning device. In the regulatory technical documentation, the main attention is paid to the detection of reflectors of certain sizes in different parts of the wheel, but the fact that defects can be located at different angles relative to PET and be in other zones is not considered. Natural defects (pores, cracks, delamination, etc.) differ from artificial reflectors (holes, drilling, cuts, etc.) by abnormality of the shape. For example, inside the defects there may be oxides and various substances, which, during US testing, as a rule, contribute to a decrease in the amplitude of the reflected signal. Voluminous defects such as pores, slag inclusions of various types provide scattering of the incident wave almost the same in all directions. However, for planar defects (cracks, delamination, etc.), the scattering has an obvious direction. The direction of the plane of such defects in relation to the plane in which US wave propagates can differ dramatically and directly depends on the manufacturing technology, conditions and modes of further operation of the wheels. Cracks that come out from one point or have a spider-like appearance are of interest for detection.

High-amplitude echo signals from planar defects are observed only under favourable conditions (specular reflection). With non-

specular reflection, diffraction waves appear from the edges of the defect. Their amplitude is significantly smaller than the amplitude with specular reflection and is determined by the shape of the defect, the direction of emission and reception relative to the plane of the defect, and the type of emitted and received waves [2–4].

In practice, it is noted that when testing products with surface irregularities from mechanical processing with straight PET, a Rayleigh surface wave can be excited, which propagates perpendicular to the directions of irregularities [5]. Such an effect leads to appearance of false echo signals on the flaw detector scan and affects the correctness of assessment of the quality of wheel rims (tires). For example, when introducing US from the lateral inner surface of the wheel, a false signal can appear from the dihedral angle of the edge of the rim (tire) opposite the flange.

It should be noted that when testing with an inclined combined PET, the amplitude of the echo signal of the diffraction wave from the edge of the vertical half-plane with a small cross-sectional area is approximately equivalent to the amplitude of the reflected signal from a lateral cylindrical hole with a diameter of ≈4 mm for a longitudinal wave and 2 mm for a transverse wave (for calculating $d = \lambda/2\pi$, where λ is the wavelength at a PET frequency of 2,5 MHz).

Scattering is also observed on the uneven surface of the defect. The scattering is greater, the greater is the Rayleigh parameter ($R = 2k\sigma \times \cos \varepsilon$, where k is the wave number, σ is the root-mean-square value of the unevenness height, ε is the angle of incidence of the wave on the defect) [6].

Based on the above, it is clear that there are technological constraints that reduce the efficiency of contact US testing.

Currently, ongoing work is underway to develop directions for improving existing methods of ultrasonic testing of rolling stock wheelsets, including technical means of testing [7; 8].

The objective of the work is to improve the US testing of solid-rolled wheel rims for the presence of differently oriented crack-like defects.

CONTROL OBJECTS. APPROACHES USED

In accordance with the regulatory document¹, ultrasound testing of solid-rolled wheels is performed using the echo-pulse method to

¹ PR NK V.2. Rules for non-destructive testing of parts and components of wagon wheelsets during repair. Special requirements. Moscow, JSC Kodeks, 2013, 88 p.

Table 1

Options for methods of inputting US from the inner edge of the wheel rim¹

<p>✓ DR2.1 (<i>input angle 0°</i>) control of the wheel rim circumference using longitudinal waves when PET is installed below the level of the tread</p> <p>✓ DR2.2 (<i>input angle 0°</i>) control of the wheel rim circumference with longitudinal waves at a distance of 30 mm from the lower edge of the rim (for wheels with increased hardness)</p>	<p>✓ DR3.1 (<i>input angle 40°</i>) control of the wheel rim circumference using transverse waves when PET is installed below the level of the tread</p>	<p>✓ DR3.3 (<i>input angle 50°</i>) control of the wheel rim circumference using transverse waves when PET is installed above the level of the tread</p>
Detection of longitudinal fatigue cracks in the main section of the rim, developing predominantly perpendicular to the rolling surface, delamination, non-metallic inclusions and other internal discontinuities	Detection of transverse fatigue cracks on the outer sidewall of the rim in the mating zone with the tread	Detection of transverse cracks and internal discontinuities in the rim flange

identify internal and surface defects that are located in the rims and have characteristics that exceed the rejection values.

Table 1 shows the mandatory options for the method of testing a solid-rolled wheel from the inner side surface of the rim.

One of the methods of US testing of the surface of cylindrical parts is the echo method using Rayleigh waves. The advantages of this testing method are related to high productivity due to the installation of PET at one or several points, allowing to assess the condition of the entire surface of the tested object [9]. In this case, scanning over the entire surface is not required. Since the surface wave has a high sensitivity to detecting surface defects, the requirements for the condition of the surface of the part are high.

In the railway industry, the method has found the widest application for testing solid-rolled wheels and tires after turning with a wheel lathe. Testing with surface waves is carried out in two directions by moving PET at a distance of $\frac{1}{4}$ of the wheel circumference (usually at least one move). Various defects on the rolling surface and in the near-surface layer of the rim at a depth of up to 1 ... 2 mm (DR4) are subject to detection.

It is known that according to Snell's law, after the US beam falls in PET prism at an angle of 55–57° in the medium, the refracted wave exists only in the form of a surface wave. This angle of incidence of the beam in the prism is used in PET for railway purposes, marked as P121–0.4–90°.

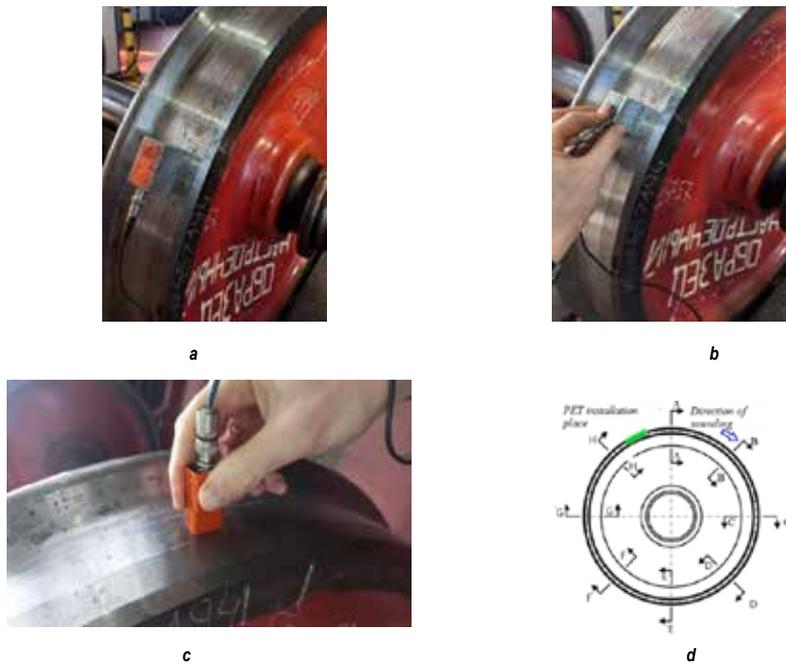
However, the use of this PET in practice is complicated by the influence of such factors on the results as: contamination, residues or excess of contact fluid, the presence of burrs left after turning the wheel, etc. It should be considered that in the process of working with this type of PET, it is quite difficult to find a defect due to its

ability to receive waves with a minor «rear» lobe of the directional pattern. Also, the amplitude of the echo signal from the defect changes unevenly due to such phenomena as multiple re-reflection of waves from the boundaries (rim chamfer, fillet transition to the flange) and their subsequent interference [10].

Wheel inspection by surface wave according to the DR4 method variant (90°) from the tread side is insufficient, since defects can be located at different depths and will not always be detected from the inner side of the rim by transverse wave with inclined PET according to the DR3.1 variant (40°) and longitudinal wave with direct PET according to DR2.1 (0°).

To conduct experimental studies, a tuning sample (TS) was selected in the form of a formed wheelset with eight artificial reflectors on a solid-rolled wheel with a diameter of 903 mm. The US testing was carried out on TS from the tread side at a distance of 70 mm from the inner edge of the rim at one point of the wheel using the UD2–102VD ultrasonic flaw detector and a set of transducers: P121–0.4–90° (RF), P121–2.5–70° RDM (RF), P121–2.5–65° RDM (RF), 2.5R65°69°74° (China). Industrial oil I-20 was used as a contact fluid. When testing the wheel rim with P121–0.4–90°, the standard setting of the manufacturer was set (US speed $s = 2999$ m/s, high probing pulse amplitude, time selection zones $TZ1_{init}$, $TZ1_{fin}$, $TZ2_{init}$, $TZ2_{fin}$ are adjusted automatically, the PET frequency is 0,4 MHz, the input angle is 90°), and for all the other PET, testing parameters were set independently in accordance with the wheel circumference and the PET characteristics ($TZ1_{init} = 133.6R$, $TZ1_{fin} = 3000R$, US speed $s = 3260$ m/s, high probing pulse amplitude, PET frequency is 2,5 MHz, the input angle is 65°, 69°, 70°, 74°).





Pic. 1. An example of identifying reference reflectors in TS [photo by the authors].
 a – PET P211–0,4–90° (with built-in magnets); b – PET 2,5R65°69°74°;
 c – PET P121–2,5–70-RDM; d – arrangement of reflectors in TS by sectors.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

It was of interest to study the features of detecting reflectors from the wheel tread using the traditional P121–0.4–90° PET (using a surface wave) and inclined PET with large input angles (using a transverse wave) 2.5R65°69°74° (a three-element PET in one housing), P121–2.5–70° RDM, P121–2.5–65° RDM (Pic. 1).

The use of such large angles of 65°–74° when inspecting wheelsets in the rolling stock division is not envisaged. However, these PET are widely used in rail flaw detection both as part of a flaw detection trolley and in manual confirmation testing (70° – rail head testing from the tread side, 65° – testing of welded joint zones in the head area from the tread side)²³. It is worth noting that such input angles are used in testing welded joints, which ensures a low level of parasitic (false) signals and high detection of defects located at different depths [11–13].

The control of the tread with P121–0.4–90° PET (Pic. 2) showed that in TZ1 zone, reflectors

were detected with a direct beam (by distance from the front face of PET) in the section C–C, D–D, and in TZ2 zone with a «rear» lobe (by distance from the rear face of PET) – in the section F–F, G–G. Outside TZ1 zone, a reflector was detected with a direct beam (by distance from the front face of PET) in the section A–A.

It is difficult to identify the remaining signals, and in some cases, it is impossible for the reasons described above. At the same time, the additional signals appearing in TZ2 zone can duplicate the signals of TZ1 zone, but with the recalculation of the distance of the artificially created flaw detector setting.

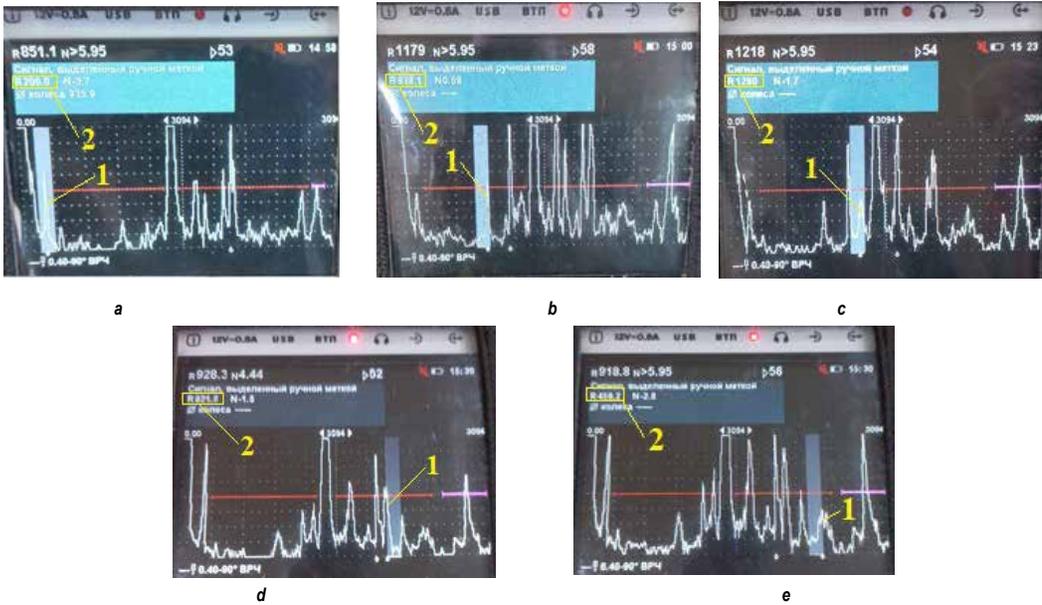
Testing the tread surface with the 2.5R650690740 PET (Pic. 3) showed excellent results in identifying all reflectors sequentially one after another.

Obviously, such high sensitivity is related to the design of PET, when one piezoelectric element can emit an US wave, and the other (located in the most favourable place for reception) can receive it. Large input angles, a frequency of 2.5 MHz and a wide directional pattern of PET contribute to the fact that defects of different geometric dimensions and shapes can be classified by the signal.

When creating a setting, an angle of 69° was entered into the flaw detector memory, one of three indicated in PET marking.

² STP BCh [standard of the Belarusian Railway] 38.427–2021. Non-destructive testing of rails and welded joints. Organisation standard (approved by the order of the head of the Belarusian Railway, dated 18.06.2021, No. 532NZ), 2021, 127 p.

³ STPBCh 38.343–2016. Ultrasonic testing of rails on the way with the UDS2-RDM-22 flaw detector. Organisation standard (approved by the order of the head of the Belarusian Railway, dated 15.07.2016, No. 665NZ), 2016, 81 p.



Pic. 2. Screenshots made while detecting reflectors in TS with PET P121–0.4–900:

1 – signal from the reflector; 2 – distance along the beam to the reflector, mm; a – horizontal drilling with a diameter of 5 mm at a depth of 10 mm from the wheel tread (outside the time selection control zone TZ1); b – vertical drilling of 5 mm in the flange at a distance of 17.5 mm from the inner edge of the wheel; c – vertical drilling of 5 mm on the tread surface at a distance of 70 mm from the inner edge of the wheel; d – detection of a cut on the chamfer 3 mm deep and 1 mm wide by the «rear» petal; e – detection of a 4 mm drill hole 5 mm deep on the inner edge of the wheel at a distance of 50 mm from the top of the flange by the «rear» petal [photos by the authors].

The wheel sounding scheme is shown in Pic. 4.

Due to multiple reflections of US beam from the tread surface, testing becomes effective along the entire length of the wheel circumference. Depending on the wheel diameter and the input angle of PET, the area of US beam re-reflection will vary in length and is within the range of 160 ... 260 mm. It can be noted that such control from the side of the tread surface will allow to detect defects not only in the near-surface layer of the rim, but also at a depth of up to 35 mm from the tread surface. With such a scanning scheme, the efficiency of detecting defects: non-metallic inclusions, transverse cracks, cavities, delamination and other discontinuities only increases.

Scanning must be performed at several points, deflecting PET beam in both directions by 10–15°. When a signal appears in the control zone, it is necessary to find a position at which its amplitude will be maximum.

To confirm that the control is effective, and the setting is created correctly, a wheel pair was selected after turning the wheel at a wheel lathe with a similar diameter of 903 mm. As can be seen in Pic. 5, there are no false indications.

When using the R121–2.5–70° PET (Pic. 6), high control sensitivity is also achieved when detecting all reflectors.

However, control with P121–2.5–70° RDM, due to its geometric dimensions and small contact area, is still inferior in sensitivity to the 3-element PET in terms of the spread of signal readings by amplitude, since one and the same piezoelectric element serves as emitter and receiver.

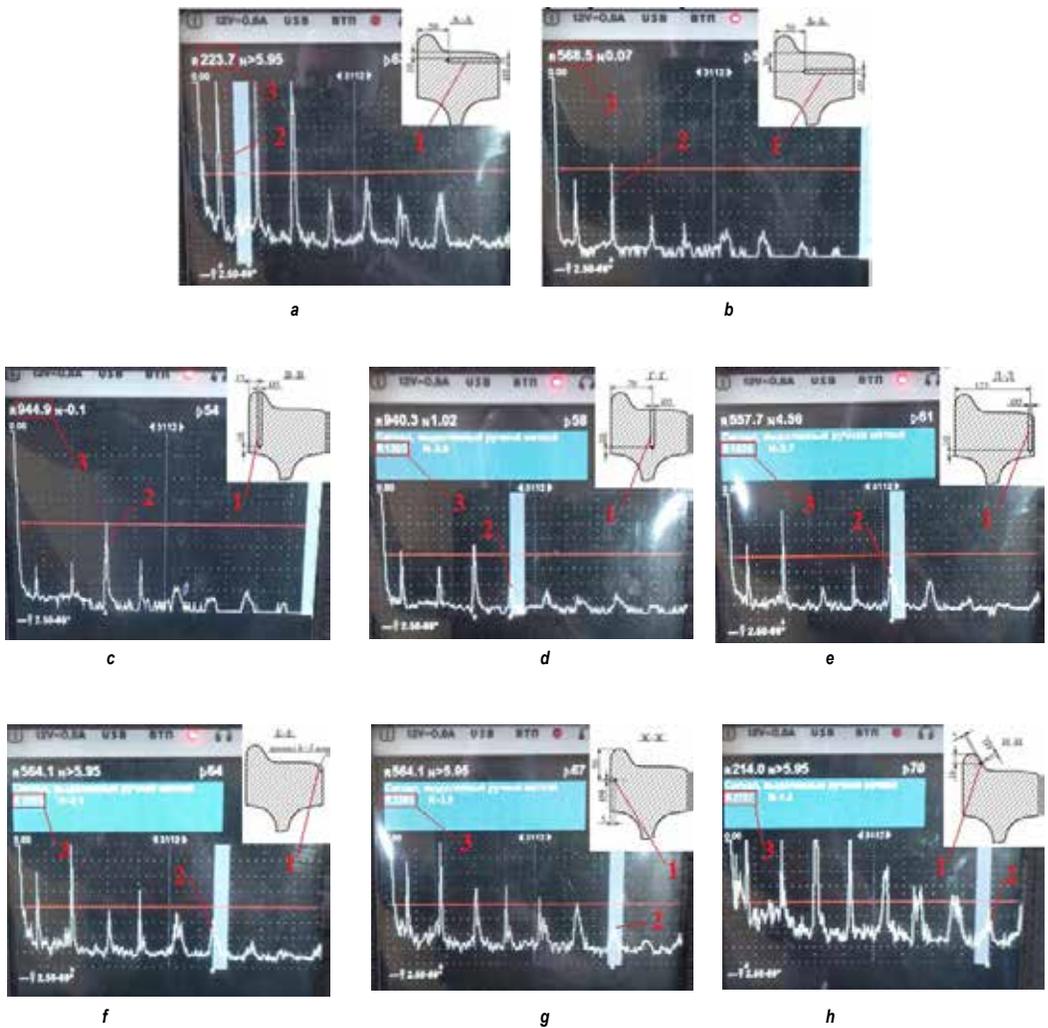
Ultrasonic testing of the wheel rim with this sounding scheme involves dividing the wheel into sections (point-by-point control) or scanning the tread surface at a distance of 300–400 mm in two directions by moving PET in the middle of the tread surface, deflecting PET beam in both directions by 10–15° every 5 cm of the path.

CONCLUSIONS

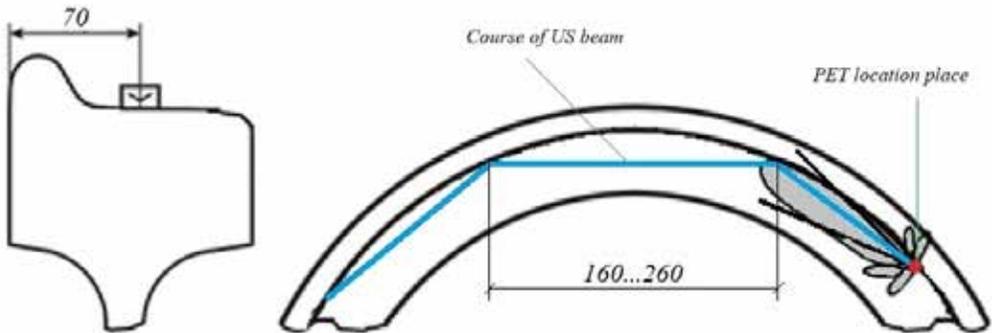
The results of the studies confirmed the high sensitivity of the new version of the testing method from the side of the tread surface at a distance of 70 mm from the inner side surface of the rim.

When PET is installed at one point and the beam is deflected in both directions by 10–15°, defects are detected using artificial reflectors in TS of different sizes, orientations and shapes. The high productivity of such testing does not reduce the reliability of the obtained results of ultrasonic flaw detection, and, due to the wide directional diagram, the efficiency of defect detection increases in comparison with the introduction of





Pic. 3. Screenshots made while detecting reflectors in TS with PET 2,5R65°69°74°:
 1 – artificial reflector; 2 – signal from reflector, mm; 3 – distance along the beam to the reflector; a – horizontal drilling with a diameter of 5 mm at a depth of 10 mm from the wheel tread surface; b – horizontal drilling of 5 mm at a depth of 30 mm from the wheel tread surface; c – vertical drilling of 5 mm in the flange at a distance of 17.5 mm from the inner edge of the wheel; d – vertical drilling of 5 mm on the tread surface at a distance of 70 mm from the inner edge of the wheel; e – vertical drilling of 5 mm in the chamfer area of the tread surface at a distance of 125 mm from the inner edge; f – cut on the chamfer 3 mm deep and 1 mm wide; g – pre-drilling of 4 mm, 5 mm deep on the inner edge of the wheel at a distance of 50 mm from the crest; h – pre-drilling of 3 mm, 2 mm deep at a distance of 16 mm from the crest of the wheel [photos by the authors].



Pic. 4. Scanning scheme and direction of sounding [proposed by the authors].



a



b

Pic. 5. Screenshots of a serviceable wheel of a wheelset after turning it at a wheel lathe, obtained with PEP 2.5R65°69°74° a – before installing PET; b – after installing PET on the tread surface [photos by the authors].

ultrasound from the side of the inner side surface of the rim. Due to possible re-reflection from the rim zone and considering that the testing is effective at a depth of up to 35 mm, it is advisable to use the proposed version of the method for wheels with a rim thickness of up to 40 mm.

The works [14; 15] provides information that assessment of admissibility of discontinuities using reference reflectors in TS can only be performed with a significant error, which is introduced by the difference in attenuation in the wheel (material St. 2, St. 2G, St. 1, St. T) and



Pic. 6. Screenshot while detecting reflectors with TS PET P121-2.5-70-RDM:
 1 – horizontal drilling with a diameter of 5 mm at a depth of 10 mm from the wheel tread surface; 2 – horizontal drilling of 5 mm at a depth of 30 mm from the wheel tread surface; 3 – vertical drilling of 5 mm in the flange at a distance of 17,5 mm from the inner edge of the wheel; 4 – vertical drilling of 5 mm on the tread surface at a distance of 70 mm from the inner edge of the wheel; 5 – vertical drilling of 5 mm in the chamfer area of the tread surface at a distance of 125 mm from the inner edge; 6 – a cut on the chamfer with a depth of 3 mm and a width of 1 mm; 7 – a 4 mm drill hole with a depth of 5 mm on the inner edge of the wheel at a distance of 50 mm from the top of the flange; 8 – a 3 mm drill hole with a depth of 2 mm at a distance of 16 mm from the top of the wheel flange [photo by the authors].



TS. Therefore, the use of the proposed version of testing using PET with input angles of 65°–74° from the wheel rolling surface provides for the possibility of changing the technology of ultrasonic testing of solid-rolled wheel rims in terms of using it as the main method together with DR3.1 (40°), DR3.3 (50°), DR 2.1 (0°), DR2.2 (0°), DR4 (90°) complex or as an additional testing (for confirmation in controversial situations).

The approach we propose of ultrasonic flaw detection of rims of solid-rolled wheels of wheelsets during repair will improve the efficiency of non-destructive testing and operational reliability of railway rolling stock.

REFERENCES

- Otoka, A. G., Logunov, V. G., Kholodilov, O. V. Sensitivity of contact and immersion methods of ultrasonic testing in identifying reference reflectors in a reference sample [*Chuvstvitel'nost' kontaktnogo i immersionnogo sposobov ultrazvukovogo kontrolya pri vyyavlenii etalonnnykh otrazhetelei v nastroechnom obratse*]. *Non-destructive testing and diagnostics*, 2023, Iss. 1, pp. 30–36. EDN: GVYRPJ.
- Klyuev, V. V., Sosnin, F. R., Kovalev, A. V., Filinov, V. N., Aerts, V., Babadzhyanov, L. S. [*et al.*] *Non-destructive testing and diagnostics: Handbook [Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: Spravochnik]*. Moscow, Publishing house Mashinostroenie, NIIN MNPO «Spectr», 2005, 656 p. ISBN 5-217-03300-2.
- Markov, A. A., Maksimova, E. A. Analysis of the Efficiency of Ultrasonic and Magnetic Channels of Flaw Detection Systems. *Vestnik LhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, Vol. 22, Iss. 2, pp. 22–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32.
- Ermolov, I. N., Vopilkin, A. Kh., Badalyan, V. G. Calculations in ultrasonic flaw detection. Brief reference [*Raschety v ultrazvukovoi defektoskopii. Kratkiy spravochnik*]. Moscow, Publishing house of LLC NPC NK «ECHO+», 2002, 109 p. [Electronic resource]: <https://djvu.online/file/1nsdfaY0ymWCu?ysclid=m30a56dhny152857484>. Last accessed 16.05.2024.
- Lysak, D. V. Detection of false echo signals of surface wave reflection during ultrasonic testing of wheelset tires of rolling stock of railways [*Opredelenie lozhnykh echo-signalov otrazheniya poverkhnostnoi volny pri ultrazvukovom kontrole bandazhei kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog*]. *Technical sciences – from theory to practice*, 2013, Iss. 17–1, pp. 131–137. EDN: RMTSHB.
- Kunina, P. S., Dubov, V. V., Polyakov, A. V., Tereshchenko, I. A., Novgorodsky, A. A., Stepanov, M. S. Feasibility of ultrasonic testing in diagnostics of drilling tools [*Tselesoobraznost provedeniya ultrazvukovogo kontrolya pri diagnostike burovogo instrumenta*]. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2018, Iss. 8, pp. 32–37. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-8-32-37.
- Bernd, R., Walte, F., Kappes, W., Kroening, M. Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheelset Axle. 17th World Conference on Nondestructive testing, 2008. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/26920462_Ultrasonic_and_Eddy-current_inspection_of_rail_wheels_and_wheel_set_axles. Last accessed 16.05.2024.
- Shevelev, A. V. Methods and means of ultrasonic non-destructive testing of solid-rolled car wheels. Ph.D. (Eng) thesis [*Metody i sredstva ultrazvukovogo nerazrushayushhego kontrolya tselnokatanykh koles vagonov. Diss. kand. tekhn. nauk*]. St. Petersburg, PGUPS publ., 2004, 142 p. [Electronic resource]: <https://new-disser.ru/~avtoreferats/01002621891.pdf>. Last accessed 16.05.2024.
- Otoka, A. G., Holodilov, O. V. Comparative analysis of using coupling fluids in flaw detection on the example of ultra-sound control of an all-rolled wheel surface. *Transport Engineering*, 2024, Iss. 3, pp. 4–11. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-3-4-11.
- Platunov, A. V., Muravyov, V. V., Muravyova, O. V. Ultrasonic testing of the rolling surface of railway car wheels and locomotive tires using Rayleigh waves [*Ultrazvukovoy kontrol poverkhnosti kataniya zheleznodorozhnykh vagonnykh koles i bandazhei lokomotivov s ispolzovaniem releevskikh voln*]. *Intelligent systems in production*, 2023, Vol. 21, Iss. 2, pp. 41–48. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-41-48.
- Cremona, C. Inspection of welded joints: reliability of ultrasonic inspection and inspection intervals. Conference Paper in IABSE Congress Report, 2012, pp. 597–604. DOI: 10.2749/222137912805110934.
- Kireev, A. N., Sklifus, Y. K., Kireeva, M. A. Validity and informativity enhancement of ultrasonic testing of cast parts of railway rolling stock. *Bulletin of the Don State Technical University*, 2019, Vol. 19, Iss. 4, pp. 335–341. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341.
- Jemec, V., Grum, J. Latest methods of non-destructive testing of railway vehicles. The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing in Engineering, 2005, pp. 69–79. [Electronic resource]: <https://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2005/PAPERS/08-NDTP05-70.pdf>. Last accessed 16.05.2024.
- Ermolov, I. N., Aleshin, N. P., Potapov, A. I. Non-destructive testing. Acoustic testing methods [*Nerazrushayushchiy kontrol. Akusticheskie metody kontrolya*]. Moscow, Publishing house «Vysshaya shkola», 1991, 283 p. ISBN 5-06-002038-X.
- Kireev, A. N. Features of ultrasonic testing of rolled wheel centres of locomotives in the radial direction [*Osobennosti ultrazvukovogo kontrolya katanykh kolesnykh tsevtrov lokomotivov v radialnom napravlenii*]. *Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2006, Iss. 12, pp. 133–137. EDN: VHWWOD. ●

Information about the authors:

Otoka, Alexander G., Master of Engineering, Ph. D. Student at Belarusian State University of Transport; Engineer-Technologist (Head of Non-Destructive Testing Unit) of Gomel Car Depot of the RUE «Gomel Branch of the Belarusian Railway», Gomel, Republic of Belarus, otokaa@mail.ru.

Kholodilov, Oleg V., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Wagons of Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus, olhol@tut.by.

Article received 08.05.2024, approved 10.09.2024, accepted 12.09.2024.

T



REGIONAL SUPPLY CHAINS 206

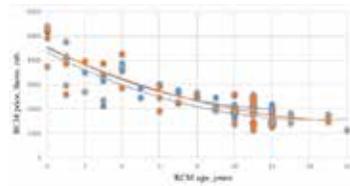
Resource-saving approach: economically feasible number of transport and logistics centres.



EFFICIENCY OF PASSENGER TRANSPORTATION 218

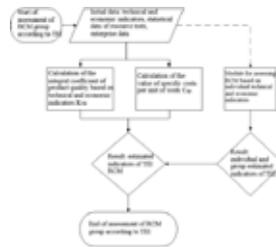
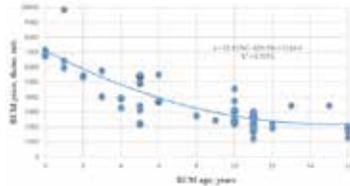
Rational operation of the fleet of shunting locomotives.

MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS



LIFE CYCLE OF EQUIPMENT 229

Choice of road construction machinery in situations of information uncertainty.

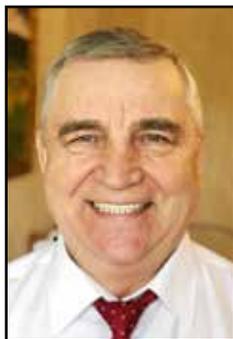




Resource-Saving Approach to Cargo Delivery in Regional Supply Chains



Valery A. KHAIBBAEV



Vladimir N. KOSTROV



Evgeny V. CHERNIAEV

Valery A. Khaibbaev¹, Vladimir N. Kostrov², Evgeny V. Cherniaev³

¹Samara State Transport University, Samara, Russia.

²Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.

³Volsk Military Institute of Material Support, Volsk, Russia.

¹ORCID: 0000-0001-8244-8842; Scopus Author ID: 57207192153; Russian Science Citation Index SPIN-code: 6990-4788; Russian Science Citation Author ID: 737635.

²ORCID 0000-0002-8703-6713; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9368-6510; Russian Science Citation Author ID: 353523.

³ORCID 0009-0003-9646-5995; Russian Science Citation Index SPIN-code: 3339-3490; Russian Science Citation Author ID: 1197150.

✉ ¹vhaitbaev21@mail.ru.

✉ ²vnkostrov@yandex.ru.

✉ ³ki-la@mail.ru.

ABSTRACT

The objective of the article is to select and justify an approach to formation of a regional resource-saving model of cargo distribution based on determining the economically feasible number of transport and logistics centres that ensure a reduction in delivery costs.

The study used methods of economic and mathematical modelling, statistical and comparative analysis, correlation and regression, abstract logical, theoretical and empirical and structural analysis.

The paper analyses scientific approaches to cost reduction when choosing an economically feasible number of transport and logistics infrastructure facilities from the standpoint of more efficient spatial selection

of infrastructure facilities of the transport and logistics network, contains a correlation and regression analysis of the impact of the number of transport and logistics centres on transport costs when distributing goods in supply chains and estimate of an analytical relationship between these indicators, as well as substantiates the influence of the cargo delivery price level on resource-saving indicators in the cargo distribution system.

The results of the conducted research can be used to determine the level of logistics costs and their impact on the prices of final goods and services, which is one of the ways to implement the goal of resource conservation for commercial companies and executive authorities.

Keywords: resource-saving model, warehouses, transport and logistics centres, infrastructure, region, resources, correlation and regression analysis.

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Agency for Railway Transport for conducting scientific, research, experimental design and technological work for civil purposes. Project «Design of a resource-saving transport and logistics system in the economy of the constituent entities of the Russian Federation». Internet number/Registration number: 124040300020–8.

For citation: Khaibbaev, V. A., Kostrov, V. N., Cherniaev, E. V. Resource-Saving Approach to Cargo Delivery in Regional Supply Chains. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 206–217. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-9>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The implementation of innovative approaches to formation of regional resource-saving model of cargo distribution based on determining economically feasible number of transport and logistics centres (TLC), which should ensure a reduction in the costs of these operations, is an obvious priority not only for company management, but also for executive authorities at all levels of administration. In this regard, the focus of corporate and state economic policy is on development and implementation of resource-saving mechanisms for organising economic space, with one of the priority goals being the development of approaches to formation and of actual models of the cargo delivery network, considering their impact on the pricing mechanism of final goods and services.

The regional logistics chain was chosen as the object of analysis and optimisation. The choice of such an object is due to the dedicated orientation of this work, which is part of the scientific research within the framework of the state assignment of the Federal Agency for Railway Transport.

Obviously, besides regional supply chains, there are others, for example, industry, transnational or global chains, etc. The specifics of each of them are characterised, first, by the targets, the scale of involvement of the participants in the delivery of goods and the result, which can be not only economic.

As a basis for improving the quality of transport and logistics services, which involves, among other things, a reduction in its cost, the authors propose a resource-saving approach, which provides for a decrease in the use of a set of economic resources for the delivery of goods using a transport and logistics network with the unchanged requirements of customers. In contrast to the cost-saving approach, the resource-saving approach provides for a reduction in the number of resources used to achieve the target indicators.

Therefore, the task of reducing the number of TLCs in transport and logistics networks, on the one hand, provides for the choice of a route with a smaller number of them, on the other hand, ensures a reduction in the cost of cargo delivery.

The task of designing the parameters of these networks is quite trivial, but insufficient consideration of the characteristics of the territories of their formation, of the development of the network of transport and logistics centres,

and the effect of scale often cause failure in meeting customer expectations and opposite results, the main ones of which are additional capital investments and growth in prices for final goods and services.

The analysis of several regional strategies for formation of TLC networks shows, on the one hand, big attention paid to their development, but, on the other hand, first, that their implementation is not always at high level, second, a significant excess of the planned budget for creation of TLC networks and, finally, increased logistics costs cumulated in the price of goods and services.

For example, the developed strategy for formation of a TLC network in Samara region has not been implemented¹ in full. The strategy for socio-economic development of the Saratov region until 2025 and its new version with deadlines for implementation of the main activities until 2030² assumes creation of a network of transport and logistics centres (Saratovsky, Rtishchevsky, Petrovsky, Khvalynsky, Balakovsky, Ozinsky, Krasnoarmeysky TLCs) and in terms of implementing the plan for their creation has not yet been implemented. The forecast for socio-economic development of Orenburg region³, regardless of integrated of state program «Development of transport system», does not include a detailed section on transport and logistics. The strategy for socio-economic development of Penza region⁴ does have a section on transport, where the focus is on passenger transportation, but there is no plan for development of the transport and logistics complex in the form of a cluster or network. Unlike these strategies, the strategy for socio-economic development of

¹ Resolution of the Government of Samara Region dated September 23, 2010, No. 422 «On the Concept for Development of the Regional Transport and Logistics System of Samara Region for 2011–2015». [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/945029027>. Last accessed 05.05.2024.

² Strategy for social and economic development of Saratov region until 2030. [Electronic resource]: <https://investinsaratov.ru/files/docs/321-p.pdf>. PDF. Last accessed 05.05.2024.

³ Forecast of socio-economic development of Orenburg region for 2023 and the planning period of 2024 and 2025. [Electronic resource]: <https://mineconomy.orb.ru/documents/active/11493/>. Last accessed 05.05.2024.

⁴ Strategy for socio-economic development of the Penza region for the period up to 2035. [Electronic resource]: <https://pnzreg.ru/open-government/nekommercheskie-organizatsii/etnokonfessionalnye-otnosheniya/Стратегия%202035.pdf>. Last accessed 05.05.2024.



the Republic of Tatarstan⁵ provides for spatial development of productive forces, industrial clusters, including transport and logistics, which shows the understanding and interest of the republic's leadership in the development of this sector of the regional economy. The analysis of the strategy for socio-economic development of Ulyanovsk region⁶ shows that because of significance of the transport system the goals and objectives of its development are highlighted in a separate section. The list of regional strategies is obviously far from being complete, some of those strategies being scrupulously developed, nevertheless have shortcomings from the point of view of detailed specification of the plans of development of transport and logistics systems (hereinafter referred to as TLS).

At the same time, the demand for formation of effective resource-saving TLSs from the population and business sets the task for government bodies to create commodity distribution systems integrated with other sectors of the economy and having balanced parameters of transport and terminal infrastructure. In these conditions, the search for new sources of savings on transport and logistics services becomes a priority task with a relatively small number of alternatives for reducing costs and ensuring the competitiveness of the industry.

The task of resource saving is often associated with the generally accepted concept of «lean production». However, the boundaries of resource saving go beyond a single enterprise or group of enterprises, while «lean production» is usually spoken of as a concept of reducing costs within the boundaries of an enterprise.

Underestimation of implementation of resource saving programs at the level of corporations, industries and regional economies obviously reduces not only the efficiency of economic activity, but also the quality of goods and services as a result of the use of resources in production activities.

However, understanding the importance of implementing resource-saving technologies that can reduce costs and increase benefits by itself is not enough. The implementation of resource-

saving technologies itself requires significant costs to move to a more efficient organisation of production that can increase labour productivity and reduce resource costs.

Within the boundaries of the proposed study, as indicated above, the models for calculating the number of TLC objects are used as resource-saving technologies, which in total ensures a reduction in resource costs for the cargo delivery function.

At the same time, there are other methods of resource saving in TLS that have proven their effectiveness to a greater or lesser extent. It is to note an approach based on the methodology of inventory management in supply chains, in which, in each subsequent TLC of the system, the calculation of inventory parameters is provided for considering the same parameters at the previous TLC. This helps to reduce the costs of maintaining and immobilising investments in inventory, increase the rate of capital turnover and, consequently, minimise the volume of unshipped goods. Therefore, with such an integration of TLC into the system, the main indicator of resource-saving will be not so much the amount of warehouse stocks in all links, but accounting of the methods of managing them at previous TLCs.

In addition to the listed approaches, the conditions for resource saving in TLC refer also to the applied cargo handling technologies and the level of automation of logistics processes. It is obvious, for example, that a high level of automation of logistics processes of a single TLC within the system will not give a general system effect, since in this case the resource-saving effect provides for the balance and harmonisation of the applied cargo handling technologies in all the TLCs of the system.

In this regard, a rational choice of locations and calculation of the number of infrastructure facilities of the transport and logistics system is just one of such alternatives for reducing the costs of transport and logistics services.

Accordingly, *the objective* of the study, the results of which are describe in the article, is to present the rationale to the approach of the regional resource-saving model of cargo distribution based on identification of economically feasible number of transport and logistics centres that ensure minimisation of logistics costs for the provider and minimisation of the price of transport and logistics service for the customer.

⁵ Strategy for socio-economic development of the Republic of Tatarstan until 2030. [Electronic resource]: <https://eco.tatarstan.ru/strategiya-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya.htm>. Last accessed 05.05.2024.

⁶ Strategy for socio-economic development of Ulyanovsk region until 2030. [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/463710828>. Last accessed 05.05.2024.

LITERATURE AND RESEARCH REVIEW

TLCs which play a key role in the system of delivery and distribution of large volumes of cargo and form a logistics supply chain, as a rule, do not provide the required level of efficiency in the implementation of the functions of delivering cargo to the end consumer. The formed TLC systems within the boundaries of «supplier – customer» according to the developers' plan should ensure a reduction in the costs of transportation, cargo handling and distribution under the conditions of consolidation of large volumes of cargo. However, a large (excessive) number of TLCs on the route from supplier to customer leads to an increase in the costs of transport and logistics services, which entails a growth of the cost of final goods and services. In this case, a non-linear parabolic dependence takes place, which requires calculating the impact of the number of TLCs on logistics costs, where the share of transport costs is the highest.

The analysis of scientific papers devoted to the concepts of reducing transport and logistics costs shows their great diversity both in quantity and in functional areas. Thus, the eLibrary.ru database contains over one thousand works on this issue, and international databases such as Web of Science and Scopus contain over 2.5 thousand. However, there are significantly fewer works that study the impact of the number of TLCs and the procedure for linking consumers to them.

Nevertheless, it is possible to highlight several works that deserve attention in the context of the chosen research topic. Thus, the work of D. J. Bowersox and D. J. Closs [1] analyses the impact of the number of warehouses on total transport costs and provides an example of determining the areas served by TLCs based on the criterion of the lowest total costs. The study proves that with an initial increase in the number of TLCs in the supply chain, transport costs decrease, and then as their number grows, costs increase. However, such a dependence is observed with a sufficiently large cargo flow.

In addition, the procedure for assigning consumers to a specific TLC is explained through the ability to ensure the delivery of goods with minimal total logistics costs.

However, when focusing efforts on restructuring the logistics system and striving to minimise costs, the authors do not show the relationship between the tasks of calculating the

optimal number of TLCs and linking an economically justified number of consumers to the corresponding facilities. Therefore, resource-saving tasks are solved locally without considering the influence of the current result on the next one.

Donald Waters's study [2] provides examples of fairly trivial methods for making decisions on choosing the best location for a logistics facility, which should provide better access conditions for consumers compared to other existing ones. The technology for planning the locations of infrastructure logistics facilities is disclosed in detail, but there is no assessment and comparison of the total logistics costs when re-assigning consumers to other supply centres. Just as in [1], the author substantiates the dependence of transportation costs on the number of infrastructure elements, but the assessment is based on expert analysis.

Jeffrey H. Schutt in his work [3] examines the problems of planning the flow of products, evaluates modern logistics technologies for managing the flow of products, such as Materials requirements planning (MRP), Distribution requirements planning (DRP), Just-in-time (JIT), Theory of Constraints (TOC). The analysis proposed by the author is based on the flows of materials, which are mainly estimated in production in various industries from the standpoint of their possible forecasting and planning using traditional and modern methods. Improved planning solutions and methods for their implementation in business practices constitute the methodological basis of the work. Obviously, the problem of logistics costs is one of the central ones, but spatial network planning of cargo flow in the context of referring to consolidation and distribution points, as well as quantitative parameters of infrastructure facilities are not considered.

In similar works, comparable concepts and approaches are presented by studies aimed at the methodological aspects of planning, including planning of cargo flows in logistics, using mathematical apparatus and are disclosed in the form of successive stages of transformation of the existing scientific tools into new methods and approaches. Such works include the works of A. J. Clark and H. Scarf [4], S. Shingo [5], S. Tayur, R. Ganeshan, M. Magazine [6], J. M. Reeve [7] and others.

The basis for designing cargo flow distribution systems is economic and mathematical modelling,



therefore a significant number of works are devoted to the possibilities of using mathematical apparatus in solving local and system problems of supply chain management. For example, Jeremy Shapiro in the work [8] proposes methods for planning and modelling supply chains, starting from the stage of choosing the configuration of supply chains and up to their formation and management. In terms of content, the work is a scientific manual with a pronounced methodological focus, which analyses and evaluates various information technologies used in practices, as well as models and methods for making supply chain management decisions. The work proposes methods for an integrated approach to supply chain management using corporations and companies as examples. However, the problems formulated within the objective of this article are not considered in a direct formulation.

It is worth noting several other works that provide mathematical approaches to management and optimisation of functions and operations in supply chains. Such studies include the works of J. C. Turner [9], V. S. Lukinsky⁷, P. M. Simonov⁸, G. I. Prosvetov⁹, O. O. Zamkov, A. V. Tolstopiatenko, Yu. N. Cheremnykh¹⁰, N. Sh. Kremer¹¹ and other authors.

Significantly fewer works relate to developed methodological approaches to designing logistics systems, where the main parameters are the number of TLCs and the economic feasibility of attaching a consumer to a particular TLC. Obviously, the task of resource saving is central here. These studies include the works of A. Lösch [10], D. J. Bowersox, [1], E. V. Bolgova, M. V. Kurnikova [11], B. A. Anikin, A. P. Tyapukhin¹² [12] and other works.

⁷ Models and methods of logistics theory: Study guide. 2nd ed. Ed. by V. S. Lukinsky. St.Petersburg, Piter publ., 2007, 448 p.

⁸ Simonov, P. M. Economic and mathematical modelling [Electronic resource]: Study guide in 2 parts. Perm, 2019, Part 1. – 230 p.

⁹ Prosvetov, G. I. Mathematical methods in logistics: problems and solutions: Textbook and practical manual. Moscow, Publishing house «Alfa-Press», 2014, 304 p.

¹⁰ Zamkov, O. O., Tolstopiatenko, A. V., Cheremnykh, Yu. N. Mathematical methods in economics: Textbook. Moscow, Lomonosov Moscow State University, Publishing House «DIS», 1998, 368 p.

¹¹ Kremer, N. Sh. Operations research in economics: Study guide. Moscow, UNITY publ., 2005, 407 p.

¹² Anikin, B. A., Tyapukhin, A. P. Commercial logistics: Textbook. Moscow, TK «Velbi», Publishing house «Prospect», 2005, 432 p.

The problems of rational distribution of productive forces are reflected in the formation of state socio-economic policy. Thus, the 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, dated February 13, 2019, No. 207-r¹³, formulated the main problems, trends, challenges, goals and objectives, both at the federal and regional level. The main objective of this document is to ensure balanced and sustainable development of the socio-economic space of the Russian Federation. It envisages the directions for reducing interregional differences in terms of the economy, social sphere, technology and elements of the national security system.

MATERIALS AND METHODS

The materials for the study comprise the scientific, methodological and methodological apparatuses that were analysed in the section «Literature and research review» of this work, as well as the results of implementation of strategies and programs for formation of spatial models of TLC networks of government agencies and businesses. The methodological approach proposed in the study consists in the application of analytical models and dependencies for determining the quantitative and geographical parameters of creating cargo distribution systems in supply chains based on the use of a TLC network. For this purpose, to achieve the effect of resource saving, it was necessary to solve problems on calculating and justifying a cargo distribution system with a minimum sufficient and economically feasible number of TLC facilities. This made it possible to achieve a more efficient model of cargo delivery, which ensured a reduction in transportation costs in the context of the planned positive expectations from the proposed activities.

As a priority theoretical base, the article uses mathematical methods, in particular, the regression-correlation analysis. The rationale of the use of this type of analysis is based on the choice of a rather complex object of optimisation which is the regional transport and logistics network and of the universality and

¹³ 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, No. 207, dated 13.02.2019 (as amended on 16.12.2021). [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318094/. Last accessed 05.05.2024.

availability of the very method of analysis and optimisation which is regression-correlation analysis. Due to its relative simplicity and versatility, the mathematical apparatus used for the selected object of study has several drawbacks, the main of which are the assumptions made on the volume of cargo processed and transported, the incomplete structure of logistics costs used in the calculations, and the errors inherent in this method. In addition, the model does not provide for the choice of the mode and type of transport for each batch when exporting goods from the TLC, which can be attributed to certain limitations of the model used in the article. Nevertheless, having defined the objective function, a system of constraints and assumptions, this method can be used to solve such problems.

Besides, the work used the fundamentals of formation and development of industry and regional economies. The works of Russian and foreign scientists were used to analyse and evaluate cargo distribution systems.

The empirical basis of the study comprise reports on the costs of companies performing the functions of transportation and cargo handling, industry statistical reporting documents, regional and federal planning documents of the main socio-economic indicators.

The analytical prerequisites for using the proposed research methods to form a resource-saving mechanism in distribution of goods are the need to use a special mathematical apparatus adequate to the specifics of the problem being solved in the conditions of the prevalence of random variables. Since transport costs in the cargo distribution system change non-linearly, considering such a dependence requires calculating the economically advantageous number of TLCs.

The regulatory prerequisites for the study are the stipulations of the Federal Law «On Strategic Planning in the Russian Federation»¹⁴. The practices of industry strategies for development of TLCs can be summarised in development and implementation of a package of documents consisting of: the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for

the period up to 2035¹⁵; the Strategy for Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030¹⁶; the Strategy for Development of Automobile Transport and Urban Ground Electric Transport (draft)¹⁷, as well as the Federal Project «Transport and Logistics Centres» (a structural component of Section 1 «Transport Infrastructure» of the Comprehensive Plan for Modernisation and Expansion of the Mainline Infrastructure)¹⁸.

RESEARCH RESULTS

The analysis of reporting data on TLC facilities by regions and federal districts and their comparison with the dynamics of changes in regional transport indicators does not answer the question of the dependence of transportation costs on the number of TLCs. Such a relationship is visible when analysing the designed system of distribution through a TLC network of goods of a certain nomenclature and volumes.

Nevertheless, the analysis of reporting documents, for example, the reference book «The Guide of Warehouses of the Russian Federation»¹⁹ on warehouse real estate, in comparison with the dynamics of transportation costs of a conditional region taken from the reports of the Federal State Statistics Service²⁰, is of obvious scientific and practical interest.

Pics. 1 and 2 show the dynamics of the volumes of commissioning of warehouse space and the dynamics of the volumes of transactions

¹⁵ Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021, No. 3363-r. [Electronic resource]: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhL10nUT91RjCbeR.pdf> (last accessed 05.05.2024)

¹⁶ Strategy for Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008, No. 877-r. [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92060 Last accessed 05.05.2024.

¹⁷ Strategy for Development of Automobile Transport and Urban Ground Electric Transport. Draft. [Electronic resource]: <https://www.mintrans.ru/documents/7/9306>. Last accessed 05.05.2024.

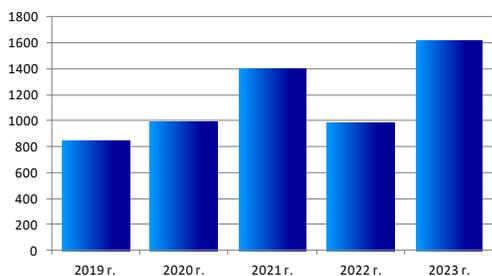
¹⁸ Comprehensive plan for modernisation and expansion of the mainline infrastructure for the period up to 2024. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of September 30, 2018, No. 2101-r. <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>. Last accessed 05.05.2024.

¹⁹ Electronic reference book «The Guide of Warehouses of the Russian Federation». [Electronic resource]: <https://гидсклады.рф>.

²⁰ Regions of Russia: socio-economic indicators. 2023: statistical collection. Moscow, Rosizdat publ., 2023, 1126 p.

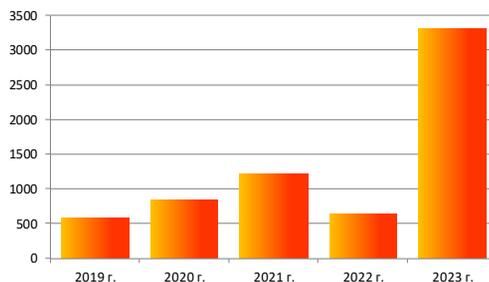
¹⁴ Federal Law of June 28, 2014, No. 172-FZ «On Strategic Planning in the Russian Federation». Adopted by the State Duma on June 20, 2014. Approved by the Federation Council on June 25, 2014.





Pic. 1. Dynamics of the volume of warehouse space commissioning in the regions of Russia, thousand sq.m.

[Source: developed by the authors using the data of Electronic reference book «Guide of Warehouses of the Russian Federation 2024»¹⁹].



Pic. 2. Dynamics of the volume of transactions with warehouse real estate in the regions of Russia, thousand sq.m.

[Source: developed by the authors using the data of Electronic reference book «Guide of Warehouses of the Russian Federation 2024»¹⁹].

with warehouse real estate in the regions of Russia.

The analysis of the data in the diagrams shows the linear nature of the dynamics of the indicators. The dynamics of the indicator in Pic. 1 generally repeats the dynamics of Pic. 2. This overlapping is due to the dependence of the input volume on the increasing values of transaction volumes, the worst indicator being 2022. There is an almost twofold excess of the input volume over the transaction volumes, except for 2023. In 2023, the transaction volumes more than twice exceeded the input volumes. That is, the increasing volumes of transactions stimulate an increase in offers on the warehouse real estate market and construction of new facilities. In addition, there is a significant decrease in the values of the indicators in 2022, and a sharp increase in 2023, due to the import substitution process. Comparison of the indicators in Pic. 1 and 2 with transportation costs and commissioning of new facilities²⁰, using the example of Samara region, indicated in Table 1, shows the presence of a seemingly obvious correlation between these time series.

However, a more detailed analysis of this relationship may show a negative correlation, since the analysis of the dependence of transportation costs on the number of logistics infrastructure facilities (TLC, warehouses) and the procedure of attaching consumers to TLCs should be assessed by product nomenclature groups and their volumes when delivered to consumers in supply chains.

The developed approach, based on determining the dependence between transportation costs and the number of TLCs, allows us to form a more economical configuration of the cargo delivery system with the minimum required number of TLCs. The approach is based on the model being shaped: «location of the

supplier – location of TLC – location of the recipient». The method for calculating this dependence includes several stages.

First, the modes of cargo delivery without TLC (a direct mode) and with TLC are assessed. For direct delivery, we use formula (1):

$$R^I = R_T + R_{lu} + R_{pack} + R_s, \quad (1)$$

where R^I – transportation costs for cargo transportation;

R_T – transportation costs;

R_{lu} – loading and unloading costs;

R_{pack} – cargo packaging costs;

R_s – expenses for storing cargo at the starting and ending points.

For delivery using TLC, costs will be calculated using formula (2):

$$R^2 = R_T + R_{lu} + R_{pack} + (n * R_s), \quad (2)$$

where n is the number of TLCs.

It is essential to consider the constraint (3) [1] for the mode of cargo delivery:

$$\Sigma \frac{P_v + T_v}{N_x} + W_x + L_x \leq \Sigma P_x + T_x, \quad (3)$$

where P_v – consolidated cargo handling costs;

T_v – transportation costs for consolidated cargo shipments;

W_x – warehouse storage costs for an average cargo shipment;

L_x – local transportation costs for medium cargo shipment;

N_x – number of average shipments in a consolidated shipment;

P_x – average shipment handling costs;

T_x – transportation costs for direct delivery of medium shipment.

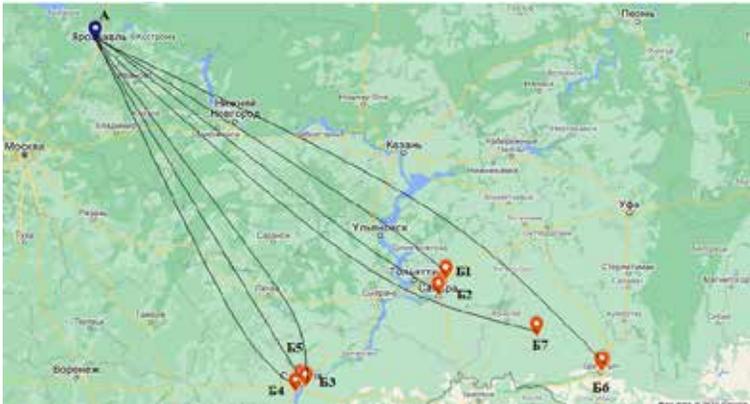
That is, the volumes of transportation must be large enough – so large that their size allows for an effect of scale with the ability to cover TLC handling costs.

Then, using a simple enumeration method, delivery routes are selected considering the

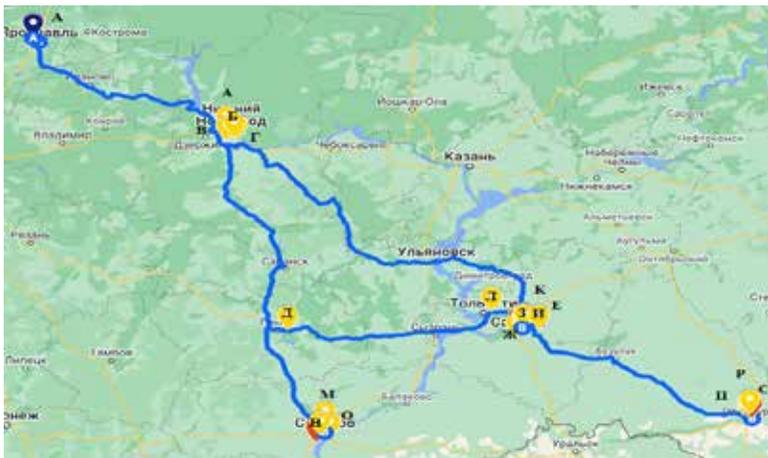
Table 1

**Aggregated regional economic indicators of Samara region
[developed by the authors based on ²⁰]**

Indicators	Years					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Construction (as compared with the previous year %)	104,5	80,7	116,2	86,8	121,8	102,1
Transportation and storage (as compared with the previous year %)	104,0	103,0	100,8	92,1	104,2	105,2



Pic. 3. Delivery of goods directly from the manufacturer (B1 – B7 are business customers).



Pic. 4. Delivery of goods from the manufacturer using TLCs (A – S).

geography and number of TLCs for each supply chain option. Table 2 shows examples of calculations for two conditional routes.

Table 3 shows the results of calculations for the selected routes.

Based on the calculated average values for each route, graphs of the dependence of transportation costs on the number of TLCs are constructed using an Excel table.

Next, an analysis of sensitivity of the increase in the number of TLCs to changes in transportation costs is carried out. Calculations are carried out

to determine the nature of this dependence. Obviously, this dependence is of a nonlinear parabolic type, where the equation of nonlinear regression of the parabolic type has the form (4)²¹:

$$y = ax^2 + bx + c, \tag{4}$$

where a, b, c – regression coefficients.

After calculating the regression coefficients and assessing the studied dependence, the

²¹ Zadorozhny, V. N., Zalmez, V. F., Trifonov, A. Yu., Shapovalov, A. V. Higher Mathematics for Technical Universities. Linear Algebra: Study guide. Tomsk, TPU Publishing House, 2009, 310 p.



Selecting routes and calculating the cost for each route

Route	S-A-D-L-K-I-C1									
Departure	Reception	L, km	R _T	R _s	R _{pack}	Loading	Unloading	R _{lu}	R	
S	A	L ₁	R _{T1}	R _{s1}	R _{pack1-5}	Load ₁	Unload ₁	R _{lu1}	R ₁	
A	D	L ₂	R _{T2}	R _{s2}		Load ₂	Unload ₂	R _{lu2}	R ₂	
D	L	L ₃	R _{T3}	R _{s3}		Load ₃	Unload ₃	R _{lu3}	R ₃	
L	K	L ₄	R _{T4}	R _{s4}		Load ₄	Unload ₄	R _{lu4}	R ₄	
K	I	L ₅	R _{T5}	R _{s5}		Load ₅	Unload ₅	R _{lu5}	R ₅	
									Total	Σ

Route	S-A-D-L-K-I-C1									
Departure	Reception	L, km	R _T	R _s	R _{pack}	Loading	Unloading	R _{lu}	R	
S	A	L ₁	R _{T1}	R _{s1}	R _{pack1-6}	Load ₁	Unload ₁	R _{lu1}	R ₁	
A	D	L ₂	R _{T2}	R _{s2}		Load ₂	Unload ₂	R _{lu2}	R ₂	
D	L	L ₃	R _{T3}	R _{s3}		Load ₃	Unload ₃	R _{lu3}	R ₃	
L	K	L ₄	R _{T4}	R _{s4}		Load ₄	Unload ₄	R _{lu4}	R ₄	
K	C1	L ₆	R _{T6}	R _{s6}		Load ₆	Unload ₆	R _{lu6}	R ₆	
									Total	Σ

where S is the supplier C1 is the customer No. 1; A, D, L, K, I are the TLCs on the selected delivery routes, R are transportation costs for cargo transportation; R_T are transportation costs; R_{lu} are the costs of loading and unloading operations; R_{pack} are the costs of packaging the cargo; R_s are the costs of storing the cargo.
 Source: developed by the authors.

Table 3
Results of calculations for cargo delivery along the S-C1 route considering the TLC system [developed by the authors]

Route	R, rub
S-A-D-L-K-I-C1	R ₁
S-A-D-L-K-C1	R ₂
S-A-D-L-C1	R ₃
S-D-L-C1	R ₃
S-D-C1	R ₅
S-G-D-M-I-C1	R ₆
S-D-M-I-C1	R ₇
S-D-M-C1	R ₈
S-M-C1	R ₉

correlation and determination indices are calculated²¹.

To conduct the computational experiment, a delivery of medicines to several regions of the Russian Federation was selected – Samara, Saratov and Orenburg regions from one of the manufacturers of Yaroslavl region (city of Yaroslavl). Pics. 3 and 4 show the schemes for delivery of medicines directly without TLCs and using a TLC system, respectively.

After selecting the routes, the cost of direct delivery for various customers from one of the manufacturers in Yaroslavl region is calculated.

Using the data in Table 2, we will calculate the transportation costs for several delivery routes selected for the example using TLCs. Table 4 shows the calculation results (fragment).

Calculations are made similarly for the remaining routes.

Table 5 shows the calculated values for transportation along route S-B4 taking into account the TLC system.

Pic. 5 shows the results of calculations of the dependence of transportation costs on the number of TLCs.

It is obvious that there is a dependence between transportation costs and the number of TLCs, the nature of which is nonlinear parabolic. Using correlation-regression analysis, we will determine the closeness of the relationship between these indicators with the derivation of a nonlinear regression equation.

Table 6 shows the required values for calculating the regression matrices.

The resulting nonlinear regression equation has the form:

$$Y = 2375,64x^2 - 11794,14x + 55977,78. \quad (5)$$

The correlation and determination indices are $r = 0,99$ and $R^2 = 0,98$, respectively. Pic. 6 shows the results obtained using the regression equation.

SHORT CONCLUSIONS

Thus, the computational experiment confirmed the assumption of a nonlinear parabolic relationship between transportation costs and the number of TLCs. The indices of correlation and determination confirm the closeness of the relationship between the

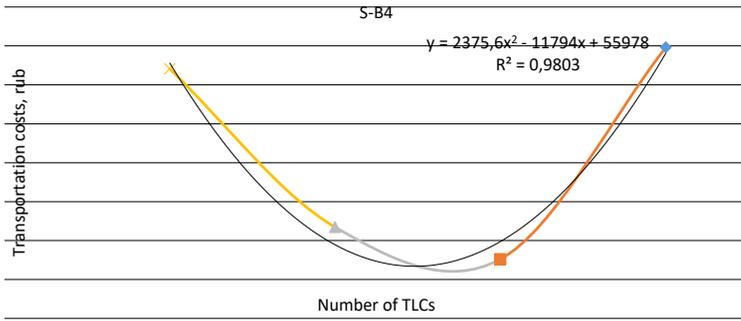


Fig. 5. Dependence of transportation costs on the number of TLCs when transporting cargo along the S-B4 route [developed by the authors].

Table 4

Results of calculations of the cost of cargo delivery along several routes S-B4 considering TLC system [developed by the authors]*

Route	P-G-D-M-N-B4								
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{in} , rub	R, rub
S	G	405	8 100	156	8 437	2 230	948	3 178	19 871
G	D	417	8 340	669		948	1 450	2 899	11 908
D	M	256	5 120	223		1 450	1 394	2 788	8 131
M	N	31	622	145		1 394	836	1 673	2 439
N	B4	22	432			836	3 345	4 181	4 613
								Total	46 962
Route	P-G-D-M-B4								
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{in} , rub	R, rub
S	G	405	8 100	156	8 437	2 230	948	3 178	19 871
G	D	417	6 255	134		948	1 450	2 899	9 288
D	M	256	3 840	223		1 450	1 394	2 788	6 851
M	B4	52	776			1 394	3 345	4 739	5 514
								Total	41 524
Route	P-D-M-B4								
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{in} , rub	R, rub
S	D	807	16 140	669	8 437	2 230	1 450	3 680	28 926
D	M	256	5 120	223		1 450	1 394	2 843	8 186
M	B4	52	1 034			1 394	3 345	4 739	5 773
								Total	42 885
Route	P-G-M-B4								
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{in} , rub	R, rub
S	G	405	8 100	781	8 437	2 230	948	3 178	20 495
G	M	609	12 180	446		948	1 394	2 342	14 968
M	B4	52	1 603			1 394	3 345	4 739	6 341
								Total	41 804

*Price indices are indicated as for late 2023.

empirical and theoretical values, which did not fall below 0,89. This confirms that the theoretical model corresponds to the real situation with acceptable accuracy. Consequently, the approach can be used to calculate and forecast the dependence of transportation costs on the number of TLCs on the route, and that is practically important for both suppliers and customers.

The results of the study, within the boundaries of which the problem of finding an approach to reducing the costs of cargo delivery in the context of a resource-saving paradigm, helped to confirm the put forward assumption about the obvious dependence of transportation costs, including storage costs and loading and unloading operations in TLCs on the number of TLCs the routes.



Results of calculations of the cost of cargo delivery along several routes S-B4 considering TLC system [developed by the authors]*

Route		P-G-D-M-N-B4							
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{lu} , rub	R, rub
S	G	405	8 100	156	8 437	2 230	948	3 178	19 871
G	D	417	8 340	669		948	1 450	2 899	11 908
D	M	256	5 120	223		1 450	1 394	2 788	8 131
M	N	31	622	145		1 394	836	1 673	2 439
N	B4	22	432			836	3 345	4 181	4 613
								Total	46 962
Route		P-G-D-M-B4							
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{lu} , rub	R, rub
S	G	405	8 100	156	8 437	2 230	948	3 178	19 871
G	D	417	6 255	134		948	1 450	2 899	9 288
D	M	256	3 840	223		1 450	1 394	2 788	6 851
M	B4	52	776			1 394	3 345	4 739	5 514
								Total	41 524
Route		P-D-M-B4							
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{lu} , rub	R, rub
S	D	807	16 140	669	8 437	2 230	1 450	3 680	28 926
D	M	256	5 120	223		1 450	1 394	2 843	8 186
M	B4	52	1 034			1 394	3 345	4 739	5 773
								Total	42 885
Route		P-G-M-B4							
Departure	Reception	L, km	R _t , rub	R _s , rub	R _{pack} , rub	Loading, rub	Unloading, rub	R _{lu} , rub	R, rub
S	G	405	8 100	781	8 437	2 230	948	3 178	20 495
G	M	609	12 180	446		948	1 394	2 342	14 968
M	B4	52	1 603			1 394	3 345	4 739	6 341
								Total	41 804

*Price indices are indicated as for late 2023.

Table 5
Calculated values for transportation along the route S-B4 considering the TLC system [developed by the authors]

Route	R, rub
S-G-D-M-N-B4	46 962
S-G-D-M-B4	41 524
S-D-M-B4	42 885
S-G-M-B4	41 804
S-G-B4	43 808
S-M-B4	49 009

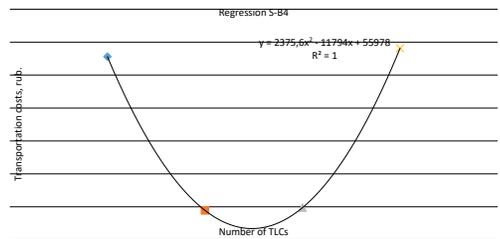


Fig. 6. Calculation of the studied dependence using the regression equation [developed by the authors].

Table 6
Necessary values for calculating P-B4 regression matrices [developed by the authors]

№	X	Y	x ²	x ³	x ⁴	xy	yx ²	y	(Y-y) ²	(Y-yav) ²
1	1	46408,45	1	1	1	46408,45	46408,45	46559,28	22750,44	4404699,09
2	2	42344,55	4	8	16	84689,10	169378,20	41892,05	204753,99	3861863,65
3	3	41523,6	9	27	81	124570,80	373712,40	41976,10	204753,99	7762422,86
4	4	46962,25	16	64	256	187849,00	751396,00	46811,42	22750,44	7035955,19
Σ	10	177238,85	30	100	354	443517,35	1340895,05	177238,85	455008,86	23064940,80

Economic effect of using the proposed approach [developed by the authors]

Delivery routes	Costs reduction, rub.	Economic effect, %
S-B1	25286,7	5,1
S-B2	22126,6	8,8
S-B3	16146,7	26,9
S-B4	28017,9	10
S-B5	23121,1	16
S-B6	14084,5	5,6
S-B7	7257,5	6,1

In addition, it was possible to identify the problem of not considering this dependence into account by government authorities and the business community. The lack of due attention to the problem of high costs in direct delivery compared to delivery through a TLC system significantly reduces the efficiency of economic activity of enterprises providing transport and logistics services.

Knowledge and implementation of the proposed approach within the framework of the resource-saving strategy can help reduce the cost of these services, which is economically beneficial for all participants in the logistics chain.

The main results of the study include the developed scientific and practical approach to reducing costs in the context of the resource-saving strategy, which is based on the principle of rational organisation of the spatial selection of infrastructure facilities of the transport and logistics network and the resulting economic effect compared to direct delivery, shown in Table 7.

The developed approach with the justification of the rational quantity and location of TLCs, ensuring the reduction of costs in the cargo delivery system, can be used in making management decisions and calculating delivery costs for different configurations of the TLC network with different numbers of TLCs.

REFERENCES

1. Bowersox, D. J., Closs, D. J. *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process* [Russian Transl. from

English]. Moscow, CJSC «Olimp-Business», 2001, 640 p. ISBN 5-901028-22-8.

2. Waters, C. D. J. *Logistics: An Introduction to Supply Chain Management* [Russian Transl. from English]. Moscow, UNITY-DANA publ., 2003, 503 p. ISBN 5-238-00569-5.

3. Schutt, J. H. *Directing the Flow of Product: A Guide to Improving Supply Chain Plannin*. [Russian Transl. from English by S. V. Krivoshein. Scient. Ed. A. N. Tarashkevich]. Minsk, Grevtsov Publisher, 2008, 352 p. ISBN 978-985-6569-18-3.

4. Clark, A., Scarf, H. *Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem*. *Management Science, INFORMS*, 1960. Vol. 6, Iss. 4, pp. 475–490. DOI: 10.1287/mnsc.6.4.475.

5. Shingo, S. *Non-Stock Production. The Shingo System of Continuous Improvement*. Cambridge, MA: Productivity Press. 1988.

6. Tayur, S., Ganeshan, R., Magazine, M. *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Norwell, MA: Kluwer Academic. 1999. [Electronic resource]: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-4949-9> [access limited for subscribers]. ISBN 978-0-7923-8344-4.

7. Reeve, J. M. *The financial advantages of the lean supply chain*. *Supply Chain Management Review*, 2002. March/April, pp. 42–49.

8. Shapiro, J. *Modeling the Supply Chain*. [Russian Transl. from English. Ed. V. S. Lukinsky]. St.Petersburg, Piter publ., 2006, 720 p. ISBN 5-272-00183-4.

9. Turner, J. C. *Modern applied mathematics: Probability, statistics, operational research* [Russian Transl. from English by E. Z. Demidenko, V. S. Zanadvorova. Ed. by A. A. Ryvkin]. Moscow, Statistika publ., 1976, 432 p.

10. Lösch, A. *Spatial organization of the economy* [Russian Transl. from German. Ed. by academician A. G. Granberg]. Moscow, Nauka publ., 2007, 663 p. ISBN: 978-5-02-035367-1.

11. Bolgova, E. V., Kurnikova, M. V. *Modeling the spatial organization of the higher education system in the regional economy. Sustainable Growth and Development of Economic Systems: Contradictions in the Era of Digitalization and Globalization*, 2019, pp. 43–61. DOI: 10.1007/978-3-030-11754-2_4.

12. Tyapukhin, A. P. *Sustainability of Resource Supply Systems. World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17 (6), pp. 142–165. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-142-165>.

Information about the authors:

Khaitbaev, Valery A., D.Sc. (Economics), Professor at the Department of Transport Economics and Logistics of Samara State Transport University, Samara, Russia, vkhaitbaev21@mail.ru.

Kostrov, Vladimir N., D.Sc. (Economics), Professor, Head of the Department of Logistics and Marketing of Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia; vnkostrov@yandex.ru.

Cherniaev, Evgeny V., Ph.D. (Economics), D.Sc. student of Volsk Military Institute of Material Support, Volsk, Russia; ki-la@mail.ru.

Article received 05.05.2024, approved 26.08.2024, accepted 28.08.2024.





ORIGINAL ARTICLE

УДК 656.211.5

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-10>

Methodology for Determining the Rational Order of Using Shunting Locomotives at a Passenger Station



Ekaterina B. KULIKOVA



Pavel A. MINAKOV

Ekaterina B. Kulikova¹, Pavel A. Minakov²

^{1,2}*Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

¹*ORCID 0000-0002-2904-0626; Scopus Author*

ID: 57214271685; Russian Science Citation Index

SPIN-code: 9454-4823; Russian Science Citation Index

Author ID: 360594.

²*ORCID 0000-0002-1194-2621; Russian Science*

Citation Index SPIN-code: 2484-3100; Russian

Science Citation Index Author ID: 1057564.

✉ ¹ iuit_kulikova@inbox.ru.

ABSTRACT

Railway transport is one of the most important modes of passenger transportation in the Russian Federation. In 2023, it accounted for more than 35 % of all travellers. At the same time, long-distance transportation accounts for almost 37 % of the total volume of transportation by rail. The analysis of the dynamics of changes in passenger turnover and transportation volumes suggests that the market has not only recovered from the unprecedented decline of 2020 but continues to grow steadily. The growth in passenger transportation volumes entails an increase in the volume of work at passenger and passenger technical stations. The load on station complexes increases (especially during periods of mass transportation). Carriers are constantly working on new transportation products that are distinguished by speed and level of comfort. For example, today, JSC FPC alone offers its customers about 90 combinations of offers that differ not only in the category of train, type of car, but also in the range of services offered during

the travel. In this case, obviously, the key requirement, regardless of the class, is the high quality of preparation of trains for the trip and the coordinated work of all passenger departments.

Currently, most studies of the passenger infrastructure of railway transport are devoted to the study of its individual objects, for example, to the design and operation features of transfer hubs, the technology of passenger and passenger technical stations. At the same time, little attention is paid to the integrated functioning of the «passenger station – passenger technical station – transport interchange hub as of a single system. The article proposes a mathematical formalisation of the process of rational sequence of servicing passenger trains using linear programming methods, which allows solving a number of operational problems and conducting research to assess the level of influence of various factors on the performance of passenger and passenger technical stations.

Keywords: transport interchange hub, passenger station, passenger technical station, occupancy of receiving and departure tracks, load of shunting locomotive, regularity of station operation.

For citation: Kulikova, E. B., Minakov, P. A. Methodology for Determining the Rational Order of Using Shunting Locomotives at a Passenger Station. *World of Transport and Transportation*, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 218–228. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-10>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The functioning of the complex «passenger station – passenger technical station – transport interchange hub (hereinafter – TIH)» as a single system is based, first, on the technology of servicing passenger trains [1–5]. The procedure for servicing passenger trains at stations is fundamentally different from that of cargo trains.

Thus, with a certain load of «station service devices» and uneven arrival of cargo trains for servicing, a queue appears, depending on the «capacity» of the arrangements that ensure the transition of cargo cars from one service system to the next one. The time spent by cargo cars (cargo trains) at the station, unlike passenger cars, depends on the «capacity» of the service arrangements, the volume of car flows and is often not tied to specific schedule threads.

In passenger traffic, based on the turnover schedule, trains are tied to certain threads of the train schedule for departure and their servicing is subordinated to the main goal – departure of a ready train with passengers at a fixed time, according to the schedule. Under these conditions, the load of servicing arrangements (shunting locomotives, receiving and departure tracks, equipment tracks, etc.) should not be formally determined as a share of the time of the work directly performed in relation to the time under consideration (day or the value of the intensive period of work). The preparation and delivery of trains for departure according to the schedule will assume certain intervals between the end of operations with one train and the beginning of work with another. If these intervals are of such

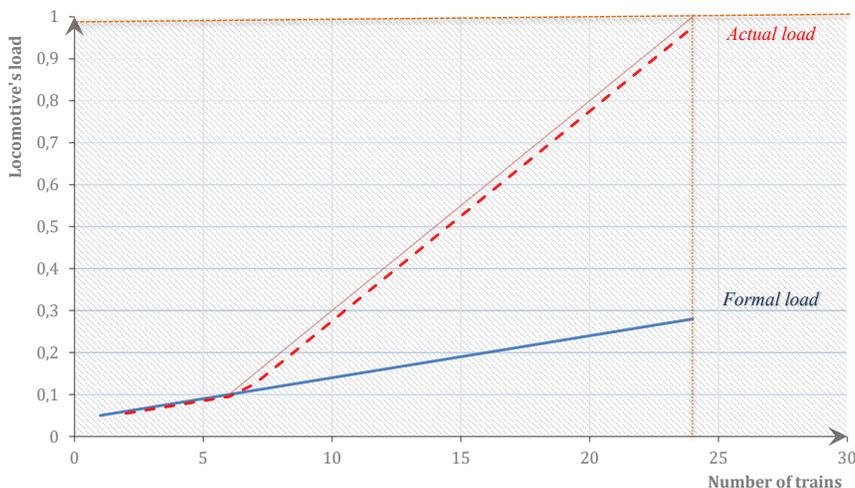
a duration that they cannot be used for the locomotive to perform other operation, they should also be attributed to the work time, increasing the load of locomotives [6].

Then, with a fixed departure schedule, for example, of long-distance passenger trains and considering the actual volume of operations of station arrangements, the workload of the shunting locomotive will represent a certain dependence on the number of trains dispatched over a certain period of time (Pic. 1).

The analysis of the operation of shunting locomotives at passenger stations showed [7]:

– There are periods in their work (the period of intensive arrival and departure of trains, the period before and after technical maintenance (hereinafter referred to as TM) of the locomotive, operations to change locomotive crews), when the locomotive load is practically equal to one. Thus, at Moscow-passenger Kazanskaya station, the first locomotive with an average daily load of 0,72 has two periods of 3,5 hours, when there are not even small breaks in its work. The second locomotive with an average daily load of 0,65 also has two such periods lasting six and five hours. Moreover, there are practically no reserves for increasing the volume of work of locomotives.

– In order to reduce the locomotive load during such periods, the practices are to «prematurely» withdraw trains to the receiving and departure tracks (hereinafter referred to as RDT) or later withdraw trains from RDT for subsequent work with them in accordance with the technological process (along the technological



Pic. 1. General nature of changes in the load of a shunting locomotive depending on the number of passenger trains served at the station [performed by the authors].

line). Which, in turn, leads to an increase in the duration of RDT occupancy.

In practice, it is usually necessary to answer two questions at the same time:

1. Will the shunting locomotive cope with the given volume of work?

2. Is it possible to implement the «premature» withdrawal of trains to the receiving and departure tracks and/or the withdrawal of trains from RDT with a delay relative to the technological time, reducing the unproductive downtime of the shunting locomotive when performing a given volume of work, based on the existing number of RDTs and the arrival/departure schedule of passenger trains (the given number of passenger trains)?

The answer to these questions is actually a solution to the problem of checking the sustainability of shunting locomotives with a given volume of work, technical and technological capabilities of the station and a fixed schedule of arrival and departure of passenger trains to the station.

Let's consider the conditions for a shunting locomotive could perform a given volume of work.

Formally, the average daily load of a shunting locomotive can be determined by formula (1):

$$\Psi_{loc} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{oper}}{(1440 - T_{break}) \cdot K_r \cdot \alpha_{host}}, \quad (1)$$

where

t_i^{oper} – operating time of a locomotive with the i -th train number, which is defined on the time axis, subject to the increase of technologically justified times for the start of operation with it (based on the arrival and departure times of passenger trains and mail and baggage trains, as well as the start times of TM operations and crew rotation);

n – the total number of trains arriving and departing per day, with which the shunting locomotive works (moving trains between RDT and the parking/equipment/repair/... tracks);

T_{break} – breaks in the operating time of a shunting locomotive (the time that the locomotive is not in the working yard during the day);

K_r – coefficient that considers possible interruptions in shunting operations due to failures of technical equipment (infrastructure reliability coefficient)¹;

¹ Methodology for assessing and monitoring the efficiency of using shunting locomotives: approved by order of JSC Russian Railways, dated December 1, 2017, No. 2485/t.

α_{host} – the coefficient of hostility of movements, which considers the duration of operations that cause interruptions in the performance of shunting work, within the total duration of the day.

In cargo traffic, a queue of trains is formed to perform operations. It can be larger or smaller depending on the period of the day and the intensity of work with trains. In any case, when the locomotive load is less than 1,0 (and in intensive periods it can be more than 1,0), the locomotive on average performs a given volume per day, only increasing the average time of passage of trains along the technological line due to queues [8; 9].

In passenger traffic, trains are tied to arrival and departure times, and in all cases these schedules must be respected. Therefore, the condition $\Psi_{loc} \leq 1$ is necessary (hereinafter – NC), but not sufficient.

Let us determine the sufficient conditions (hereinafter – SC) for performing operations with passenger trains for a shunting locomotive, subject to a given fixed schedule for performing operations.

Let be defined:

$t_i^{start.oper.}$ – technologically justified times for the start of operations of a shunting locomotive with passenger, mail and baggage trains upon arrival and departure (based on the arrival and departure schedule of these trains);

i – the sequential number of the operation of a shunting locomotive with trains, determined in ascending order of times located on the time axis.

Then the daily time interval will be divided into $(n + 1)$ intervals, the boundaries of which will be the adjacent start times of operations on the time axis, including the start and end times of the day.

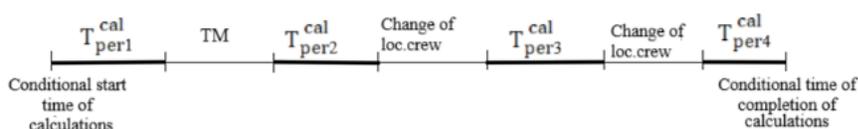
Let us group the start times of the shunting locomotive operations with trains into separate non-overlapping calculation time periods T_{per}^{cal} (Pic. 2), the boundaries of which will be:

– start and end times of the total (cumulative) period – day;

– start and end times of periods when a shunting locomotive carries out work not related to working with trains (technical inspection, equipment, exchange of locomotive crews).

In the example shown in Pic. 2, there are four calculation periods in a day:

1. From zero minute (conditionally) until the start time of locomotive TM.



Pic. 2. Periods of occupancy of a shunting locomotive during the day [performed by the authors].

2. From the time of completion of locomotive TM to the time of the start of the first rotation of the locomotive crew.

3. From the end of the first rotation of the locomotive crew to the start of the second rotation of the locomotive crew.

4. From the end of the second rotation of the locomotive crew to 1440th min (conditionally) – the end of the estimated day.

The start times of operation ($t_i^{\text{start.oper.}}$), located on the time axis segments that lack the technologically justified working time of the shunting locomotive in a given calculation period ($T_{\text{per}}^{\text{cal}}$) (or they fall on a non-working time segment for the locomotive), are transferred to other calculation periods in accordance with the following rules:

– hours of operations with trains upon arrival – to the next (after the non-working period) calculation period: $t_{i,\text{arr}}^{\text{start.oper.}} = T_{\text{per}}^{\text{start}}$;

– hours of operations with trains intended for departures – to the previous (before the non-working period) calculation period:

$$t_{i,\text{dep}}^{\text{start.oper.}} = T_{\text{per}}^{\text{end}} - t_i^{\text{oper.}}$$

NC for the execution of a given volume of operations by a shunting locomotive with unconditional respect of the schedule of arrival and departure of passenger trains should be considered as compliance with inequalities for each of such calculation periods ($T_{\text{per}}^{\text{cal}}$). (2):

$$\frac{\sum_{i=1}^k t_i^{\text{oper.}}}{T_{\text{per}}^{\text{oper}}} \leq 1, \quad (2)$$

where k – the total number of locomotive operating times within the time period of the calculation period, including those carried over to the given calculation period;

i – sequential number of the locomotive operation in the time segment of the calculation period, determined in ascending order of location on the time axis.

SC consists in the fact that within each calculation period ($T_{\text{per}}^{\text{cal}}$). all time intervals free from operations are used by shifting the technologically justified times of the start of operations by a shunting locomotive with trains ($t_i^{\text{start.oper.}}$). within the permitted time interval,

located to the left or to the right on the time axis from the technologically justified time of the start of operation depending on the nature of the operation (upon arrival or before departure).

SC must be fulfilled for all calculation periods. Otherwise, a recalculation should be carried out considering the transfer of the first times of the start of operation (intended for train departure) to the adjacent previous calculation period and the last times of the start of operation (intended for train arrival) to the adjacent subsequent calculation period. This can achieve a redistribution of the volumes of locomotive work within the calculation periods, but to the detriment of the total time of occupation of RDT trains.

Analytically, SC for the calculation period (without the permitted shift of the technologically justified time of the start of operations with the train) takes the form (3):

$$\frac{t_n^{\text{oper.}}}{t_{n+1}^{\text{start.oper.}} - t_n^{\text{start.oper.}}} \leq 1 \quad \forall n = k, k-1, \dots, 1, \quad (3)$$

where $t_{k+1}^{\text{oper.}} = T_{\text{per}}^{\text{cal}}$.

Let us consider examples of the execution of NC and SC at $t_i^{\text{oper.}} = 30 \text{ min}^2$ for two adjacent calculation periods over a common time interval of 600 min (Pic. 3).

The first calculation period ($T_{\text{per1}}^{\text{cal}}$):

$$k = 5, \text{ necessary condition } \psi = \frac{150}{240} = 0,625$$

$$n = 5, \frac{30}{240 - 210} = 1;$$

$$n = 4, \frac{30}{210 - 210} = \infty, \text{ SC is not met};$$

$$n = 3, \frac{30}{210 - 150} = 0,5;$$

$$n = 2, \frac{30}{150 - 120} = 1;$$

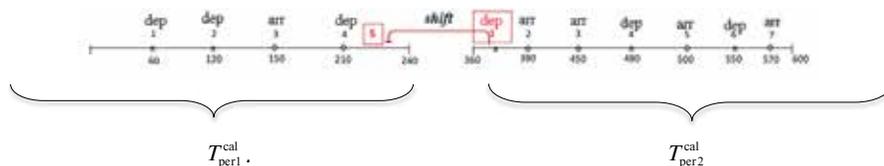
$$n = 1, \frac{30}{120 - 60} = 0,5.$$

The second calculation period ($T_{\text{per2}}^{\text{cal}}$):

$$k = 7, \text{ necessary condition } \psi = \frac{180}{240} = 0,75$$

² To solve the example, a random time is used to check the progress of the calculations.





Pic. 3. An example of performing NC and SC for adjacent calculation periods in a common time period [performed by the authors].

$$n = 6, \frac{30}{600 - 570} = 1;$$

$$n = 5, \frac{30}{570 - 550} = 1,5; \text{ SC is not met};$$

$$n = 4, \frac{30}{550 - 500} = 0,6;$$

$$n = 3, \frac{30}{500 - 480} = 1,5; \text{ SC is not met};$$

$$n = 2, \frac{30}{480 - 450} = 1;$$

$$n = 1, \frac{30}{450 - 380} = 0,467.$$

Failure to comply with SC (without the permitted shift in the technologically justified start time of operation with the train) does not mean that the shunting locomotive will not perform work in this calculation period. This will be possible if the shift is permitted subject to an increase in the time of occupancy of RDT by trains.

Let us assume (within the framework of this local problem) that an unlimited increase in the time of occupancy of RDT by trains is permissible (i.e., RDT load is small and is not limiting).

The use (or inability of using) of free time intervals for the shunting locomotive to perform operation in the calculation period depends on:

- the specified schedule of arrival and departure of passenger trains at/from the station;
- the sequence of work in this period with trains upon arrival and before departure, since the possibility of shifting from the technologically justified time of work with the train in these variants is different (to the right or to the left on the time axis).

Then the problem of the shunting locomotive performing its operations is reduced to solving the problem of finding the minimum of a linear function under given constraints in the form of equalities and inequalities. Let us state this problem.

Designations:

- n – number of passenger trains within the period of time under consideration;
- m – number of other trains requiring locomotive shunting;

t_i^{arr} – the time of arrival of the i -th passenger train at the station (time can be counted from any time point). The duration of the calculation period can be any (i is a sequential (conditional) number of the train within a time period);

t_i^{dep} – departure time of the i -th passenger train from the station according to the schedule;

t_i^{rem} – time for removal (rearranging) of the i -th passenger train from RDT on the servicing (storage) track, including the time necessary for moving the locomotive to the train and returning it to the parking place, the time for rearranging the mail and baggage cars to the loading and unloading places (if necessary) and the time for additional assembling of the train if an idle time is planned for it;

t_i^{del} – time of delivery (relocation) of the i -th passenger train from the parking tracks to RDT, including the time of movement of the locomotive to the train and its return to the parking place, including the time for coupling mail and baggage cars to the passenger train and additional assembling of the train when it is relocated from the parking tracks;

$t_i^{oper arr m-b}$ – the time of operation of the locomotive with the arriving mail and baggage train, including the time of the locomotive moving to the train and returning it to its parking place upon the arrival of the train;

$t_i^{arr m-b}$, $t_i^{dep m-b}$ – schedule of arrival and departure of the i -th mail and baggage train, respectively;

$t_i^{start oper m-b arr}$ – the shortest on the number axis (the earliest) technologically justified time of starting work with the i -th mail and baggage train after its arrival (4):

$$t_i^{start oper m-b arr} = t_i^{arr m-b} + t_i^{tech arr m-b}, \tag{4}$$

where $t_i^{tech arr m-b}$ – technologically necessary time from the moment of arrival of the i -th mail and baggage train until the moment the shunting locomotive starts operation with it;

$t_i^{oper dep m-b}$ – the time of operation of the locomotive with the mail and baggage train, including the time of the locomotive moving to the train and returning it to the parking place when the train departs;

$t_i^{\text{start oper m-b dep}}$ – the longest on the number axis (the latest) technologically justified time of the start of work with the i -th mail and baggage train upon its departure (5):

$$t_i^{\text{start oper m-b dep}} = t_i^{\text{dep m-b}} - t_i^{\text{tech dep m-b}}, \quad (5)$$

where $t_i^{\text{tech dep m-b}}$ – technologically necessary time from the moment of completion of operation with the i -th mail and baggage train until the moment of its departure;

$t_i^{\text{start oper arr}}$ – the shortest on the number axis (the earliest), technologically justified time of the start of work with the i -th passenger train when it is moved from RDT (6):

$$t_i^{\text{start oper arr}} = t_i^{\text{arr}} + t_i^{\text{disemb}}, \quad (6)$$

where t_i^{disemb} – the time of disembarking of passengers from the i -th passenger train (provided that it is limiting in relation to technical operations carried out with the train in parallel);

$t_i^{\text{start oper dep}}$ – the longest on the number axis (the latest) technologically justified time of starting work with the i -th passenger train by rearranging it to RDT (7):

$$t_i^{\text{start oper dep}} = t_i^{\text{dep}} - t_i^{\text{emb}} - t_i^{\text{tech}}, \quad (7)$$

where t_i^{emb} – time of embarking of passengers into the i -th passenger train;

t_i^{tech} – technologically necessary time from the moment of completion of boarding of passengers until the moment of departure.

In addition, if there may be hostility at the station when moving trains from RDT and back, they must be considered as additional waiting time (8):

$$T_w = M[n_w^{\text{cross}}] t_{\text{occ}}^{\text{cross}}. \quad (8)$$

For example, if $t_{\text{occ}}^{\text{cross}} = 0,2$ hour ,

$$M[n_w^{\text{cross}}] = \left(0,075 + \frac{0,1}{0,2}\right) \psi_{\text{cross}} = 0,575 \psi_{\text{cross}}.$$

If $\psi_{\text{cross}} = 0,8$, then $M[n_w^{\text{cross}}] = 0,46$, $T_w = 0,092$ hour = 5,5 min.

If $\psi_{\text{cross}} = 0,7$, then $M[n_w^{\text{cross}}] = 0,4025$, $T_w = 0,08$ hour = 4,8 min.

If $\psi_{\text{cross}} = 0,76$, then $M[n_w^{\text{cross}}] = 0,437$, $T_w = 0,087$ hour = 5,2 min.

This time should be considered when calculating the total time of movement of trains, if necessary.

The performance indicators of a single «service system», which means the movement of trains from RDT and back with significant traffic loads on the routes, can be calculated using the methodology described in [10–12] differentially for different time periods depending on the load of the route intersections, including «overload» periods, i.e., when the demand for

using intersections exceeds their capacity. The corresponding calculations are given in (9):

$$M[n_w^{\text{cross}}] = \begin{cases} \frac{0,1(1+0,75t_{\text{occ}}^{\text{cross}})}{t_{\text{occ}}^{\text{cross}}} \psi_{\text{cross}}, n_{\text{occ}} \leq \psi_{\text{cross}} \leq 0,8 \\ \frac{2(\psi_{\text{cross}}^2 - \psi_{\text{cross}} + 0,2)(1+0,75t_{\text{occ}}^{\text{cross}})}{t_{\text{occ}}^{\text{cross}}}, \text{when } 0,8 \leq \psi_{\text{cross}} \leq 1 \\ \frac{20(\psi_{\text{cross}}^2 - 1,75\psi_{\text{cross}} + 0,77)}{t_{\text{occ}}^{\text{cross}}} + 15(\psi_{\text{cross}}^2 - 2,3\psi_{\text{cross}} + 1,32), \\ \text{when } 1 < \psi_{\text{cross}} \leq 1,2 \end{cases}, \quad (9)$$

where $M[n_w^{\text{cross}}]$ – the mathematical expectation (average number) of passenger trains waiting extra time due to hostility;

ψ_{cross} – load factor of the «service system» (hostile train routes);

$t_{\text{occ}}^{\text{cross}}$ – average time of occupation of a hostile route when moving trains, hours.

The duration of the periods of differentiated calculation of the time of waiting for a rearrangement may be less than the calculated periods of operation of shunting locomotives depending on the change in the intensity of occupancy of routes with hostility and is determined for specific passenger stations.

Let us set the problem for a single shunting locomotive.

During the considered period, the locomotive must perform the operation of moving (rearranging) of (n) passenger trains on the servicing (storage) track, of moving (rearranging) them to RDT, and perform operations with (m) mail and baggage trains upon arrival and before departure.

At the same time, the sum of deviations of the actual start times of operations with trains from those dictated by the technological processes of work with passenger and mail and baggage trains and the schedules of their arrival and departure must be minimal, which will ensure the optimal balance of occupancy of RDT and storage tracks with the unconditional fulfillment of the specified volume of work.

Thus, this problem is a linear programming problem of finding the minimum of the objective function under constraints of the types of equalities and inequalities type [13; 14].

The absence of a solution to this problem with the given initial data will indicate the impossibility of performing the given volume of operation for the locomotive under the conditions of a fixed schedule.

Let us represent the problem mathematically with the above notations.

Let us introduce the numbering of the start times of operations with arriving and departing passenger and mail and baggage trains [15]. From



here on, as the i -th arriving (departing) train we will mean not a specific train that arrives at the station (departs from the station), but a train that arrives at the station (departs from the station) along the i -th «thread» and is serviced at the station in accordance with the accepted technology of work with a train arriving at the station (departing from the station) for a specific purpose of the i -th «thread» of the schedule. The count can be started from any moment accordingly with time passed.

The unknown (required) values in the problem will be the actual recommended start times for operation with passenger and mail-baggage trains (Pic. 3).

The total minimum number of unknowns is $(2m + 2n)$ depending on the value of the period of time under consideration, i.e., $x_i, i = 1, \dots, 2(m + n)$ (here the numbering is as defined above).

The constraints in the problem will be:

1. For all times determining the start operation time of the shunting locomotive for removal of passenger trains from RDT (10):

$$t_i^{\text{start oper arr}} \leq x_i \leq t_i^{\text{start oper arr}} + \Delta, \quad (10)$$

where Δ – the maximum possible (established by will or through other considerations) time interval during which a train must vacate RDT. This value may be established differentially for different time periods or for each train depending on the actual occupancy of the parking tracks at certain periods of time.

2. For all times that determine the start operation time of the shunting locomotive to deliver a passenger train to RDT (11):

$$t_i^{\text{start oper dep}} - \Delta \leq x_i \leq t_i^{\text{start oper dep}}, \quad (11)$$

where Δ – the maximum possible (established by will or upon other considerations) time interval that allows for the early relocation of a train from the parking (servicing) track for subsequent departure from the station. This value can also be established differentially depending on the actual occupancy of RDT, as well as on the schedule of arrival and departure of trains, primarily of transit ones.

The value $\Delta = 0$ and or $\Delta_1 = 0$ adopted in the calculations means that, due to the dense occupancy of RDT (parking) tracks, deviations from the technological schedule for operations with passenger trains are not permitted.

3. For all times that determine the start time of operations of the shunting locomotive with the arriving mail and baggage train (12):

$$t_i^{\text{start oper m-b arr}} \leq x_i \leq t_i^{\text{start oper m-b arr}} + \Delta_2, \quad (12)$$

where Δ_2 – the maximum possible (established by will or upon other considerations) time

interval during which operation must begin with the mail and baggage train upon arrival.

4. For all times that determine the start time of the shunting locomotive's operation to assemble and rearrange the mail and baggage train when it departs from the station (13):

$$t_i^{\text{start oper m-b dep}} - \Delta_3 \leq x_i \leq t_i^{\text{start oper m-b dep}}, \quad (13)$$

where Δ_3 – the maximum possible (established by will or upon other considerations) time interval that allows for early commencement of operation with a mail and baggage train before departure. The explanations for the values Δ and Δ_1 may also fully apply to the values Δ_2 and Δ_3 .

5. For all times that determine the start of technical maintenance, exchange of shunting locomotive crews (14):

$$t_i^{\text{end maint}} = t_i^{\text{start maint}} + C_j, \quad (14)$$

where C_j – fixed time for performing technical maintenance, changing locomotive crews for the j -th operation.

These values are not variables, they are given as initial information: $t_i^{\text{start maint}}$.

In some cases, a slight shift in time for the values of $t_i^{\text{start maint}}$ and the duration of the maintenance itself may be allowed.

The next group of constraints concerns ensuring the possibility for a shunting locomotive to start work with the next train after completing operations with the previous train.

6. For all times determining the start time of the shunting locomotive's operations with the next train after completion of operations with the previous train to remove (rearrange) the passenger train from RDT on the servicing (parking) track (15):

$$x_i + t_{\text{rem } i} \leq x_{i+1}. \quad (15)$$

7. For all times determining the start time of the shunting locomotive's operations with the next train after completion of operations with the previous train to deliver (rearrange) a passenger train from the parking tracks to RDT (16):

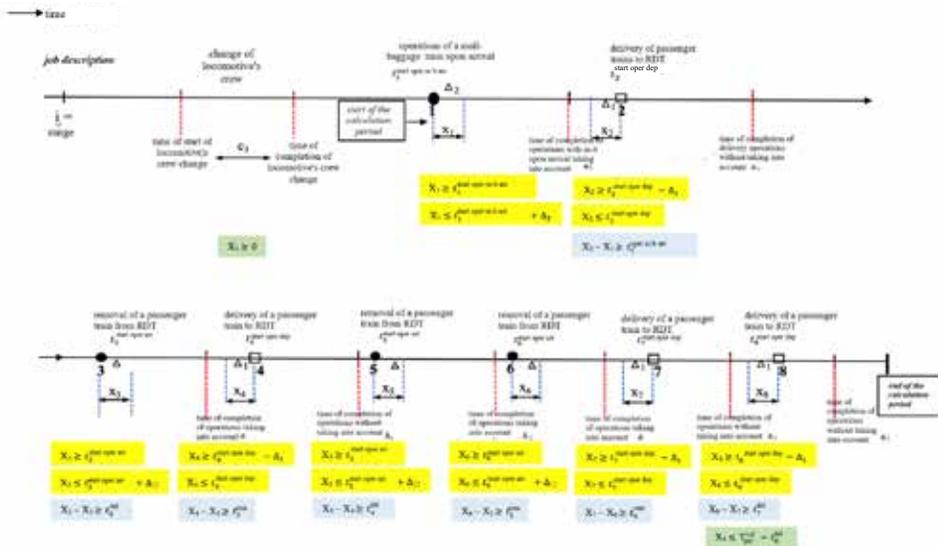
$$x_i + t_{\text{del } i} \leq x_{i+1}. \quad (16)$$

Constraints 6, 7, 8 and 9 provide the necessary «sparseness» in the operation of the locomotive.

8. For all times determining the start time of the shunting locomotive's operations with the next train after completion of operations with the previous train (mail and baggage train) upon arrival (17):

$$x_i + t_i^{\text{oper m-b arr}} \leq x_{i+1}. \quad (17)$$

9. For all times determining the start time of the shunting locomotive's work with the next train after completion of work with the previous



Pic. 4. Fragment of the placement of searched values on the time axis [performed by the authors].

train (mail and baggage train) before departure (18):

$$x_i + t_i^{\text{oper m-b dep}} \leq x_{i+1} \quad (18)$$

10. For all times defining the time before the start of technical maintenance (exchange of crews) of the locomotive (19):

$$x_i + t_i^{\text{oper(arr)dep}} \leq T_{\text{per}}^{\text{cal}} \quad (19)$$

Constraint 10 similarly (like all the constraints of this group) determines the possibility of completing operations with trains before the start of a technological break in the operation of the locomotive.

Let us consider a specific example that corresponds to the general pattern of train arrivals and departures shown in Pic. 3.

Initial data:

$$t_i^{\text{del}} = t_i^{\text{rem}}, i = 2, \dots, 8 \rightarrow 20 \text{ min.}$$

Calculation is made for $\Delta = \Delta_1 = 0, 5, 10 \text{ min.}$

$$t_i^{\text{oper arr m-b}} = 60 \text{ min.}$$

$$T_{\text{per}}^{\text{cal}} = 240 \text{ min.}$$

In this case, the formal load of the shunting locomotive is 0,83, and the direct operating time is 200 minutes.

The analytical criterion for this problem has the following form (20):

$$f(x_i, i=1, \dots, 2(m+n)) = \min \left[\sum_{i \in M_{\text{del}}} (-x_i + t_i^{\text{start oper arr}}) + \sum_{i \in M_{\text{rem}}} (-t_i^{\text{start oper arr}} + x_i) \right], \quad (20)$$

where M_{sub} – a subset of natural numbers that define in a numerical sequence the numbers of the shunting locomotive's operations for delivery of passenger trains to RDT and the operations with mail and baggage trains for their dispatch for the calculation period;

M_{rem} – a subset of natural numbers that define in a numerical sequence the numbers of the shunting locomotive's operations on removal of passenger trains from RDT and operations with mail and baggage trains upon arrival for the calculation period.

In this example (21):

$$f(x_i, i=1, \dots, 8) = \min \left[\sum_{i=2,4,7,8} (-x_i + t_i^{\text{start oper dep}}) + \sum_{i=1,3,5,6} (-t_i^{\text{start oper arr}} + x_i) \right], \quad (21)$$

$$t_1^{\text{start oper arr}} = 0; t_2^{\text{start oper dep}} = 65; t_3^{\text{start oper arr}} = 80;$$

$$t_4^{\text{start oper dep}} = 110; t_5^{\text{start oper arr}} = 120; t_6^{\text{start oper arr}} = 140;$$

$$t_7^{\text{start oper dep}} = 175; t_8^{\text{start oper dep}} = 190.$$

$$T_{\text{per}}^{\text{cal}} = 240 \text{ min.}$$

Constraints when $\Delta = 10$:

$$x_1 \geq 0;$$

$$x_1 \geq 0, x_1 \geq 0, x_1 \leq \Delta;$$

$$x_2 \geq 65 - \Delta, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20;$$

$$x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + \Delta, x_3 - x_2 \geq 20;$$

$$x_4 \geq 110 - \Delta, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20;$$

$$x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + \Delta, x_5 - x_4 \geq 20;$$

$$x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + \Delta, x_6 - x_5 \geq 20;$$

$$x_7 \geq 175 - \Delta, x_7 \leq 175, x_7 - x_6 \geq 20;$$

$$x_8 \geq 190 - \Delta, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20; x_8 \leq 240 - 20 = 220.$$

Criterion:

$$(65 - x_2) + (110 - x_4) + (175 - x_7) + (190 - x_8)$$

$$(-0 + x_1) + (-80 + x_3) + (-120 + x_5) + (-140 + x_6).$$

The reduced form of the criterion and constraints (with a fixed value of Δ and finite values of the constant):



Table 1

Solution when $\Delta = 10$

$x_1 \geq 0, x_1 \leq 10$ $x_2 \geq 65 - 10, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20 ;$ $x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + 10, x_3 - x_2 \geq 20 ;$ $x_4 \geq 110 - 10, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20 ;$ $x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + 10, x_5 - x_4 \geq 20 ;$ $x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + 10, x_6 - x_5 \geq 20 ;$ $x_7 \geq 175 - 10, x_7 \leq 175, x_7 - x_6 \geq 20 ;$ $x_8 \geq 190 - 10, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20 ;$ $x_8 \leq 240 - 20 = 220 .$	$x_1 = 0 ,$ $x_2 = 60 ,$ $x_3 = 80 ,$ $x_4 = 100 ,$ $x_5 = 120 ,$ $x_6 = 140 ,$ $x_7 = 170 ,$ $x_8 = 190 ,$
--	--

$min: x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + x_5 + x_6 - x_7 - x_8 + 200.$

The solution is shown in Table 1.

Minimal value of the criterion: $min f = 20.$

The sufficient condition without the permissible shift ($\Delta = 0$) is not satisfied. With the permissible shift $\Delta = 5$, the solution to the problem for the given initial data is also absent.

Let's change the initial data, namely, reduce the calculation period: $T_{per}^{cal} = 200min$ and shift the start of operations with the departing passenger train $t_7^{start oper dep} = 170min$.

The solution is shown in Table 2.

Minimal value of the criterion: $f = 35.$

In this case $\psi_{shunt} = 1.$ The locomotive operates at maximum capacity and any delay of the train can «break» the entire schedule of arrival and departure of passenger trains, and the time of additional occupation of RDT by passenger trains increases by 75 %.

When several locomotives are operating, it is necessary to distribute the work between them according to the following algorithm:

1. It is necessary to preliminarily determine the required (needed) number of shunting locomotives (22):

$$M_{loc} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{oper} + \sum T_{break}^{day}}{1440}, \tag{22}$$

where n – number of all operations of shunting locomotives per day;

t_i^{oper} – duration of the i -th operation of the locomotive;

$\sum T_{break}^{day}$ – total time (per day) of breaks in the operation of shunting locomotives associated with their technical inspection and crew exchanges (possibly, variant of calculations will be required, since technical inspection is not carried out every day).

2. All start times of operations shall be marked on the daily time scale and transferred in relation

to the calculation periods for the first shunting locomotive (see the previously specified rules).

3. For each calculation period for the first shunting locomotive, based on the analytical sufficient condition (3), it is necessary to carry out the removal and placement of the locomotive's operations from the time scale of the first locomotive to the time scale of the second locomotive according to the condition (23):

$$t_{transfer i}^{oper} = \max_{i=2, \dots, k} (t_{i-1}^{start oper} + t_{i-1}^{oper} - t_i^{start oper}). \tag{23}$$

In this way, the transfer of operations that are in the most «constrained» conditions is carried out. Such transfer for each calculation period (separately) is carried out until the analytically sufficient condition is met.

4. It is necessary to make iterative transfers from the time axis of the first locomotive to the time axis of the next locomotive until the work is distributed relatively evenly across all time axes of all locomotives used.

5. The distribution of operations must be confirmed by solving the problem for each locomotive and for each of its calculation periods for a certain permitted shift in operations' start times associated with the additional occupation of RDT.

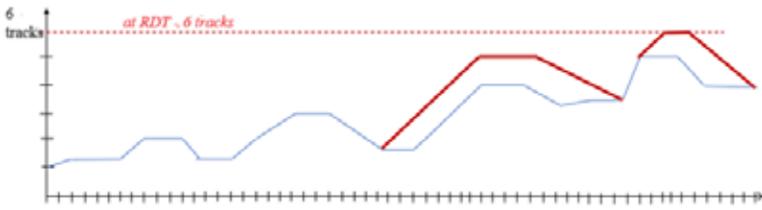
Under the conditions of mandatory performance of operations by shunting locomotives intended for the removal of passenger trains arriving at station's RDT and the rearrangement of passenger trains on RDT for departure at a high average daily load, it is necessary to resort to:

– a later time of removal of trains (in relation to the technologically justified time) from RDT tracks;

– an earlier time of delivery of trains (in relation to the technologically justified time) on RDT tracks.

Solution when $\Delta = 10$

$x_1 \geq 0, x_1 \leq 10$	$x_1 = 0,$
$x_2 \geq 65 - 10, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20;$	$x_2 = 60,$
$x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + 10, x_3 - x_2 \geq 20;$	$x_3 = 80,$
$x_4 \geq 110 - 10, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20;$	$x_4 = 100,$
$x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + 10, x_5 - x_4 \geq 20;$	$x_5 = 120,$
$x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + 10, x_6 - x_5 \geq 20;$	$x_6 = 140,$
$x_7 \geq 170 - 10, x_7 \leq 170, x_7 - x_6 \geq 20;$	$x_7 = 160,$
$x_8 \geq 190 - 10, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20;$	$x_8 = 180,$
$x_8 \leq 200 - 20 = 180.$	



Pic. 5. Time axis [performed by the authors].

- The line corresponds to the occupancy of the tracks without the permitted shift (the locomotive does not respect the schedule).
- The line corresponds to the occupancy of the tracks with the permitted shift (the locomotive respects the schedule).

This leads to an increased (per day) time of the total occupation of RDT tracks by trains.

Such an increase in certain periods of time can lead to a shortage of RDT to fulfil the schedule of arrival and departure of both transit (passing) trains and passenger trains for which the station is final destination.

Therefore, after determining the start times of shunting locomotives with terminal trains, it is necessary to check the sufficiency of RDT capacity to fulfil the general schedule of arrival and departure of passenger trains at the station.

The initial data for such a check are:

1. For the increase in the number of occupied tracks:

- the arrival time of transit (passing) trains and passenger trains for which the station is final destination, adjusted for the time of preparation of the route for receiving a train on the track $t_i^{\text{transit arr}}, t_i^{\text{final arr}};$

- the time of the actual start of the shunting locomotive's operations to move a train to RDT, adjusted for the time necessary for locomotive arrives to the train $t_i^{\text{final dep}}(x_i + t_{\text{arrival}}).$

2. For the decrease in the number of occupied tracks:

- the departure time of (passing) trains and passenger trains for which the station is final destination, adjusted for the time necessary for

the track to be free after the train starts moving $t_i^{\text{transit dep}}, t_i^{\text{final dep}};$

- the actual start time of the shunting locomotive's operation to remove the passenger train for which the station is final destination from RDT, adjusted for the time necessary for the locomotive arrives to the train being removed: $t_i^{\text{final arr}}(x_i + t_{\text{arrival}})$ and for the time necessary for the track to be free after the train starts moving.

All the specified times are plotted on the time axis (per day or per calculation period) in ascending order, and the graph displays the change in the number of occupied tracks over time (with a step of $t = 6$ min) as shown in Pic. 5.

If at certain intervals the specified number of tracks is exceeded (in this example – 6), then the schedule will also not be respected, and it is necessary to change the schedule of arrivals and departures of passenger trains.

CONCLUSIONS

The proposed methodology is aimed at mathematical formalisation of the process of determining the rational sequence in the operations of shunting locomotives with passenger trains at stations. It can be used to solve several operations' problems, including:

- adjusting the results of calculating the number of shunting locomotives at a passenger



technical station under conditions of their maximum loads;

- improving and adjusting the schedule of arrival and departure of passenger trains when assigning additional passenger trains during periods of larger transportation periods;
- increasing the efficiency of shunting locomotives considering the use of additional backup locomotives provided for the periods when RDTs are unoccupied;
- determining reserves in the operation of shunting locomotives in case of possible delays in the arrival of passenger trains at the station.

The methodology allows solving these problems both fragmentarily in individual periods of time and for a «daily segment».

The paper formalises the concepts of a necessary condition and a sufficient condition for shunting locomotives to perform a given volume of operations, both in general and for individual busiest periods of trains' arrival and departure.

Using the linear programming apparatus allows solving both specific problems and conducting research to assess the level of influence of various factors on the performance indicators of passenger and passenger technical stations, determining the reserves for using shunting locomotives and their rational use in the context of the problem of a shortage of shunting locomotives.

REFERENCES

1. Abdullaev, I. S. Prospects for Passenger Railway Stations in Metropolitan Areas. *World of Transport and Transportation*, 2015, Vol. 13, Iss. 5 (60), pp. 160–164. EDN: VMBQDL.
2. Anisimkova, N. I. Brief analysis of the development of domestic and foreign passenger stations [*Kratkiy analiz razvitiya otechestvennykh i zarubezhnykh passazhirskikh stantsii*]. *Alley of science [Alleya nauki]*, 2021, Vol. 1, Iss. 1 (52), pp. 281–286. EDN: VDIGRV.
3. Metelkin, P. V., Lebedeva, Yu. A., Murashev, V. A. The state and prospects for development of long-distance passenger transportation in Moscow railway junction [*Sostoyanie i perspektivy razvitiya perevozok passazhirov dalnego sledovaniya v Moskovskom zheleznodorozhnom uzele*]. *Vestnik transporta*, 2007, Iss. 6, pp. 21–26. EDN: PWKURP.

4. Persianov, V. A., Skalov, K. Yu., Uskov, N. S. Modelling of transport systems [*Modelirovanie transportnykh sistem*]. Moscow, Transport publ., 1972, 208 p.

5. Pekhterev, F. S. Ways to improve the interaction of transport systems of the «1520 Space» [*Puti uluchsheniya vzaimodeystviya transportnykh sistem «Prostranstva 1520»*]. *Eurasia-Vesti*, 2012, Iss. 4. [Electronic resource]: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2012-04a21&ysclid=m4k08d724c10966456>. Last accessed 15.03.2024.

6. Kochnev, F. P., Maksimovich, B. M., Tikhonov, K. K., Chernomordik, G. I. Organisation of traffic on railway transport [*Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte*]. 3rd ed., rev. and enl. Moscow, Transport publ., 1969, 472 p.

7. Korobkin, S. E. Modernisation of station infrastructure of the passenger complex of JSC Russian Railways [*Modernizatsiya stantsionnoi infrastruktury passazhirskogo kompleksa OAO RZD*]. *Vestnik universiteta*, 2013, Iss. 2, pp. 52–56. EDN: PYKIJX.

8. Ventsel, E. S. Research of operations [*Issledovanie operatsii*]. Moscow, Sovetskoe radio publ., 1972, 522 p. [Electronic resource]: <https://djuv.online/file/drARRZJ8UHiCU>. Last accessed 22.12.2024.

9. Kaufmann, A., Cruon, R. Les phénomènes d'attente. Théorie et applications [Russian Transl. from French by V. I. Neiman and V. P. Shvalb. Ed. by I. N. Kovalenko]. Moscow, Mir publ., 1965, 302 p.

10. Minakov, P. A. Use of differential equations to determine technical and technological parameters of the marshalling yard [*Ispolzovanie differentsialnykh uravnenii dlya operedeleniya tekhniko-tekhnologicheskikh parametrov raboty sortirovochnoi stantsii*]. *Nauka i tekhnika transporta*, 2012, Iss. 3, pp. 19–24. EDN: PBUCAL.

11. Minakov, P. A. Interaction of process lines in the receiving yard of the sorting station [*Vzaimodeystvie tekhnologicheskikh linii v parke priema sortirovochnoi stantsii*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2012, Iss. 9, pp. 23–25. EDN: PEMRKV.

12. Minakov, P. A. Justification of a set of technical and technological parameters for the operation of a marshalling yard under high load conditions. Abstract of Ph.D. (Eng.) thesis [*Obosnovanie kompleksa tekhniko-tekhnologicheskikh parametrov raboty sortirovochnoi stantsii v usloviyakh vysokikh zagruzok. Avtoref. dis. kand. tekh. nauk*]. Moscow, MGUPS (MIIT) publ., 2012, 24 p. EDN SVCXTV.

13. Dantzig, G. Linear programming, its generalizations and applications. [Russian title. Russian Transl. from English by G. N. Andrianov [et al.]; gen. ed. and foreword by N. N. Vorobyov]. Moscow, Progress publ., 1966, 600 p. [Electronic resource]: <https://djuv.online/file/nk9t97fW562M2?ysclid=m4k0p85hmk63162567>. Last accessed 15.03.2024.

14. Nesterov, E. P. Transport tasks of linear programming [*Transportnie zadachi lineinogo programirovaniya*]. Moscow, Transzheldorizdat publ., 1962, 171 p.

15. Cherednikov, I. K. Features of the operation of passenger stations with cargo and mail-baggage cars [*Osobennosti raboty passazhirskikh stantsii s gruzovymi i pochtovo-bagazhnymi vagonami*]. Youth science: Proceedings of XXV International scientific and practical. conference, Krasnoyarsk, April 22–24, 2021. Volume 2. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of IrGUPS, 2021, pp. 252–255. EDN: UOZDIK.

Information about the authors:

Kulikova, Ekaterina B., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Transport Business Management and Intelligent Systems; Director of Endowment Fund of Russian University of Transport, Moscow, Russia, iuit_kulikova@inbox.ru.

Minakov, Pavel A., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Management of Transport Operations and Safety of Russian University of Transport, Moscow, Russia, pavelminakovrct@gmail.com.

Article received 13.11.2023, approved 19.03.2024, accepted 22.03.2024.



Methodology for Selecting Road Construction Equipment in Conditions of Insufficient Information



Petr I. SMIRNOV



Boris S. SUBBOTIN



Oleg N. PIKALEV

*Petr I. Smirnov*¹, *Boris S. Subbotin*², *Oleg N. Pikalev*³

^{1,3} Vologda State University, Vologda, Russia.

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0002-9405-7248; Web of Science Researcher ID: AEH-5042-2022; Scopus Author ID: 57209334364; Russian Science Citation Index SPIN-code: 4575-7032; Russian Science Citation Index Author ID: 715866.

² ORCID 0000-0003-1685-082X; Scopus Author ID: 57210937421; Russian Science Citation Index SPIN-code: 5281-7511; Russian Science Citation Index Author ID: 677084.

³ ORCID 0000-0002-7328-5073; Scopus Author ID: 57218557725; Russian Science Citation Index SPIN-code: 3411-3297; Russian Science Citation Index Author ID: 408420.

✉ ¹ smirnovpi@yogu35.ru.

ABSTRACT

The choice of the model is one of the determining factors within the concept of assessing the efficiency of equipment during its full life cycle.

The objective of this work is to justify the application of the methodology for assessing the competitiveness and quality of equipment as applied to road construction machines, improved by the authors and proposed for selecting machines under conditions of partial uncertainty and lack of information.

The article methodologically substantiates the information sets to assess the equipment at the selection stage, presents the results of studies of changes in the cost of road construction machines in the secondary market of the Russian Federation, offers assessment approaches to determining the quality and performance of products, and provides a final algorithm of an integral assessment based on individual competitiveness indicators. Methodologically, the proposed method may be of interest when assessing other types and classes of equipment under similar assessment conditions.

Keywords: transport and technological machines, road construction equipment, quality assessment, competitiveness of machines.

For citation: Smirnov, P. I., Subbotin, B. S., Pikalev, O. N. Methodology for Selecting Road Construction Equipment in Conditions of Insufficient Information. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 229–236. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-11>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Modern domestic and foreign scientific research literature widely considers selected issues of assessing the quality, productivity and competitiveness of equipment in general and road construction machines (RCM) in particular.

The work [1] compares economic indicators of using hydraulic excavators and rope shovels at Russian mines. It was found that the cost of owning an EKG-12K rope shovel is lower than that of hydraulic excavators. The work [2] develops indicators of the efficiency of digging with a hydraulic excavator and software for their calculation. The work [3] studies a strategy for operating a group of machines to balance fuel consumption and productivity, determines optimal parameters for minimising operating costs. The paper [4] analyses the use of RCM for completion of large government projects, such as the Kaleswaram Lift irrigation system project and the Polavaram project. The results of monitoring of the operations of stone crushers and quarries, as well as an analysis of the technical characteristics of the machines, help to optimise marketing strategies for sale of excavators and loaders. The work [5] refers to selection of the most effective models of earthmoving machines for the soil conditions of the Republic of Kazakhstan. The study [6] analyses the evolution of methods for assessing the competitiveness of machines and equipment, identifying their applicability in modern market conditions.

The study [7] describes the expertise of PT Citra Mitra Sehati, an open pit mining company in Ulok Kupai district, Bengkulu, Indonesia. The equipment used, including a Dossan Dx 500 excavator and ten Hino 700 dump trucks, has a high wear rate, which reduces productivity and increases operating costs. The study aims to compare the use of old and new equipment considering economic parameters. The results show that the new equipment is more efficient in production, but there are significant differences in maintenance and production costs between the old and new equipment. The paper [8] discusses the importance of equipment condition diagnosis and life cycle management to minimise additional costs and time associated with unexpected breakdowns. The life cycle cost analysis of the 320C excavator from 2010 to 2017 helps determine the optimal equipment replacement time and the cost of its ownership.

The article [9] highlights the results of the

analysis of the current state and directions of development of the road construction equipment sector in Russia at the turn of 2023. The study is based on the study of statistical information, as well as on the developments carried out by the Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, the NTMT Scientific and Production Company and the Department of Highways of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering in various periods, supplemented by information obtained from the Internet. The article highlights that the key problem of the domestic road construction industry lies in the significant wear and tear of equipment, reaching 50 %, the main reason for which is the insufficiently high level of its renewal.

The authors of [10] discuss the importance of road machinery productivity as a criterion linking all stages of the life cycle of roads and machines. The study is aimed at determining the relationship between the volume of work and the performance of road machines used at sites. The objective of the article was to analyse the technical, operational and actual productivity of machines when operated at specific sites.

The article [11] considers the issue of the efficiency of road machinery operation, with the main emphasis on the technical operation system. It highlights as the main drawback of the current approach the lack of accounting for the volume of work performed when maintaining the technical condition of machines, which is considered necessary for more efficient operation of machines. The article [12] is aimed at identifying the relationship between the life cycles of machines and roads and discusses factors influencing the formation of road machine fleets, considering the specifics of operation and renewal of equipment. A new approach to the formation of machine fleets is proposed based on the feedback from the life cycle of the road and the machine, which can improve the efficiency and rationality of equipment use.

In the modern practices of road machinery operation, many previous tasks have lost their scientific significance [13]. This is due to introduction of the latest regulations, development of CALS technologies, introduction of advanced monitoring systems and efforts to automate work processes. In this regard, there is a need to reassess and structure scientific issues related to the study of the life cycle of road machines using mathematical modelling, analysis of influencing

factors and expert assessments for analysis. Industry methods and the ERA-GLONASS system are actively used in the field of road construction. The conducted study emphasises the key aspects of the modern system of the life cycle of road machinery and highlights the specifics of their study. Recommendations and implementation of tracking systems in road machinery contribute to scientific developments. The article proposes methods for solving current scientific problems, considering new trends in operation of road machinery, which contributes to a more accurate and reasonable formulation of scientific problems.

Article [14] examines changes in the consumer qualities of road construction machines from 1993 to 2018. The study based on expert assessments of various sources highlights that over the past 25 years, the requirements for machines have changed. At the beginning of the period under review, more valued were the characteristics related to formation of machine fleets and ensuring operability. As the market developed and with growing volumes of construction, qualities that determine the efficiency of machine operation became more important.

The article [15] discusses the need to assess the efficiency of vehicle operation in the agro-industrial complex (AIC) and proposes a multi-criteria model for this purpose. The main property of the model is credibility, which is achieved without the use of expert assessments. The article [16] also presents a decision tree for a vehicle quality assessment system, which helps to streamline the search for solutions.

The article [17] describes a new approach to determining consumer preferences when choosing road construction equipment among the options available on the market. This method is based on the application of one of the mathematical strategies for multi-criteria optimisation, which is the zoning method, and consists of analysing all possible combinations of priorities following assessment characteristics. The use of these techniques significantly improves the clarity and accuracy of the assessments. The effectiveness of the method is demonstrated using the example of analysing the technical features of bulldozers and comparing the obtained data with the assessments made using one of the classical approaches, expert cluster analysis based on significant operational characteristics.

In this regard, we set the following *objective* for the study: to propose an improved methodology for assessing RCM based on technical and economic indicators, suitable both for equipment with technical characteristics that are confusingly close, and in the case of partial or limited information on the results of operation (new or fresh models), also relatively free from subjective assessments of the decision maker.

RESULTS. SUGGESTED METHODOLOGY

The suggested methodology for assessing road construction machinery by technical and economic indicators was based on the methodological approaches for passenger cars, considered in the thesis work of P. I. Smirnov [18] and tested for logging and cargo equipment [19; 20]. The process of purchasing a road construction machine is similar to investing in production assets, which reflects the key interests of commercial structures aimed at acquiring RCM for their operational needs.

This approach allows us to consider the selection, acquisition and operation of RCM considering the economic principles and criteria that are usually used in assessing the effectiveness of investment projects. When determining the most suitable RCM model for specific operating conditions, the main attention is paid to the technical and economic parameters of the machines. This category includes technical characteristics that affect the efficiency of equipment operation, as well as indicators related to the costs of its operation.

During the initial phase of RCM assessment, these parameters are grouped according to criteria that allow them to be collected into a single analytical category (by type, purpose, availability of additional equipment and other characteristics).

When selecting a road construction machine for commercial use within an organisation, a critical aspect, along with compliance of technical parameters with established standards, is a comparison of the «useful effect of operation» with the costs of obtaining it throughout the entire life cycle (LC) of the equipment.

This principle is key to assessing the competitiveness of the RCM in terms of the set of technical and economic characteristics:

1. *Operation efficiency*: This refers to the ability of the machine to perform the required work with maximum productivity and minimum time costs.



2. *Operating costs*: Includes all costs for maintenance, repairs, lubricants and refuelling materials throughout the entire life cycle of the equipment.

3. *Dependability and durability*.

4. *Residual value*: This is an estimate of the value of the machine at the end of its operational period, which can significantly affect the overall economic benefit from its use.

5. *Convenience and safety of operation*: Includes an assessment of how convenient and safe it is to work with a given machine, which can also affect labour productivity and staff training costs.

The choice of RCM considering these parameters allows organisations to maximise the return on investment and ensure high competitiveness in the market.

This condition determines the assessment of the level of competitiveness based on technical and economic indicators:

$$E_{\Sigma} / C_{\Sigma} \rightarrow \max, \quad (1)$$

where E_{Σ} – beneficial effect of using RCM throughout the entire life cycle;

C_{Σ} – total costs of achieving a beneficial effect throughout the entire life cycle.

In the future, we will designate this ratio as an integral indicator of product quality based on technical and economic indicators – Q_{TEI} .

$$Q_{TEI} = E_{\Sigma} / C_{\Sigma}. \quad (2)$$

To assess the economic benefit from using road construction machines, the methodology developed by S. V. Repin is used as a basis. This approach involves not only the use of an integral indicator for comparing RCM by their technical and economic characteristics, but also the calculation of specific costs for performing a certain amount of work. Such costs are expressed through specific costs per unit of transport work, designated as C_{sp} , with a preference for using the indicator in rubles per hour of machine operation.

The calculation of specific costs per unit of work can be carried out based on the actual life cycle of the machine, or on a conditional LC, provided that there are no operational data, for example, assuming 10000 hours of machine operation. This approach allows for a more objective comparison of different models of road construction machines and making informed decisions when choosing the most suitable equipment, considering its long-term economic efficiency.

Our approach to the analysis of road

construction machines at the stage of comparing them by technical and economic indicators includes the possibility of using an additional analytical module. This module is designed for a detailed assessment with individual specific criteria that may be critically important in certain operating conditions or for specific consumer preferences. Such criteria include, for example, engine parameters, traction characteristics, features of the working area, lifting capacity, level of convenience and ergonomics of the operator's workplace, as well as the specifications of individual important machine components.

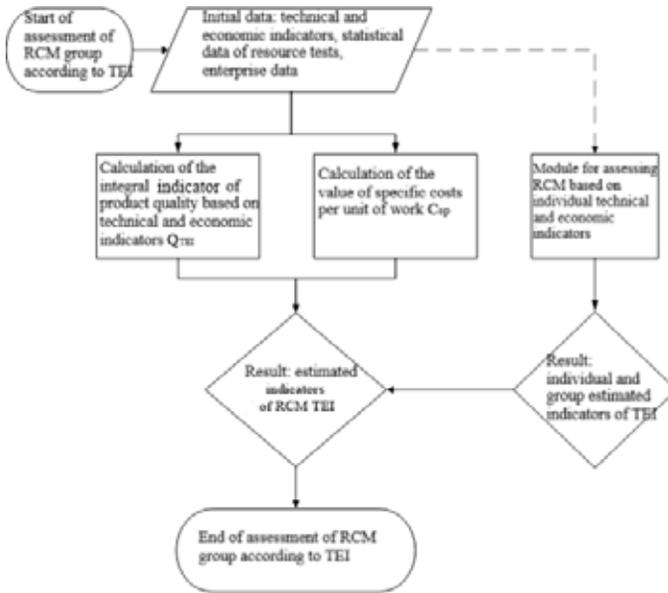
Assessments using these criteria are formed based on a comparative analysis of available RCM options. For objective comparison and selection of the best option in the presence of several similar alternatives and in conditions of limited information or uncertainty, it is proposed to use the zoning method. This method was further improved by A. V. Terentyev [21] and allows for the effective solution of multi-criteria selection problems, optimising the decision-making process in complex conditions.

The introduction of such an additional module allows for an in-depth analysis of each aspect of the proposed equipment, considering the unique requirements and preferences of the consumer, which makes the process of selecting road construction machinery more targeted and rationale.

The inclusion of additional evaluation criteria and the use of mathematical methods to integrate these results into a common integral indicator is a significant step forward in the methodology for analysing and selecting road construction machinery. This approach not only reduces the subjectivity that often accompanies the evaluation process but also increases the credibility and reliability in determining the competitiveness of various RCM models.

The integral technical and economic indicator of product quality, designated as Q_{TEI} , plays a key role in this process, as it summarises various aspects of the efficiency of machine operation into a single generalised numerical expression. This allows consumers and organisations to make an informed choice based on a comparison of the maximum return on investment.

However, like any comprehensive method, the proposed approach requires access to extensive and accurate data on technical parameters, operating costs and potential income from equipment operation, as well as the ability



Pic. 1. Flow chart for assessing analysed RCM according to TEI [developed by the authors].

to correctly interpret this information in the context of specific operating conditions. This may pose some challenge, especially for new models of RCM, for which there may not be sufficient operational data.

The flow chart of the proposed method for assessing RCM based on technical and economic indicators is shown in Pic. 1, the algorithm for calculating Q_{TEI} and C_{sp} for assessing RCM at the stage of decision-making on acquisition is given below.

Step one. Creation of a database for the studied group of road construction machines based on information from Internet resources and on experimental data obtained from users and operators.

Step two. To calculate and determine the total operating costs of road construction machines throughout their entire life cycle, it is necessary to calculate the following component items to determine the total costs C_{total} :

- C_{RCM} – cost of equipment in rubles;
- $C_{one-time}$ – initial acquisition costs, in rubles;
- $C_{const.annual}$ – conditionally constant annual costs, in rubles per year;
- T_{use} – number of years of use within the life cycle under consideration, in years;
- C_M – maintenance costs, in rubles;
- N_{FC} – average fuel consumption rate, in litres per hour of operation;
- C_{fuel} – fuel cost, in rubles per liter;
- C_{loan} – loan payments, lease payments, in rubles;

L_{total} – the value of the expected operating time or the value equal to the operating time within the conditional life cycle.

Step three. We determine the final total costs for operation of RCM throughout the entire life cycle:

$$C_{const.annual} \times T_{use} + C_M + \frac{N_{FC} \times L_{total} \times C_{fuel}}{100} + C_{loan}, \text{ rub.} \quad (3)$$

Step four. Calculation of specific costs:

$$C_{sp} = C_{total} / L_{total}, \text{ rub/hour.} \quad (4)$$

Step five. Calculation of the beneficial effect from operation of RCM throughout the entire life cycle of E_{Σ} . As the latter, one of the following values in rubles/hour is taken:

$I_{com.oper}$ – the specific value of the expected income from commercial operation is determined in rubles per hour of work.

I_{alt} – specific alternative income is defined as the difference between the cost of services for providing the organisation with RCM for rent and the projected costs of its own machines, reduced to one hour of RCM operation.

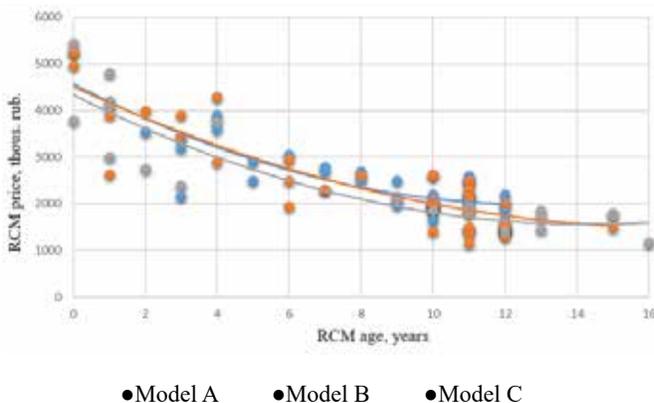
The value of the latter is determined by solving the system (5):

$$\begin{cases} I_{alt} = \sum Q_{rent}(t) - \sum Q_{own}(t) \\ I_{alt} > 0, \text{ if } t \in [t_{payback} \dots t_{service}] \\ t_{payback} < t_{service} \end{cases} \quad (5)$$

Step six. Calculation of individual components of costs for achieving a beneficial effect throughout the entire life cycle of RCM C_{Σ} :

- C_1 – labour costs;
- C_{fuel} – fuel costs;





Pic. 2. Regression models of changes in the cost of 3-ton loaders [performed by the authors].

C_{spare} – purchase of spare parts and tires;
 C_{cons} – costs of consumables;
 C_{mr} – maintenance and repair costs;
 C_{ov} – overhead costs;
 C_{loan} – loan payments, lease payments;
 I_{sale} – the price of selling RCM, when used to the limit state, can be taken as equal to the liquidation value or considering the application of the mathematical model of changes in the residual value, given below.

Step seven. Calculation of total costs for achieving a beneficial effect throughout the entire life cycle of RCM E_{Σ} :

$$E_{\Sigma} = C_1 + C_{fuel} + C_{spare} + C_{oper} + C_{mr} + C_{ov} + C_{loan} - I_{sale}, \text{ rub. (6)}$$

Step eight. Calculation of the integral indicator for TEI Q_{TEI} :

$$Q_{TEI} = (E_{\Sigma} \times L_{total}) / C_{\Sigma}. \text{ (7)}$$

Step nine. Recording the calculated values of C_{sp} rub/hour and Q_{TEI} in the final table of RCM assessment. If necessary, one should proceed to assessing the next RCM from the analysed group (transition to *Step two*).

In the above method, the value of I_{sale} is of particular interest which is the cost of selling RCM, when used to the limit state, which can be taken as equal to the liquidation value or calculated using the obtained mathematical models. To find them, an analysis of statistical

data was performed. For the calculation, data from such ad aggregators as Avito, excavator.ru, Avto.ru were used. Offers for the sale of three front end wheel loaders of manufacturers from the PRC with a lifting capacity of 3–5 tons were analysed, from newly manufactured to the oldest ones, while the price and operating time in engine hours (if available) were recorded.

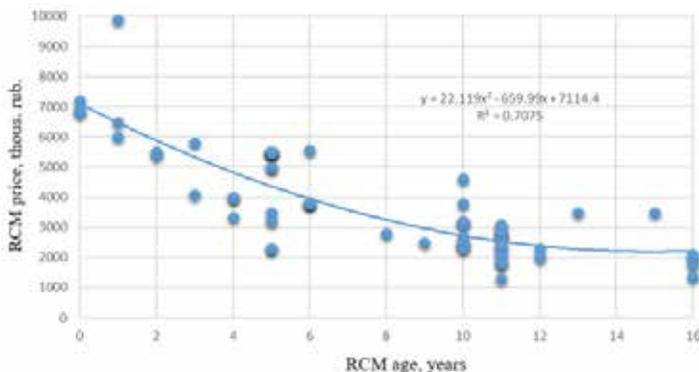
Based on the collected data, statistical dependencies of the cost of RCM in the secondary market from their age were obtained, shown in Pic. 2. Herewith, there is a clear understanding that the price announced on portals of advertisements for sale of equipment and the real price of equipment on the secondary market can often differ significantly. At the same time, this is partly compensated by both the volume of collected records and the peculiarity of the excavator.ru advertisement portal, in which records on sold equipment go to the archive allowing their further viewing. Records from the archive, as a rule, consider the decrease in the price declared by the seller in the process of displaying the advertisement on the site and therefore are much closer to the real cost of selling equipment on the secondary market. In the total share of statistical information, the share of such advertisements is about 34 %.

Regression models were calculated for the obtained statistical data on the cost of equipment (see Table 1), for which sufficiently significant coefficients of determination R^2 were obtained. The highest value $R^2 = 0.8171$ was obtained for the data on the cost of loaders of model B with a lifting capacity of three tons due to the largest volume of collected data.

A similar model was constructed for the loaders of the company «C» with a lifting

Table 1
Mathematical models of changes in the cost of RCM

Model	Regression equation	Coefficient of determination
A	$y = 15.794x^2 - 404.68x + 4576.9$	$R^2 = 0.7117$
B	$y = 10.492x^2 - 356.58x + 4512.4$	$R^2 = 0.7606$
C	$y = 13.598x^2 - 388.92x + 4337.8$	$R^2 = 0.8171$



Pic. 3. Regression model of change in the cost of 5-ton loaders [performed by the authors].

capacity of five tons, shown in Pic. 3. The regression model has the form: $y = 22.119x^2 - 659.99x + 7114.4$ with a coefficient of determination $R^2 = 0.7075$.

In addition, during data collection, records of equipment operating time were recorded, which allowed us to obtain additional rather interesting results. Thus, for loaders with a lifting capacity of 3–5 tons of the company «C», the average operating time in engine hours per year of operation was 921 engine hours/year, for model «B» – 780 engine hours/year and for model «A» – 674 engine hours/year.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

As the analysis of statistical data on the cost of RCM on the example of loaders of different brands manufactured in the PRC has shown, the nature of the change in their cost is similar and does not show a significant difference irrespective of a specific manufacturer either model. The curves and models constructed in this case are similar to those obtained by S. V. Repin for RCM of European and American manufacturers [21].

At the same time, if several years ago in similar studies conducted by the authors, equipment manufactured in the PRC compared to RCM of European and American manufacturers greatly lost in value on the secondary market starting from the first year, now we do not find this.

At the same time, despite the absence of differences in the dynamics of the decrease in the cost of RCM on the secondary market between loaders of different PRC manufacture companies, it was found that the average operating time in engine hours/year of loaders of one of the brands is 15 and 27 % higher than that of loaders of two other companies. In our opinion, the latter may indicate a potential opportunity to operate the equipment more intensively, as well as shorter

delivery times for spare parts and possibly potentially higher quality of the equipment.

The suggested calculation technique can be used to assess RCM of manufacturers regarding whose products there is still few information on the service life of units and assemblies, and on the entire maintainability and repairability.

Thus, the methodology we propose, the essence of which is shown in Pic. 1 and described in the algorithm above, comprising the application of the results of statistical studies on the cost of equipment on the secondary market, can be used to select RCM for purchase, considering the existing uncertainty and the lack of operating data and data on the resource and service life of equipment. The set of information for assessing the cost and availability of spare parts for equipment deserves special attention, which will be considered by the authors in a separate study.

REFERENCES

1. Anistratov, K. Yu., Lukichev, S. V., Isaichenkov, A. B. Comparative analysis of efficiency of rope and hydraulic excavators. *Gornyi Zhurnal*, 2020, pp. 74–78. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.17.
2. Janosevic, D., Mitrev, R., Andjelkovic, B., Petrov, P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2012, Vol. 13, pp. 926–942. DOI: 10.1631/jzus. A1100318.
3. Wang, F.; Wen, Q.; Xu, X.; Xu, B.; Sun, Z. Site Operation Strategy for Wheel Loader/Truck Loading and Transportation Cycle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, Vol. 70, Iss. 5, pp. 4129–4138. DOI: 10.1109/TVT.2021.3070394.
4. Akhil, P. V. G. N. H., Madiraju, S., Ravi Kiran K., R., Deepthi, Y. P. Proliferation of Market Share of Hydraulic Excavators and Wheel Loaders in the Stone Crusher Segment by Strategic Decisions. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2020, Vol. 9, Iss. 1, pp. 947–951. DOI: 10.35940/ijrte.A2163.059120.
5. Surashov, N., Tolymbek, D. Development of complex indicators and evaluation of efficiency for dump-type earthmoving and transport machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2022, Vol. 19, Iss. 6, pp. 814–827. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-814-827.



6. Ivashkiv, T. Evolution of methods of estimation of machines and equipment is on competitiveness. *Market Infrastructure*, 2022. DOI: 10.32843/infrastruct66-1.
7. Rachman, F. A., Zaenal, Iswandaru. Kajian Teknis dan Ekonomis dalam Merencanakan Penggantian Alat Angkut pada Pengawasan Overburden Penambangan Batubara PT Citra Mitra Sehati Site Job PT Cakra Bumi Pertiwi di Kecamatan Ulok Kupai, Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu. *Bandung Conference Series: Mining Engineering*, 2023, Vol. 3. DOI: 10.29313/bcsme.v3i1.6778.
8. Enyindah, N. C., Amadi, R. K. Using Diagnosis and Life Cycle Cost to Improve Reliability of an Excavator. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2019, Vol. 4, Iss. 3, pp. 21–26. DOI: 10.24018/ejeng.2019.4.3.1107.
9. Anufriev, K. A., Repin, S. V. Analysis of the state of the construction equipment market at the beginning of 2023 [Analiz sostoyaniya rynka stroitelnoi tekhniki na nachalo 2023 goda]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*, 2023, Iss. 11, pp. 127–132. DOI: 10.26160/2541-8637-2023-11-127-132.
10. Grushetsky, S. M., Evtyukov, S. A., Kuznecov, A. A. Determination of technical and operating performance of road machines based on analysis of the scope of work [Opredelenie tekhnicheskoi i ekspluatatsionnoi proizvoditelnosti dorozhnykh mashin na osnove analiza obemov robot]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, Iss. 1, pp. 38–52. EDN: EPLQOA.
11. Grushetskii, S. M., Evtiukov, S. A., Repin, S. V., Karro, G. A. Productivity as a quality criterion for evaluating the efficiency of all stages of the life cycle system of road machines [Proizvoditelnost kak kachestvennyi kriteii otsenki effektivnosti vseh etapov sistemy zhiznennogo tsikla dorozhnykh mashin]. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2020, Iss. 4 (63), pp. 36–43. EDN: PJSSPR.
12. Evtyukov, S. A., Repin, S. V., Grushetsky, S. M., Karro, G. A. Formation of a fleet of vehicles for construction, reconstruction, repair and maintenance of highways, taking into account the stages of their life cycle [Formirovanie parka mashin dlya stroitelstva, rekonstruktsii, remonta i soderzhaniya avtomobilnykh dorog s uchetom etapov ikh zhiznennogo tsikla]. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*, 2020, Iss. 3 (62), pp. 62–69. EDN: EFBFJ.
13. Evtiukov, S. A., Repin, S. V., Grushetskii, S. M., Karro, G. A. Scientific objectives of research on road machines life cycle in modern conditions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020, Vol. 17, Iss. 4 (74), pp. 442–451. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-442-451.
14. Maksimov, S. E., Repin, S. V., Zazykin, A. V., Chechuev, V. E. The analysis of the market of road-building cars in Russia and evolution of consumer qualities of these cars [Analiz rynka dorozhno-stroitelnykh mashin v Rossii i evolyutsiya potrebitelskikh kachestv etikh mashin]. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2019, Iss. 7, pp. 3–12.
15. Mirzaev, R. R., Terentyev, A. V. Methods for assessing the quality of transport vehicles operated in the agro-industrial complex [Metody otsenki kachestva transportnykh mashin, ekspluatiruemyykh v agropromyshlennom komplekse]. *Readings of Academician V. N. Boltinsky*, Moscow, January 25–26, 2022. Volume Part 2. Moscow, LLC «Sam poligrafist» publ., 2022, pp. 20–26.
16. Mirzaev, R. R., Karelina, M. Yu., Terentyev, A. V., Sidorov, B. B. Structure of hierarchical multi-criteria system for assessing the quality of transport machines operated in the agro-industrial complex [Struktura ierararkhicheskoi mnogokriterialnoi sistemy otsenki kachestva transportnykh mashin, ekspluatiruemyykh v agropromyshlennom komplekse]. *International technical and economic journal*, 2022, Iss. 2, pp. 45–53. EDN: ORIHCS.
17. Meike, U. N., Terentyev, A. V., Dobromirov, V. N. Investigation of the possibility of applying the zoning method for the selection of road construction machines [Issledovanie vozmozhnosti primeneniya raionirovaniya dlya vybora dorozhno-stroitelnykh mashin]. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2022, Iss. 6, pp. 26–31. EDN: CGIMXE.
18. Smirnov, P. I. Methodology for assessing the competitiveness of passenger cars [Metodika otsenki konkurentosposobnosti legkovykh avtomobilei]. In: Science in the modern information society: Proceedings of VII international scientific and practical conference, North Charleston, USA, November 9–10, 2015. Scientific-industrial centre «Akademicheskii», Vol. 1. CreateSpace, 2015, pp. 130–133. EDN: UTTIDF.
19. Koryakovskiy, A. N., Smirnov, P. I. Development of a methodology for determining the effective service life of logging equipment of JSC LPK Kipelovo [Razrabotka metodiki opredeleniya effektivnogo sroka ekspluatatsii lesozagotovitelnoi tekhniki AO «LPK «Kipelovo»]. In: *New materials, equipment and technologies in industry: Proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists*, Mogilev, October 28–29, 2021. Ed. board: M. E. Lustenkov (editor-in-chief) [et al.]. Mogilev, Interstate educational institution of higher education «Belarusian-Russian University», 2021, P. 114. EDN: BXSPRG.
20. Sokolov, L. Yu., Smirnov, P. I. Development of a methodology for forming an optimal fleet of equipment for JSC LPK Kipelovo [Razrabotka metodiki formirovaniya optimalnogo parka tekhniki AO «LPK «Kipelovo»]. In: *New materials, equipment and technologies in industry: Proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists*, Mogilev, October 28–29, 2021. Ed. board: M. E. Lustenkov (editor-in-chief) [et al.]. Mogilev, Interstate educational institution of higher education «Belarusian-Russian University», 2021, P. 119. EDN: FWBDFK.
21. Terentyev, A. V. Scientific and methodological approach to multi-criteria assessment of the service life of a car. D.Sc. (Eng) thesis [Nauchno-metodicheskii podkhod k mnogokriterialnoi otsenke sroka ekspluatatsii avtomobilya. Diss...dokt.tekh.nauk]. Moscow, MADI publ., 2018, 303 p. ●

Information about the authors:

Smirnov, Petr I., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Cars and Cars Facilities of Vologda State University, Vologda, Russia, smirnovpi@vogu35.ru.

Subbotin, Boris S., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia; Associate Professor at the Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety of the Russian State University named after A. N. Kosygin, Moscow, Russia, subbotin-bs@rguk.ru.

Pikalev, Oleg N., Ph.D. (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Cars and Cars Facilities of Vologda State University, Vologda, Russia, pikalevon@vogu35.ru.

Article received 27.02.2024, approved 25.05.2024, accepted 29.05.2024.

• World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 229–236

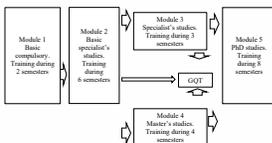
Smirnov, Petr I., Subbotin, Boris S., Pikalev, Oleg N. Methodology for Selecting Road Construction Equipment in Conditions of Insufficient Information.

T



TRANSPORT INFRASTRUCTURE CONSTRUCTION: STAFFING **238**

Synchronisation of training of road and aerodrome construction engineers.



SEAFARERS' TRAINING **249**

Significance and development of foreign language communicative competence.





Project of an Educational Program for Synchronised Training in the Specialty «Roads and Aerodromes»



Vladimir Yu. PANKOV



Olga A. FEDOROVA

Vladimir Yu. Pankov¹, Olga A. Fedorova²

^{1,2} Northern-Eastern Federal University in Yakutsk, Yakutsk, Russia.

¹ ORCID: 0000-0003-4933-0265; Web of Science Researcher ID: 4487803; Scopus Author ID: 1325803806.

✉ ¹ pankov1956@inbox.ru.

ABSTRACT

Within the task to open a separate enlarged group of specialties and degrees in the field of transport education, the authors, based on many years of pedagogical and industrial experience, developed an exclusive project of a synchronised training program in the specialty «Roads and Aerodromes» to be included into the above-mentioned enlarged group.

The article presents, also for the purpose of discussion by the professional community, a modular scheme of the synchronised main professional educational program «Roads and Aerodromes» and examines the specifics of structuring each module and filling it with disciplines.

Particular attention is paid to the well-known problem of the relationship between the number of humanitarian and technical disciplines in the educational process. Upon showing main reasons for inclusion of an increased number of humanitarian disciplines into engineering-focused general professional educational

programs, proposals have been made on mechanisms for eliminating existing imbalances.

The article highlights main problems in the system of training in engineering specialties in terms of programs' funding, of covering the programs of the developed enlarged group of specialties «Road Sector» with requirements of professional standards, of providing the educational process and research work of departments responsible for graduation with research / laboratory equipment and road machines.

Suggesting one of the possible ways of introducing the «Roads and Aerodromes» program into the practice of professional training of the system of higher educational institutions of the Russian Federation, the authors substantiate the opinion that the most promising solution would be creation of Interdepartmental Scientific and Educational Centres of regional significance (ISECR), assigned to specific road and climatic zones.

Keywords: roads, education, personnel training, educational program, organisation of professional training, scientific and educational centres, cryolithozone.

For citation: Pankov, V. Yu., Fedorova, O. A. Project of an Educational Program for Synchronised Training in the Specialty «Roads and Aerodromes». World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 238–248. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-12>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The training of engineering and technical personnel is one of the fundamental factors in intensification of economic development and strengthening of the national sovereignty of the Russian Federation in the field of technology and industrial production. The general theory of training engineering and technical personnel and organisation of educational process attires attention at various levels^{1,2,3}; a significant number of scientific works have been devoted to this problem, namely, [1–8]. Issues of training engineering personnel for the transport industry are considered, for example, in [9–12]. At the same time, there are very few publications in scientific periodicals concerning the real problems of training personnel for the road construction industry (they include, for example, [13]).

The development of higher education in the field of road sector received additional impetus following the meeting of the Presidium of the Government Commission on Transport on April 10, 2023. It approved the proposal of the Ministry of Transport of Russia on formation of a federal project «Development of human resources in the transport industry» for the period 2026–2035⁴. As stated, «its purpose is to provide the necessary funding, implement educational programs and train the required number of specialists, including for new distinct directions of studies.., which the Ministry of Transport proposes to introduce through formation of a separate enlarged group of «Road Sector» specialties and directions of studies for training in the field of education «Transport»⁴. Two specialties, which are inseparable, in our opinion, namely, «Roads and Aerodromes», «Bridges and Transport Tunnels» were highlighted within this enlarged group.

Currently, in accordance with the Russian Classifier [Classification] of Specialties in

Education OK 009–2016 (OKSO)⁵, training of personnel for the road construction industry in the sections III, IV, V of the directions of studies in higher education, referring, respectively, to training bachelors, masters, and specialists (via specialties of higher education), is now classified within field of education «Engineering, technology and technical science», within the enlarged group of specialties 08 (EGS) «2.08.00.00 Engineering and construction technologies.» Within the framework of this EGS, training of bachelors (08.03) and masters (08.04) for the road construction industry is implemented within the same direction of studies 2.08.03(04).01 «Construction», and training of specialists via specialties of higher education (08.05) is implemented within specialty 08.05.02 «Construction, operation, renovation and technical protection of roads, bridges and tunnels».

The current situation creates many problems for educational institutions of higher education regarding organisation, implementation and synchronisation of the educational process at different levels of education (bachelor's, master's, specialist's training). Training of specialists within the program 08.05.02 «Construction, operation, renovation and technical protection of roads, bridges and tunnels» does not fit with the with the direction of bachelor's and master's studies. The title of the specialty program includes the phrase «renovation and technical protection», borrowed from military terminology, but there is no mention of activity regarding survey, design, construction, operations, maintenance and repair, which are significant for modern road construction sector from technological, industrial, organisational and managerial point of view. In general, there is an almost insoluble problem of synchronising training programs for specialists, on the one hand, and bachelors and masters, on the other. This uncertainty regarding the distribution of professional competencies and their level in the educational process affects even the employment of graduates at enterprises and organisations in the road construction industry.

At the same time, another problem is associated with the OKSO code for bachelor's and master's studies 08.03(04).01, and that problem is faced by absolutely all universities and higher education institutions that have

¹ Podtserob, M. In Russia, there are constantly talking about the shortage of engineering personnel // *Vedomosti*, 25 July 2023 [In Russian]. [Electronic resource]: <https://www.vedomosti.ru/management/articles/2023/07/25/986739-v-rossii-postoyanno-govoryat-o-defitsite-inzhenernih-kadrov>. Last accessed 15.11.2023.

² Indicators of education 2023. Statistical collection. [In Russian]. National Research University Higher School of Economics, 433 p., P. 36. ISBN 978-5-7598-2746-7.

³ Data of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. [Electronic resource]: <https://publications.hse.ru/pubs/share/direct/269677991.pdf>. Last accessed 27.12.2023.

⁴ Andrey Belousov held a meeting of the Government Commission on Transport. [In Russian]. [Electronic resource]: <http://government.ru/news/48205/>. Last accessed 27.12.2023.

⁵ [Electronic resource]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_212200/.



several structurally separated educational units at the level of faculties or institutes providing training using this code. This problem is related to the peculiarities of allocating places for enrolment subsidised from the federal budget [further on referred to as «budgeted places»]. The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation allocates budgeted places dedicated for studies within an enlarged group of specialties (08.00.00) for different levels of education (08.03 or 08.04) and for a specific specialty. The current OKSO codes provide for only one specialty – 08.03(04).01 «Construction». Accordingly, when distributing admission quotas even between two structurally separated educational units, in charge, at the same higher education institution, e. g., for studies, respectively, in industrial and civil engineering, and in road construction, problems arise that can lead to closure of certain areas of training in one of those educational units. For example, at Northern-Eastern Federal University in Yakutsk, such a situation arises annually when distributing budgeted places between the Engineering and Technical Institute, focused on industrial and civil engineering, and the Road Transport Faculty, which trains personnel for the road construction industry, and it is not always resolved in favour of the Road Transport Faculty. This problem can be traced also in developing/financing laboratory and empirical bases of structurally separated educational units.

OBJECTIVE OF THE RESEARCH

To prepare implementation of the decisions of the Government Commission on Transport dated April 10, 2023, and considering the provisions of the Decree of the President of the Russian Federation «On some issues of improving the higher education system», dated May 12, 2023, No. 343⁶, the authors submit some proposals to be discussed by the professional community on organising synchronised education and training of specialists for the road construction industry regarding the direction of studies «Roads and Aerodromes». The proposals have been prepared based on many years of teaching experience within bachelor's, master's and specialty directions of studies at the Department of Roads and Aerodromes of the Road Transport Faculty of Northern-Eastern Federal University in Yakutsk.

⁶ [Electronic resource]: <http://www.kremlin.ru/acts/news/71118>.

RESULTS AND DISCUSSION

Synchronised Education Scheme

To solve the problem of choosing a specific specialty/direction of studies by students within the framework of the planned EGS «Road Sector» and to synchronise various levels of higher education within the specialist training program «Roads and Aerodromes», the authors have developed an enlarged scheme of the main professional educational program (Pic. 1).

It should be noted that Module 5 «Ph.D. studies» is not organisationally included in the «Roads and Aerodromes» program. Ph.D. studies are carried out based on an independent accredited general professional educational program (GPEP). A separate article should be devoted to problems associated with training of highly qualified research personnel.

In general, the proposed scheme of synchronised training within the direction of studies «Roads and Aerodromes» has several advantages compared to the existing system, enlisted below.

1. It is amenable to regulation and control by the state and educational organisation in terms of the number of required/trained personnel of a certain qualification, even at the level of individual regions/universities. At the state level, the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, together with the Ministry of Transport of the Russian Federation, annually forms quota for admission of specialists of various levels in the form of allocation of budgeted places distributed among specific universities. The educational organisation fulfils this state commission guarantying quality of knowledge and the scope of competencies for each level of education: basic specialist's, master's, specialist's studies.

2. There emerges an unambiguous division according to the level of knowledge, practical skills and competencies between basic specialist's, master's and specialist's studies.

3. *Module 1 («Basic compulsory»)* (Pic. 1) is identical for all specialties and directions of training of the EGS «Road Sector» being formed. The only exceptions are the extended course «Introduction to the Specialty» and disciplines for which the curriculum provides for summer internships after the first year of studies. The structure of the module harmonises as much as possible the training of first-year students within all directions of training. It allows students to timely decide on the choice of specialty and, in case of dissatisfaction, without numerous retakes, switch to another specialty, including other educational institutions, within the

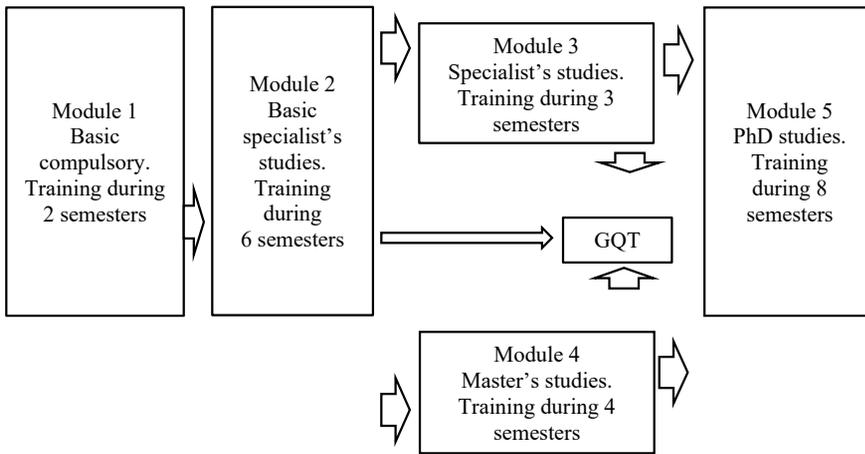


Fig. 1. Scheme of the synchronised main professional educational program «Roads and Aerodromes» [performed by the authors].

framework of the EGS «Road Sector». As a result, the most motivated students are retained at each direction of training after the first year of studies.

4. *Module 2 («Basic specialist's studies»)*. All disciplines of the module are of general professional nature, related exclusively to survey, design, construction, operation and maintenance of roads. The fundamental feature of this module is integration into it of educational courses for obtaining professions at the level of secondary vocational education (driver of licensed categories A, B, C, D; tractor driver; grader operator; asphalt paver operator; road roller operator; asphalt distributor operator; front-end loader driver; geodesist, etc. Obtaining additional professions is carried out based on the «Elective disciplines» set. As a result, upon completion of three years of study, students will have additional professions (from three to six, depending on duration of the training course).

5. *Module 3 («Specialist's studies»)*. The core focus of the module is development of skills, including practical ones, in engineering creativity, carrying out experimental design, design and construction based on acquired knowledge and scientific training, as well as organisation and management of processes in the road construction industry. It allows to implement individual trends in training with expanded knowledge and practical skills in certain areas of professional activity. Individual educational trajectories are formed based on the modules of elective disciplines provided for in the Federal State Educational Standards, optional classes, research activities of students at departmental/institute laboratories, as well as by involving students in carrying out research and

experimental design under government contracts and business contracts. Individual trends in student education are implemented to train selected specialists for whom there is an urgent current need at the regional level.

6. *Module 4 («Master's studies»)*. The master's studies are included in the specialist's studies program as a separate level of education. Currently, program accreditation and training are carried out independently of the «Roads and Aerodromes» direction of studies. At the same time, the master's studies constitute the most important component of the proposed synchronised training system and should be included in the single federal state standard along with modules 1–3. Its presence in the educational process makes it possible for graduates of the basic specialist's studies, after gaining some experience of practical work at manufacturing enterprises, to continue their education at a higher level. On the other hand, specialists who have received education within other enlarged groups of specialties, for example, economists, managers, specialists in transport systems, materials science specialists, etc., can enrol in master's programs as well. The principles of training organisation are identical to those of module 3 «Specialist's studies». The specifics of the master's studies are research and development activities, development of new technologies and materials, training of specialists with expanded competencies in monitoring, expert and rule-making areas.

7. Depending on the current needs for personnel of a certain qualification both in the entire industry and in regional / municipal enterprises and organisations, the proposed education system



makes it possible to quickly train the required number of highly specialised personnel through organisation of courses of additional professional education (APE) at the levels of basic specialist's, specialist's and master's studies.

As emphasised in paragraph 12 of Section II «Current state of staffing and education for the road sector» of the «Concept for development of road education until 2035»⁷, approved by the Minister of Transport of the Russian Federation V. G. Savelyev on February 15, 2023, educational programs for training of road builders are overloaded with «... humanitarian disciplines that are not related to formation of development of professional competencies». This well-known problem in the engineering education system is associated with the peculiarities of staffing of the educational and methodological units of universities. Having a predominantly humanitarian educational background, employees of educational and methodological departments, when developing basic (BC) and detailed («working», DWC) curricula for engineering specialties, because of their background competencies, are not able to create balanced curricula. As a result, during the first four semesters (two study years) students study disciplines that are mostly not related to the problems of survey, design, construction, operation and maintenance of roads and aerodromes. During senior study years, the same humanities disciplines almost completely fill the modules of elective disciplines and are also present in the modules of general professional and professional disciplines.

From a formal point of view, the proposed synchronised training scheme can eliminate an unreasonably large number of humanities disciplines in the educational programs of engineering GPEPs. However, the fundamental solution lies in the organisational plane.

First, in accordance with the Federal Law of December 29, 2012, No. 273-FZ «On Education in the Russian Federation»⁸ and regulatory documents of educational institutions (charter, regulations for educational units), organisation and implementation of educational processes within the directions of studies is entrusted to educational units and departments of the corresponding profile. Consequently, the decision on the disciplines taught within the framework of GPEP, necessary for

7 [Electronic resource]: https://dor-obr.ru/files/007/601/233/7601233/original/Концепция_развития_дорожного_образования_до_2035_года.pdf.

8 [Electronic resource]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/.

training of qualified personnel, should be made by the departments responsible for graduation. Educational and methodological units should not interfere in formation of the list of taught disciplines due to their lack of the required competencies. Their main role is methodological and technical support for departments responsible for graduation in preparation of BC and DWC, primarily through distribution of disciplines/hours per semester and shaping electronic document formats.

Second, the federal state educational standards of the third generation (Federal State Educational Standards 3, 3+, 3++), as well as the layout of the fourth generation⁹ Federal State Educational Standard, clearly prescribe the number and scope of compulsory humanities disciplines. All recent generations of standards indicated no more than five disciplines in humanities, including physical education and sports. Clause 2.5 of the draft layout of the fourth generation Federal State Educational Standard also contains the following disciplines: philosophy, foreign language, life safety, history of Russia (at least 4 credits or, respectively, 144 hours), physical education and sports, with a volume of at least 328 academic hours.

Based on basic legal documents, we can draw a fairly clear conclusion: the oversaturation of GPEP of engineering disciplines with humanities is associated with the peculiarities of the internal organisational structure of higher educational institutions, when the filling of BC and DWC with disciplines is carried out not by departments responsible for graduation, development and implementation of GPEP, the quality of training specialists, but by educational and methodological units of universities that do not have sometimes the required qualifications and knowledge in the field of engineering sciences.

We can quote the example of «Life safety» discipline. From the standpoint of natural science and humanities the problem is relevant for technogenic safety, environmental protection, resource use, social and economic relations, interethnic, cultural, linguistic, religious interactions, pedagogy and andragogy. In the engineering sciences and, in particular, within the GPEP «Roads and Aerodromes», the relevance of the discipline is shifting to specific areas of human interaction with technical means, processes and technologies (production base, road machines and mechanisms, structural materials, safety

9 [Electronic resource]: https://fgosvo.ru/uploadfiles/fgos4/Maket_FGOSVO_4.pdf?ysclid=lhev18fg6p700616569.

precautions) considering implementation of environmental protection against factors of production activity of both society and nature.

Accordingly, the problem is solved by bringing the organisational structure of educational institutions and of the procedure for formation of BC and DWC into compliance with the requirements of basic regulatory documents.

A significant number of disciplines in humanities are included in the BC and DWC due to the presence of regulatory requirements for inclusion in the educational process of mandatory blocks/modules/disciplines that reflect regional specifics: the so-called «regional component». Based on the authors' many years of experience, we can propose a solution to the problem – to add a clause to the Federal State Educational Standard requiring that the regional component be formed exclusively by general professional and professional disciplines. For example, for the direction «Roads and Aerodromes» of the department of the same name at the Road Transport Faculty of Northern-Eastern Federal University in Yakutsk, the regional component should be aimed at solving a number of problems in the road construction industry: construction technologies on permafrost soils, land winter roads, ice roads and crossings, stability of road construction equipment, materials and structures at extremely low temperatures, logistics problems of the permafrost zone, etc.

Basic problems and risks of implementing a synchronised training program

The synchronised system of training specialists in survey, design, construction, operation and maintenance of roads and road infrastructure proposed for discussion by the professional community can be implemented when authorised bodies carry out several organisational, legal, financial and economic actions. The main ones are:

1. Funding should be focused on the training program.

Currently, funding of the activities of departments is carried out on a «per capita» basis: departments responsible for graduation receive allocated funds to form a full-time teaching staff at the rate of 1 full-time teacher per 12 students studying at the department. This approach is justified by «economic feasibility». On the one hand, in practice, such an approach leads to a significant decrease in quality of education, because with emergence of low-budget/incomplete groups a number of measures are being taken to reduce budget expenses (e.g., at NEFU in 2022–2023 academic group was considered as a less complete

group with fewer than 20 students in the specialist's academic group, less than 22 students in the bachelor's group, less than 12 students in the master's group). It may result in the transfer of teaching staff to extra-budgetary rates, the transfer of students to study on a paid basis, the transfer of a significant part of classroom hours (lectures, laboratory and practical classes) to the column of DWC «Individual work of students» (IWS). These are natural consequences of the «per capita» principle of financing. In accordance with the current Federal State Educational Standards and DWC, the volume of teaching hours in five specialty courses is about 10800 hours (300 credit units or 60 credit units per course). At NEFU, with a standard annual teaching load of 900 hours for assistant lecturers, senior lecturers and associate professors, 12 staff positions are required to implement the curriculum. Accordingly, the number of students should be at least 144 people or, on average, 29 students in each course. As practical experience shows, for example, if 26 students are enrolled the first year, by the fifth year there are 15–16 people left in the group, i.e. about 61,5 % of the contingent remains. Consequently, to retain full-time teaching staff, educational departments are forced to transfer about 40 % of classroom hours (lectures, laboratory, practical) to student's individual work or extra-budgetary rates. On the other hand, the concept of «economic feasibility» is incompatible both with social phenomena in general and with educational processes in particular. If the need for personnel of a certain qualification by issuing licensing and accreditation documents is confirmed and the required number of these specialists (allocated budgeted places) is determined, then the question of the «economic feasibility» of fulfilling the state commission should not arise. The educational organisation represented by the department responsible for graduation should prepare the required number of personnel with the required specialisation for the road construction industry.

The amount of funding for an entire synchronised program is determined quite simply. Let's consider this using the example of the proposed education scheme, considering the standard annual teaching load of teaching staff adopted at NEFU – 900 hours/year (this load varies in universities) and the volume of the annual program of 60 credit units (2160 hours).

The total hourly load of teaching staff is:

- At the basic specialist's studies level (modules 1, 2, Pic. 1) – 2640 hours.
- At the specialist's studies level (module 3, Pic. 1) – 3240 hours.



• At the master's studies level (module 4, Pic. 1) – 4320 hours.

The total number of hours required for quality training of students within a synchronised program is 10200 hours. To implement the program, 10200/900~11,4 teaching staff rates are required. Considering the presence of professors on the staff of any department, who often have a smaller annual hourly load, to implement the in-class program, the department must have about 12 staff positions of assistant lecturers, lecturers, associate professors and professors. In addition to these rates, the department should be allocated staff positions for engineering and technical workers (depending on the availability of specific laboratories), as well as rates for industrial training trainers to conduct classes within the vocational training system (VTS) integrated into the basic specialist's training program.

2. At the level of professional standards, unambiguous labour functions should be formed for each level of education – basic specialist's, specialist's and master's studies.

To date, only one professional standard¹⁰ has been approved for road industry specialists with higher education. Despite the date of its publication, its structure cannot in any way contribute to development of GPEP and Federal State Educational Standard, adequate to modern requirements and challenges. First, it describes the labour functions of bachelors as a basic element of the educational structure. Second, section III «Characteristics of generalised labour functions» lists positions/professions/specialties and labour functions related exclusively to road construction, organisation and management of road construction processes and monitoring the quality of their implementation. Entire sets of operations and responsibilities have been removed from the labour functions of a road employee, in particular:

– Road surveys. For example, on the territory of the permafrost zone they should include about two dozen surveys. In accordance with the requirements of regulatory documents, mandatory surveys include: climatic characteristics of the operation area; geomorphological characteristics and relief; geobotanical characteristics; hydrological conditions; geological structure, lithological

composition of soils, their age and genetic characteristics; tectonic conditions; hydrogeological conditions; areal distribution of permafrost and thawed soils; thickness and vertical structure of the permafrost; depths of seasonal thawing and freezing of soils; temperature regime of soils; temperature-strength state of soils (hard-frozen, plastic-frozen, loose-frozen, frosty); characteristics of soil heaving; cryogenic soil textures; permafrost physical and geological processes and phenomena; physical, thermophysical and mechanical characteristics of soils; soil salinity; characteristics of seismicity of the operation area and recurrence of seismic impacts in it, as well as the increment of seismicity (positive and negative) of construction sites (in seismic areas).

– Design of roads considering data from the set of surveys.

– Operation/maintenance of roads considering transport and logistics, natural-climatic and engineering-geological characteristics of specific regions. For the permafrost zone, for example, there is the need for specialists in land winter roads, ice roads and crossings.

– Control, maintenance and repair of road construction machines operating in specific natural and climatic conditions.

– Operation and maintenance of road construction industrial bases (quarries for extraction of road construction materials; asphalt concrete, cement concrete, crushing plants, monitoring sites, repair bases, etc.).

– Laboratory/scientific support of road construction (road laboratories, incoming inspection laboratories, expert laboratories, etc.).

– Research work on development of new construction technologies and road-building materials; examination of ongoing work and analysis of the condition of roads, systems for organising scientific research and reporting; organisation and conduct of research work at experimental and production sites, etc.

– Construction and operation of the road infrastructure, which includes culverts and drainage structures, lighting, traffic lights, video cameras, energy supply, signs, horizontal markings, noise protection, pedestrian crossings, sidewalks, etc.

– Monitoring of the condition and inspection of roads.

The paradox is that in the absence of professional standards, in training programs for specialists within the direction of studies 08.05.02 «Construction, operation, renovation and technical protection of roads, bridges and tunnels», all the

¹⁰ Order of the Ministry of Labour and Social Protection «On approval of the professional standard «Specialist in organising construction of road facilities», dated March 20, 2023, No. 182n. [Electronic resource]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202304190017>. Last accessed 15.11.2023.

above tasks/specialisations/qualifications are present in the form of separate disciplines.

The need for professional standards is dictated by the requirements of the Federal State Educational Standards and GPEP and DWC developed on their basis, in accordance with which, in turn, the educational process is organised. The Federal State Educational Standard also presents three types of competencies: universal (UC), general professional (GPC) and professional (PC) competencies. The content of the UC is stipulated in the Federal State Educational Standard, and they are the same for all disciplines, all levels of higher education and all enlarged groups of specialties. This is one of the main factors of disproportionately large number of humanities disciplines within engineering directions of studies, because the educational and methodological units of universities believe that general professional and professional engineering disciplines do not contain these educational disciplines. As a rule, in DWC, universal competencies are tied exclusively to the humanities.

General professional and professional competencies must be developed in accordance with professional standards, which have not been developed for the road construction industry. For such a case, the Federal State Educational Standard contains an explanation: «(if available)». What to do if there are no professional standards, no explanation is given. In this regard, when preparing documentation that contains formulations of these competencies (GPEP, BC, DWC, detailed work programs in specific disciplines), definitions of general professional and professional competencies for bachelor's, master's and specialist's degrees are developed indeed by the faculty of the department based on the existing pedagogical expertise, production experience and as agreed with employers. The current situation indicates, if not the complete formality of the concept of «competence,» then the pointlessness of linking educational «competencies» to professional standards, at least for road specialists, for the coming decades. Since it is impossible to abolish professional standards, there is only one way out: exclusion of the concept of «competence» from the Federal State Educational Standard.

As many years of teaching experience show, within the educational process, the lack of professional standards is mitigated solely by professionalism of the teaching staff of educational organisations in close cooperation with regional production enterprises and organisations. However, at the level of state planning of the occupational

structure and determining the capacity of the road construction industry, reflected, in particular, in allocation of budgeted places for educational institutions, the problem of the lack of professional standards is of paramount importance. The regulator of professional road construction activities is the Ministry of Transport of the Russian Federation represented by the Federal Road Agency (Rosavtodor). Only these institutions have the rights and competence to draw up long-term plans for staffing in the industry and to develop requirements at the state level for quality and quantity of required specialists with various competencies. Requirements for quality of specialists of various levels of training and a set of their competencies are formalised at the level of professional standards. Educational institutions, in accordance with the requirements of the Federal State Educational Standard, train personnel that meet the needs of the industry as set out in professional standards. With the advent of the Association of Road Education and its proposal to create an educational and methodological centre [13], there is hope that in the near future the regulator in the field of road infrastructure will develop professional standards at various levels that are so necessary for educational processes.

3. The problem of providing the educational process and research of departments responsible for graduation with research/laboratory equipment and road machines.

The scheme of synchronised training in the specialty «Roads and Aerodromes» proposed for consideration by the professional community is aimed at training professional personnel for the road construction industry at all levels of education. A high degree of professionalism presupposes not only that students have in-depth knowledge of the subjects taught and interdisciplinary relationships, but also the consolidation of this knowledge in laboratory and practical classes. An important aspect of the educational process is acquisition by students of practical skills in surveying, design, construction, operation and maintenance of roads.

Students can obtain practical skills either during training sessions (practical and laboratory work), or during educational and industrial internships conducted at production enterprises.

Industrial internships are the most effective mechanism for consolidating the knowledge acquired during study and gaining real practical experience. However, they are subject to strict restraints related both to the specifics of the mandatory time for in-class training, determined by the Federal State Educational Standard, and to



the peculiarities of organisation of work in the industry. In the Republic of Sakha (Yakutia), for example, the active phase of road construction works begins in May and continues until the end of September. In general, the road construction season lasts about five months. The educational process at the department of «Roads and Aerodromes» of Road Transport Faculty of NEFU, in accordance with the requirements of the Federal State Educational Standard, begins on September 1 and ends, depending on the level of education, within the period from June 10 through June 30. Even if the department has agreements on organising practical training with almost all road construction enterprises of the Republic of Sakha (Yakutia), due to formal reasons, students can actually start working only in the last ten days of June. By this time, only positions of road workers remain vacant at production enterprises, and trainees are hired for these job positions. The possibility of trainees' participation in the production process is limited to two months (July–August). With a very busy schedule of construction work, students, especially after the second year of study, do not have time to obtain higher qualifications, and the employer has neither the opportunity nor the right (no license for educational activities) to train trainees. Accordingly, the knowledge acquired by students during industrial internship is consolidated only at the level of qualification of a road worker.

On the other hand, students cannot, in principle, acquire practical skills in construction, maintenance and operation of land winter roads, ice roads and crossings.

The problem is solved within the framework of the proposed synchronised training system. The acquisition of additional specialties and the acquisition of practical skills in them for all types of practical activities of students is carried out during the educational process, starting from the first year when mastering elective disciplines, disciplines related to the regional component, elective classes, research activities and specialised club-like classes. Moreover, the additional specialties and qualifications of various levels obtained must be confirmed by documents issued in conformity with state-approved format (driver license of a specified category, licenses, certificates, diplomas, letters of confirmation, etc.).

In the future, it is possible to adopt a system of personnel retraining, which has been practiced for a long time in educational institutions and industrial enterprises of water transport. Upon completion of training at the vocational training level, graduates

are issued, in addition to a diploma of completion, a working seafarer's diploma, which is the basis for admission to work. The validity period of a working diploma is five years. Managers also undergo specialised retraining courses once every five years with the issuance of a state-approved certificate.

The main principle of transferring practically significant skills to students in working with modern equipment should be systematic reorganisation of educational laboratories of universities into real research laboratories, organisationally structured by analogy with laboratories of academic institutes and manufacturing enterprises. The organisation of the proposed principle of training in the specialty «Roads and Aerodromes» involves formation and acquisition for the educational institution:

- Several accredited research stationary laboratories and offices, provided with a full set of modern equipment and full-time staff (the priority list should include laboratories in: soil science, road materials science, testing of asphalt concrete and road bitumen, geodesy/geoinformation systems/digital technologies).

- A fully equipped road laboratory.

- A laboratory for road inspection/monitoring equipped with a full set of equipment.

- Road construction equipment for training and practice of students within the framework of the second module «Basic specialist's studies» (Pic. 1).

- Construction of a race track, experimental and industrial field sites for research and testing of materials, technologies and road construction equipment, which is especially important for natural and climatic conditions of the permafrost zone.

- Providing tools and equipment with premises and repair facilities.

Replacing the very limited teaching and laboratory base of educational institutions with industrial research facilities is an extremely expensive undertaking. Unmanned aerial vehicle (UAV) of a professional type can be called one of the most «budget» devices, necessary for students to learn digital technologies and to acquire practical skills in remote sensing and digitisation of roads, creating digital terrain models, condition monitoring, building 3D models, creating databases of automated traffic control and computer-aided design. The cost of the UAV itself ranges from 2–3 million rubles, not considering software and computer support. The cost of a fully equipped mobile laboratory for examining the condition of roads according to 2022 data is 27 million rubles. A laboratory for testing asphalt concrete, equipped in accordance with new regulatory requirements,

costs about 16–18 million rubles. Even for these three positions, the total amount of funding exceeds the allocated annual budget funds per a department of a federal university.

Proposals for an organisational scheme for synchronised learning

Based on the analysis, it becomes obvious that there is a certain, and not entirely natural contradiction. Educational institutions, even at the federal level, having a license to conduct training and human resources, cannot ensure system scientific research and high-quality training of personnel with practical skills and road specialties, due to the lack of necessary equipment, which is due, first, to the lack of financial resources. Manufacturing enterprises, having both equipment and financial resources at their disposal, have neither the right nor the time opportunity to improve the qualifications of student trainees above the level of a road worker.

Consolidation of opportunities and capacity of educational institutions and enterprises of road construction industry (taking in mind Ministry of Science and Higher Education and Ministry of Transport of the Russian Federation and its regional institutions) is possible through creation of already known entities: scientific and educational centres (SEC).

One of the possible comprehensive solutions to a significant part of the existing problems could be creation of several (in accordance with the existing road and climate zoning of the Russian Federation) Interdepartmental Scientific and Educational Centres of Regional Importance (ISECR).

The Road Transport Faculty of the North-Eastern Federal University in Yakutsk is a unique ground for creating an ISECR for the first road-climatic zone. This conclusion is based on the following features of the educational unit:

- Localisation of an educational unit of road construction in the territory of permafrost (in terms of uniqueness of localisation, it is the only one in Russia).

- Availability of a license for educational activities, accreditation of currently existing bachelor's, specialist's and master's programs in road construction.

- Availability of teaching staff who not only have unique knowledge and experience in teaching disciplines considering the extreme conditions of the Far North, but also have practical job experience and experience in organising technological processes in cryolithozone conditions.

- The faculty has infrastructure facilities and a laboratory base, including two racing tracks, a full-scale test site with an area of 72 hectares, a variety of simulators, a fleet of passenger cars, a bus, road construction equipment (asphalt paver, grader, tractor, front-end loader, mini-loader, trucks), geodesy, materials science and soil science laboratory, as well as a complete set of equipment for a laboratory for testing asphalt concrete (the laboratory plans to receive accreditation in 2024).

- The Department «Roads and Aerodromes» of the NEFU Road Transport Faculty is in close cooperation, including contractual obligations, with majority of organisations and enterprises in the road construction industry of the Republic of Sakha (Yakutia). Scientific cooperation has been established with the Institute of Permafrost Science named after P. I. Melnikov of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Creation of the Interdepartmental Scientific and Educational Centre (ISECR) for the first road-climatic zone based at the grounds of the Road Transport Faculty of the North-Eastern Federal University in Yakutsk will significantly speed up both creation of such a structure and optimise costs.

CONCLUSION

The scheme of synchronised training in the specialty «Roads and Aerodromes» presented for discussion by the professional community, despite the apparent difficulty of implementation in existing higher educational institutions, is in fact already working, at least in educational departments focused on road construction. The proposed scheme is fundamentally different from the current teaching structure by:

- The second module, which is a bachelor's program with a system of qualifications/working specialties of secondary vocational training integrated into it.

- System of organisation and integration of different levels of education into a single synchronised program.

- A relatively clearer division of areas of professional activity according to the amount of knowledge acquired at each stage of training.

The presence of a basic scheme of the educational process provides the basis for development of the Federal State Educational Standard for the specialty «Roads and Aerodromes» and the subsequent formation of GPEP.

The fundamental positions of the presented training scheme, considering the specifics, can be applied to development of main professional



educational training programs for any engineering specialty.

The proposed organisational structure of training which is Interdepartmental Scientific and Educational Centres of Regional Importance (ISECR) can be formed, depending on the tasks assigned to them and the problems of specific territories, at the level of governments of the constituent entities of the Russian Federation or, what seems more reasonable, offices of plenipotentiary representatives in Federal Districts.

REFERENCES

1. Maloshonok, N. G., Shcheglova, I. A., Vil'kova, K. A., Abramova, M. O. Gender stereotypes and the choice of engineering and technical areas of training [Gendernie stereotypy i vybor inzhenerno-tekhnicheskogo napravleniya podgotovki]. *Voprosy obrazovaniya [Educational Studies]*, 2022, Iss. 3, pp. 149–186. EDN: KQPQHC.
2. Problems of engineering and socio-economic education in a technical university in the context of modernisation of higher education. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Tyumen, May 20–21, 2021. Executive editor Pogorelova, S. D. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2021, 616 p. EDN: ITQMBL. ISBN 978-5-9961-2732-0.
3. Tigrov, V., Tolstenko, A., Negrobova, L., Dobromyslova, O., Piminov, E. Education, work and creation: ways for developing technological education of schoolchildren in Russia. *Amazonia Investiga*, 2021. Vol. 10, Iss. 42, pp. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.34069/AI/2021.42.06.19>.
4. Kazakova, E. S., Pokhodzei, G. V. Technical education: Problems and stereotypes. In: Current problems of the professional sphere in the modern world. Proceedings of IV international scientific and practical conference of young scientists in foreign languages, 2017, pp. 66–68. EDN: YOEAAP.
5. Ustyak, V. V. Aspects of professional education and professional self-determination in the works of K. D. Ushinsky. In: The legacy of the great Russian teacher K. D. Ushinsky: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation (Cheboksary, August 18, 2023). Ed. board: Zh. V. Murzina [et al]. Cheboksary, Sreda Publishing House, 2023, pp. 147–150. EDN: AQPWCF.
6. Solovyanyenko, O. I., Sergeeva, E. A. Modernization of the system of engineering and vocational education is the basis for development of the regional economy: collection of conference proceedings. In: Cooperation and entrepreneurship: state of the art, problems and prospects: Collection of scientific works of V International Conference of Young Scientists, Ph.D. students, Students and Pupils (Kazan, November 19, 2021). Ed. board: E. A. Astrakhantseva [et al.]. Cheboksary, Sreda Publishing House, 2021, pp. 195–204. EDN: KZVVZE. ISBN 978-5-907411-90-6.
7. Alisin, V. V., Litvinsky, V. M., Pashkevich, O. I. [et al.]. Development of science and education: Monograph [Razvitie nauki i obrazovaniya: Monografiya]. Cheboksary, Sreda Publishing House, 2019, 180 p. ISBN 978-5-6042304-7-3.
8. Grigorash, O. V. Modern technologies for assessing the effectiveness of the work of a department of a technical university: Monograph [Sovremennye tekhnologii otsenki effektivnosti raboty kafedry tekhnicheskogo vuza: Monografiya]. Cheboksary, Sreda Publishing House, 2018, 216 p. ISBN 978-5-6040294-9-7.
9. Erkhova, M. V., Shumkova, L. G. Research on Individual Motivators of Graduates of Transport Educational Institutions. *World of Transport and Transportation*, 2022, Vol. 20, Iss. 5, pp. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-5-10>.
10. Fedyakin, A. V., Medvedev, S. V., Tantsevova, A. V. At the Forefront of Transport Education and Industrial Science in Russia: the 125th Anniversary of Russian University of Transport. *World of Transport and Transportation*, 2021, Vol. 19, Iss. 3, pp. 104–113. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-19-3-11>.
11. Smyk, A. F., Tkacheva, T. M., Timofeeva, G. Yu. Experience of Using Online Technologies in Transport Education. *World of Transport and Transportation*, 2021, Vol. 19, Iss. 1, pp. 230–245. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-230-245>.
12. Vinogradov, V. V., Kochneva, L. F., Platonova, O. A. On Interaction of School and University in the Framework of Engineering Education. *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 2, pp. 254–259. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-2-254-259>.
13. Bystrov, N. V. Improving the system of higher education in the field of road management of the Russian Federation [Sovershenstvovanie sistemy vysshego obrazovaniya v sfere dorozhnogo khozyaystva Rossiiskoi Federatsii]. *Dorogi i mosty [Roads and Bridges]*, 2022, Iss. 2 (48), pp. 11–22. EDN: APERVJ. ●

Information about the authors:

Pankov, Vladimir Yu., Ph.D. (Geological and Mineralogical Sciences), Master of Transport Management, Associate Professor at the Northern-Eastern Federal University in Yakutsk, Yakutsk, Russia, pankov1956@inbox.ru.

Fedorova, Olga A., Senior Lecturer at the Northern-Eastern Federal University in Yakutsk, Yakutsk, Russia, fedorovaoan@mail.ru.

Article received 05.12.2023, approved 28.12.2023, accepted 09.01.2024.

From the editors. It is possible that some of the authors' proposals and judgments may seem quite radical and at least highly debatable, but they are certainly aimed at improving the quality of training specialists, dictated by the established experience of implementing programs for training road specialists, and are reasoned and structured. Along with this, and in addition to assessing the main content of the proposals, in the editors' opinion, it is necessary to discuss and validate the authors' opinion on the ubiquity and predominantly internal organisational reasons for oversaturation of GPEP of engineering disciplines with humanities ones, given that it is important and especially relevant to search for a balanced approach to the role of humanities, their selectivity, both considering adaptation to the tasks of training highly qualified specialists, and necessarily taking into account the growth of their relevance in solving educative tasks in relation to students. It seems that some conclusions, including those regarding the role of educational and methodological units, are dictated by local conditions and are far from those inherent, for example, for transport universities. It also seems overly pessimistic to conclude that it is inappropriate to use a competency-based approach in the context of highlighted need for professional standards in the road industry and given the broad opportunities for any interested organisations to develop them.

At the same time, the authors themselves repeatedly indicate in the article that the purpose of the work is to submit the proposals for discussion, which is what this publication serves. In this regard, the editors count on the professional opinion of road industry employees and higher education experts.



Development of Seafarers' Foreign Language Communicative Competence Using Simulators



Victoria A. FILONENKO



Vera F. TENISHCHEVA



Anna V. POPOVA

*Victoria A. Filonenko*¹, *Vera F. Tenishcheva*², *Anna V. Popova*³

^{1,2,3} Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia.

¹ORCID 0000-0003-09483080; Scopus Author ID: 57983999000; Russian Science Citation Index Author ID: 710610.

²ORCID 0000-0002-8865-7861.

³ORCID 0000-0002-6575-8598; Russian Science Citation Index Author ID: 758372.

✉ ¹ vicalexfilnov@mail.ru.

ABSTRACT

Due to the high speed of technical progress in the maritime industry, seafarers need to constantly improve their professional competences and not lose sight of important prospects. To study the experience of developing foreign language professional competence of seafarers, the authors consider the conditions for using a wide range of educational tools, including simulators, at the maritime university and find the rationale of the logics of development and application of simulation modelling. The article reflects descriptions of various research methods (theoretical analysis of scientific literature, questionnaires, ranking and comparison, discussion and interviews, collection of statistical data, ascertaining and formative experiments).

Analysis of educational expertise through the prism of the competence approach and the results obtained at different stages of activity prove that the effectiveness of developing foreign language communicative competence increases when applying an integrated interdisciplinary approach and modern high-tech teaching aids, a special place being dedicated to simulators. The authors emphasise the need for appropriate methodological follow-up, when the technological approach involves special scenarios of simulator training, situational algorithms using standard IMO phrases, considering many factors, both related to the technical features of the devices themselves, their software, and the situational component.

Keywords: water transport, simulator training, foreign language communicative competence, training of seafarers according to international conventions.

For citation: Filonenko, V. A., Tenishcheva, V. F., Popova, A. V. Development of Seafarers' Foreign Language Communicative Competence Using Simulators. *World of Transport and Transportation*, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 249–256. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-13>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

According to statistics, today about 90 % of all cargo is transported by sea vessels. This proves the high importance of this mode of transport in the global economy. To ensure efficient and uninterrupted operation, almost all procedures on board the ships are regulated. There are international conventions and national codes, ship safety management systems, instructions and guidelines containing norms and rules, articles, provisions and appendices. It is extremely important to comply with all of them in general and with individual ones under certain circumstances.

Working in the international maritime industry means being disciplined and competent, which is vitally important, since any vessel can instantly become dangerous if personnel do not comply with all mandatory procedures. There are many factors that must be constantly monitored, especially during navigation. These can be both external circumstances and those related to the vessel: weather and navigation conditions, type of cargo, information received from the shore or other vessels in the vicinity, operating conditions of various equipment, external and internal procedures performed, etc.

The training of any specialist is aimed at developing a certain set of competences for working according to profession obtained. The paper *analyses* creative approaches and *identifies* leading trends in formation and development of professional competences [1, pp. 250–251]. The competence maps used at the maritime university are based on international and state requirements specified in the STCW Convention¹ and state educational standards. All competences are considered, distributed and designated in the educational and methodological packages intended for individual disciplines. Thus, each discipline is aimed at forming a set of certain competences, while general and professional competences being distinguished, their content and planned results of mastering the disciplines specified. Identifiers detail the description of the set of required competences through a set of knowledge, skills and experience, as well as behavioural indicators that can be tracked and assessed. The specification of minimum requirements reflects different levels

¹ International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers Part 3–1 – Principles to be observed in keeping a navigational watch. IMO, 2021. [Electronic resource]: <https://www.imo.org>. Last accessed 23.03.2023.

of training, relevant positions and specialties. Competence is specified through the designated knowledge, comprehension and professionalism. The methods of demonstrating competence are supplemented by criteria for their assessment. They serve the basis for development of funds of assessment tools. The latter contain an extensive database of test materials and assignments for midterm and final assessments in disciplines.

Competences are closely related and determine interdisciplinary interactions. The analysis of the digital educational environment of the maritime university indicates the effectiveness of the use of interdisciplinary innovative pedagogical technologies [2]. Thus, the specifics of the minimum «requirements for officer in charge of a navigational watch on ships of 500 gross tonnage or more» indicate several competences, including «use of [IMO] standard maritime communication phrases, and use of English in written and oral forms». This implies adequate knowledge of the English language to enable the officer to use charts and other nautical publications, to understand meteorological information and messages concerning ship's safety and operation, to communicate with other ships, coast stations and VTS centres and to perform the officer's duties also with a multilingual crew, including the ability to use and understand the IMO Standard Maritime Communication Phrases (IMO SMCP). Methods of demonstrating competence are examination and assessment of evidence obtained from practical instruction. The criterion for assessing competence is that English language nautical publications and messages relevant to the safety of the ship are correctly interpreted or drafted. Communications are clear and understood¹.

Modern forms of educational and methodological work involve the development of a multi-level didactic electronic package of educational, methodological and research materials [2]. To ensure high-quality training of specialists, the training program / development of competences should reflect the entire diversity of communicative situations, and this is possible only in conditions of close interdisciplinary cooperation. Thus, all teachers of the Department of Foreign Languages have access to educational and methodological packages and manuals on related disciplines of a special study cycle. They regularly undergo courses of training and practice as instructors and assessors, in accordance with the requirements of the International Convention STCW (regulations I/6, I/8), where, in conditions of close professional cooperation, they have the

opportunity to discuss both the training process and assessment procedures involving the use of simulators with representatives of other departments. The working language of the international maritime industry is English and most of the information available is in English, and when performing his duties, the officer in charge of navigational watch must be attentive to any situation and circumstances, as well as to the applicable instructions and operations that are being performed or planned to be performed. There are many sources of information that need to be monitored at all times. «The officer of the watch is the master's representative and his primary responsibility at all times is the safe navigation of the vessel. He must at all times comply with the applicable regulations for preventing collisions at sea»¹. Not only the navigational situation, but also the general internal and external environment must be kept under constant vigilance and control.

An important component of a specialist's training is his ability to work with modern warning systems. While on duty, an officer must not lose sight of any detail of the constant flow of information coming from various sources. At any time, an officer is ready to receive and transmit the necessary general communications, instructions, discuss the navigation situation, warning and distress signals, etc. in English. There are a number of devices that help the officer on watch manage the safety of the vessel and take into account many factors and conditions. A seafarer's developed foreign language competence presupposes the ability to perceive and reproduce oral and written speech using these devices and/or their readings. An electronic navigational chart display and information system provides a detailed overview of the surrounding area, detailing the distances between objects, to the coastline and sea depth, as well as navigational warnings. It is usually connected to a radar and an automatic information system that provides more detailed information about other vessels (including their bearings, coordinates, speed, course, distances between vessels). The global positioning system is used to specify the course and speed of the vessel relative to the ground. Another way is to measure the speed with a log, which allows for a more accurate measurement of the current speed. Other means are also used in combination, such as gyro- and magnetic compasses, VHF radio, course recorder, various panels (signal, deck/navigation lights, fire alarm), echo sounder,

computer (informing about the operation and possible malfunctions of the engine room equipment), ship's computer, telegraph, bow and stern manoeuvring thrusters, ship and satellite phones, radio room with various equipment, Inmarsat (international maritime satellite communication and distress alert system), GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System), e-mail and NAVTEX (international automated alert system), etc. Not to mention the need to know and strictly follow the regulations provided for by international conventions, national legislation and rules adopted by shipping companies. Thus, in addition to issues of ship safety, environmental protection is also under control, since the prevention of pollution from ships, both in normal and emergency situations, is included in the requirements of key industry conventions.

The officer of the watch is thus in a situation of constant multitasking and the need for increased attention to many factors. To prepare a seafarer for an activity (for example, to stand watch on a bridge), it is necessary, but not sufficient to practice the skills and abilities of working with individual elements (exchange of information in various situations, their assessment, risk analysis, resource allocation, application of instructions, use of systems and individual devices and tools, etc.). The integration of a set of competences considering foreign language communication requires step-by-step preparation and the use of special training tools, such as simulators.

All elements are practiced in Russian and, at the same time, at the Department of Foreign Languages, in English. At first, even when solving familiar situations, students face problems and are forced to overcome the language barrier. This is reflected in reduced rates of decision-making and task completion speed, compared to exercises in Russian. The process of integrating competences determines step-by-step professional development. Comprehensive formation of competences and training of skills is implemented using information technology in general, language laboratory equipment and simulators.

We assumed that to overcome the language barrier when solving operation problems using the simulator, to implement system approach and increase efficiency, it is necessary to develop not only special scenarios, but also a set of situational algorithms using standard IMO phrases.

The objective of the study is to analyse the experience of developing and using simulation



modelling to form the professional foreign language competence of seafarers in the context of using a wide range of educational tools, including simulators.

METHODS AND ORGANISATION OF THE RESEARCH

Based on experience, «the procedure of pedagogical design is implemented at the levels: conceptual level, development technology, its implementation and the level of assessment and correction. Developing the concept of the project, we define the functions and levels of competences, as well as the standards for their implementation. At the level of technology development, the situation is analysed, goals are set, competence tasks for the performer, content, types of educational activities of students, functional features of subjects of study, potential capabilities of teaching aids are determined, a conceptual model is built.

At the next stage, ways of implementing the model are determined, ensuring successful development of the necessary competences, taking into account the identified conditions. At the next level, an analysis of the effectiveness of simulation modelling, the content of training is carried out and a final assessment is made. The content of the exercises is adjusted and adapted considering the level of training of cadets» [3].

At different stages of the research, different methods were used: theoretical analysis of scientific sources, questionnaires, analysis, ranking and comparison, discussion and interviews, collection of statistical data, ascertaining and forming experiments, etc.

Modern maritime education is focused on prospects, responding to the challenges of reality, considering the specifics of management. In order to work effectively, modern maritime universities must comply not only with the general requirements for training students for professional activities [4], but also with a number of regulations and requirements set by international conventions. One of them is the use of a wide range of training tools and equipment, including ship simulators equipped with modern information technologies. The development of training materials takes into account detailed recommendations for the use of simulators², which provide various training in organising activities on board, including navigation watch in normal and emergency modes of operation,

² IMO Model Course 1.22 Ship simulator and bridge teamwork; etc.

communication, the use of various technical means and documentation, environmental protection, etc. [5]. To work effectively with the equipment, it is necessary to consider the latest developments and prospects, analyse and adjust activities at each stage, create a high-quality educational information environment not only for work in classes, but also for distance learning and self-development [6]. Used in maritime education, simulators can transfer people to a virtual world with full immersion in the circumstances of various navigation and weather conditions, normal and emergency situations, where sensory receptors are maximally included in the learning process. Seafarers must develop the skill of concentrating on completing a task, despite the presence of many factors.

The software allows setting up various scenarios, simulating the work of officers on the ship's bridge in conditions where the cadet not only observes the surrounding picture at 360 degrees, but also experiences real pitching in accordance with the programmed storm level on the Beaufort scale. At the same time, access to real bridge equipment, operating in strict accordance with the selected scenario, increases the effectiveness of seafarers' training. Groups of cadets, working together on this virtual bridge, can improve the entire range of competences, since they have to perform their duties as a real team, where everyone is responsible and interaction is ensured through communication that occurs both on the bridge, between crew members, and with other ships and the shore.

The Department of Foreign Languages of the Maritime University has to prepare people to work as part of a mixed crew, using the working language of the industry which is English. For this purpose, educational technologies and teaching and methodological complexes aimed at developing foreign language professional competence are developed and regularly improved, along with others specified in the international STCW Convention and in the State Educational Standards for deck, engineering or electrical personnel. «In the process of teaching professional maritime English, the capabilities of existing computer training complexes, basic and mobile computer systems, network, information and communication and cloud technologies are widely used» [7]. «Elements of distance learning are used at all stages of the cadet's professional training, designed to ensure high-quality feedback and organise full-fledged methodological support for the educational process. Almost all types of educational and research work at all stages, from design and modelling to

presentation of results, control, data processing and adjustments, are performed using computer technologies» [3].

When working with simulators, a set of methodological techniques and means of special and basic training of a specialist is used. High-quality content with integrated technical solutions is necessary to provide cadets with well-organised working conditions, where cadet self-organisation programs make it possible to consider individual needs [8].

An individual approach to teaching professional proficiency in a foreign language is manifested through the introduction of flexible educational programs [9], the use of distance learning technologies, the actualisation of interactive teaching methods and self-processes. The electronic educational platform, as justified, acts as a means of organising, as well as independent work of cadets [10, pp. 221–223].

The task of developing and applying situational algorithms based on standard phrases of the IMO affected several disciplines. The technology of interdisciplinary interaction is not only in demand and necessary in a foreign language environment [11, pp. 351–356.], but also in the modern conditions of digital transformation is an integral part of the training of a specialist with higher education [12, pp. 48–50]. In particular, many disciplines of maritime specialties aimed at forming the leadership qualities of future seafarers, developing the skills of effective teamwork, implementing effective communication in conditions of work in a mixed crew, as well as managing social and labour relations, are conducted exclusively in English. Cadets take lectures and practical courses, where the focus is on communication situations on board a ship, in a mixed crew [13], as well as between ships and between the ship and the shore. Each course has its own objectives, aimed at forming a specific set of competences, which determines the set of topics and the specifics of teaching. The development of communication skills is carried out in conditions where language is not the goal, but a means of studying a wide range of communication issues with colleagues on and off the ship, and shore service personnel. Each course includes elements of simulator training for both standard and emergency and search situations; cadets have access to various sources of information, including those that allow them to implement a professional self-organisation program, working with lectures and additional materials in video and audiovisual

distance format, in the educational environment of the university [14].

The presented courses are divided into blocks, which, in addition to work in the classroom, suggest a distance format, where the courses contain materials of a lecture presentation with audio and video accompaniment, to find gaps in understanding and eliminate barriers through clarification and elaboration of the material at an individual pace, as well as practical and creative tasks, additional materials, ship documents, examples of situational communication, links to previous and current discussions in the distance maritime English club, which is supervised by the department. After completing each of the blocks, the cadet must pass testing.

The system allows automatic creation of individual tests and suggested answer options for each cadet from a question bank, which is regularly updated. The tests must be completed by at least 80 % so that the cadet can access the next block of studying the discipline. If the required score is not scored, the system returns the cadet to the previous block.

In 2022–23, two versions of the courses were launched: for the control group (176 people), using standard, proven methods of teaching and professional development, and for the experimental group (149 people). The methodological material for the experimental group was supplemented with specially developed scenarios and situational algorithms based on standard IMO phrases for additional development. In both groups, the entire range of technical training tools was actively used.

The language labs where all practical classes on these courses are held are equipped with a modern Linko-v8 system. It makes it possible to use elements of simulator training, situational scenarios and decision-making algorithms in a dialogue format and individually, include cadets in various forms of activity, create dialogue and group communication, use oral and written speech, monitor the development of each cadet in almost all types of educational activities, and make timely adjustments if necessary.

RESEARCH RESULTS AND THEIR DISCUSSION

In the process of professional self-organisation, while developing foreign language competence, the question of self-confidence plays an important role. An officer on a ship, being a leader, must instil this feeling in his subordinates and colleagues. This is associated with other qualities, such as determination, enthusiasm, conscientiousness,



social activity and, of course, cannot exist in isolation from communicative activity. When it comes to foreign language activities, solving not only educational problems, but also overcoming one's own complexes becomes a priority. A special case of self-confidence is a positive adequate level of self-assertion and self-esteem.

According to the study, in the 2022–2023 academic year, there was a stable trend of a positive adequate level of self-aspiration and self-esteem in communicative foreign language activities (thus, at the stage of preparation for the included activity, the positive adequate level of self-aspiration and self-esteem was about 57 % in both the control and experimental groups, while after completing simulator training, business games and courses taught in English, 86 % of cadets in the experimental group and 70 % of the control group showed such a result), where the growth of the indicator, to a greater extent, was due to the acquisition of positive experience by cadets in applying the formed competences and, as a result, increased self-confidence. At the same time, a positive effect of the inclusion of situational activity algorithms was noted.

Another important effect of the application of the developed algorithms is reflected in the obtained results. The intermediate control, organised in standard conditions, where the cadets are tested, answer theoretical questions and solve situational problems using analytical methods, with reference to current documents and theoretical course material, did not show a significant discrepancy, both in the score received and in the quality of the answers of the students from the control and experimental groups.

However, when including elements of simulator practice in the examination tests, an increase in the speed of decision-making and task completion by 23 % was noted in the experimental group compared to the control group.

The study of these indicators, based on solving professional problems, allows us to conclude in favour of the growth of cadets' confidence in professional competence in the conditions of quasi-professional activity, and the use of the developed situational algorithms accelerates the execution of tasks and increases self-confidence. During the survey, all cadets unanimously noted the effectiveness of training on simulators, primarily while practicing professional communication, the formation of teamwork algorithms.

Analysing the obtained results, we could not help but highlight the technical component as one of the most important and influencing the content

and procedure of any stage. In addition to focusing on increasing the level of responsible professional self-development, we organised an open discussion on the Internet and, based on the results obtained, prepared a questionnaire. 160 people took part in the 2023 survey. The largest number of participants were cadets/sailors of the full-time department of the Maritime University. The overwhelming majority of respondents were men aged 18–27. The assessments were taken as a percentage and ranked according to their repeatability.

The survey showed that three most popular prospects for business games using information technology and simulator training for cadets are «gaining positive experience of foreign language professional communication» (30 %), «teamwork in solving professional problems, the ability to change roles» (28 %), «increasing efficiency when working with sources of information in English, activating analytical potential» (24 %). Other popular answers included: «activation of mental activity in a foreign language, without internal translation» (18 %), «development of decision-making skills, coping with anxiety when completing timed tasks» (15 %), «increased reactivity» (12 %), «strengthening self-processes, including, first of all, self-control, self-organisation, self-development, etc.» (12 %). Support from teachers and high-quality methodological support were also noted, including through accompanying online courses, with access to a wide range of materials and the possibility of self-control, and a friendly atmosphere in the classroom.

When analysing potential problems and shortcomings, the most popular answer among those who noticed them was «there are not enough lessons in the course» (52 %), and this was true for any of the courses presented. Others pointed out that it would be much easier to complete some tasks without time restrictions (12 %). Others pointed out the intensity of the course and the need to spend a lot of time at home, preparing for classes (6 %).

This experience has shown that for the effective use of technical support during the professional training of a seafarer for work in a mixed crew, a technological approach is needed, where all elements of the educational system are involved and considered significant, the priority tasks include established communication between all subjects of activity, where the development of foreign language competence plays a crucial role. At the same time, all elements of a complex interdisciplinary system can influence the development of training scenarios, especially when self-organisation is logically

implemented in the training procedures. Thus, cadets at each stage feel their responsibility for the process and the result. The use of an integrated modular approach to the design of didactic support for a professionally oriented course [15] allows for the effective use of technical teaching aids and the use of a wide range of the entire system of the university's educational environment, including simulator training.

The use of situational algorithms of communication activities with elements of standard IMO phrases allows to increase the speed of completing tasks and contributes to formation of positive self-confidence, overcoming communication barriers, especially in standard communication situations, which are practiced according to the requirements of conventions.

For the first time, cadets have to try their developed communication skills in a foreign language outside the alma mater during an interview in crewing companies before the first practice, as a result of which the best are selected for further practice on ships operating on international voyages. This high-order motivation encourages cadets from different countries to do everything possible to speak maritime English fluently. Thus, while studying at the university, the guys spend at least a year working on board real ships before they can complete theoretical training and receive an academic diploma, based on which a working one is subsequently issued.

The effectiveness of the foreign language training program is actualised and demonstrated at the state examinations, which are organised using business games on simulators, where it is assumed that the watch will be handed over, a plan for the vessel's pilotage and navigation in conditions of dense traffic will be drawn up, where everyone has a task set before them and controls their vessel. Navigators must be attentive to the constant flow of incoming information and radio calls. All participants are ready to report on the situation at any time upon request of the external «coastal VTS», simulated by the teacher in English, and to request the necessary support. Stable «final results» of the state examinations indicate a sufficiently high level of professional competence. Cadets cope with the tasks set before them, and the overall average indicator steadily remains at a level above 90 %, while it is accepted that if it falls within the range of 85 % to 100 %, then this indicates the effectiveness of the training» [3]. These results are confirmed by statistics obtained after interviews of cadets in English in

crewing companies, which, following the provisions of the Maritime Labour Convention, check the qualifications of job candidates from various angles and in strict accordance with international rules and national recommendations.

CONCLUSIONS

Established communication is a vital part of the effectiveness of any ship's crew. It is an absolute requirement for safe navigation and all cadets have to work hard on their English during their studies at the university. Constant attention to development of professional self-organisation, harmoniously included in the process of activity, allows stimulating the individual component of the entire process of professional development, where training is the most important, but not the only factor. Simulator training helps to activate analytical activity, which allows to expand the possibilities of long-term planning and design at the research stage.

Since the work of the ship's crew is impossible without established effective communication, special attention in the process of training specialists for work at sea is paid to professional foreign language competence. The results of the study confirm the effectiveness of the use of various means, including simulators, allowing to transfer language material from the educational sphere to quasi-professional activity, taking into account a wide range of influencing factors. Conducting state examinations on simulators close to the harsh conditions of the sea shows a high level of readiness of cadets to perform duties on board. The implementation of developed scenarios of simulator training and situational algorithms using standard phrases of the IMO in educational practice allows to increase the efficiency of activities by overcoming communication barriers, increasing self-confidence and speed of decision-making and task execution. An important element of simulator training is the advantage of using high-tech technologies in order to block risks when practicing professional teamwork of the crew in situations potentially dangerous to the environment and human life, during which it becomes possible to timely gain experience and practice decision-making skills in standard and stressful situations of professional activity.

REFERENCES

1. Kopylov, Yu. A., Chernysheva, E. I., Alekseeva, I. A. [et al.]. Innovative areas of professional training in Russia and abroad: Collective monograph [*Innovatsionnie napravleniya professionalnoi podgotovki v Rossii i za rubezhom: Kollektivnaya monografiya*]. Ulyanovsk, IE



Kenshenskaya Victoria Valerievna (Zebra Publishing House), 2024, Iss. 540 p. ISBN 978-5-93856-797-9. EDN: AANNXT.

2. Balyaeva, S. A., Khvingiya, T. G., Kalinina, S. A. Improving the efficiency of higher maritime education in a digital society [Povyshenie effektivnosti vysshego morskogo obrazovaniya v tsifrovom obshchestve]. *Bulletin of Adyge State University. Series 3: Pedagogy and Psychology*, 2021, Iss. 1 (273), pp. 22–30. EDN: KHFPMK.

3. Filonenko, V. A. Design of simulation trainings on a simulator in teaching maritime English [Proektirovanie imitatsionnykh treningov na trenazhere pri obuchenii morskomu angliiskomu yazyku]. *Bulletin of Adyge State University. Series 3: Pedagogy and Psychology*, 2020, Iss. 2 (258), pp. 139–145. EDN: XSFALG.

4. Avanesova, T. P., Gruzdeva, L. K., Gruzdev, D. Yu., Mefleh, M. V. Basic requirements of universities for preparation of students for professional activities [Osnovnie trebovaniya vuzov k podgotovke obuchayushchikhsya k professionalnoi deyatel'nosti]. *Bulletin of Admiral Ushakov State Maritime University*, 2021, Iss. 1 (34), pp. 65–69. EDN: XBFJCY.

5. Oleynikov, B. I., Kostylev, I. I. Development trends and current state of technological simulators for training specialists in maritime and river transport [Tendentsii razvitiya i sovremennoe sostoyanie tekhnologicheskikh trenazherov dlya podgotovki spetsialistov morskogo i rechnogo transporta]. *Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference «Modern scientific research: current problems and trends». «River Forum 2019»*, Omsk, December 19–20, 2019. Omsk, Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State University of Water Transport», 2019, pp. 188–196. EDN: WWPPYN.

6. Tulchiy, V. V. Technology of formation of an information educational environment for distance professional training of maritime transport specialists: Monograph [Tekhnologiya formirovaniya informatsionnoi obrazovatelnoi sredy distantsionnoi professionalnoi podgotovki spetsialistov morskogo transporta: Monografiya]. Novorossiysk, Ed. and Publishing Department of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Maritime State Academy named after Adm. F. F. Ushakov», 2011, 122 p. EDN: QNYDBR.

7. Balyaeva, S. A. Educational technologies for basic training of maritime transport specialists [Obrazovatelnie tekhnologii bazisnoi podgotovki spetsialistov morskogo transporta]. *Proceedings of the international scientific conference «Activity-based approach to education in a digital society»*, Moscow, December 13–14, 2018. Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University; Russian Psychological Society. Moscow, Lomonosov Moscow State University, Publishing House (printing house), 2018, pp. 54–56. EDN: YVCYTZ.

8. Tenishcheva, V. F., Filonenko, V. A., Kuznetsova, Yu. S. Professional self-organisation in foreign language training of a maritime specialist [Professional'naya samoorganizatsiya v inoyazychnoi podgotovke morskogo spetsialista]. *World of science, culture, education*, 2021, Iss. 2 (87), pp. 106–108. EDN: DJFDMJ.

9. Ibyaminova, M. R. Implementation of individual educational trajectories in foreign language training of water transport specialists [Realizatsiya individualnykh obrazovatelnykh traektorii v inoyazychnoi podgotovke spetsialistov vodnogo transporta]. *Current solutions to water transport problems: Collection of materials of I International scientific and practical conference, Astrakhan, April 28, 2022*. Astrakhan, IE Sorokin Roman Vasilievich (Publisher: Sorokin Roman Vasilievich), 2022, pp. 367–372. EDN: MVIQGG.

10. Nagornova, A. Yu., Rogaleva, G. I., Bobylev, A. V. [et al.]. Modern higher education: theory and practice [Sovremennoe vysshee obrazovanie: teoriya i praktika]. Ulyanovsk, IE Kenshenskaya Victoria Valerievna (Zebra Publishing House), 2020, 602 p. ISBN 978-5-6045070-8-7. EDN: YFZVAP.

11. Tenishcheva, V. F., Kuznetsova, Yu. S., Tsyganko, E. N., Filonenko, V. A., Petkov, V. A. Technology of interdisciplinary interaction in a foreign-language environment as a means of professional training of maritime specialists [Tekhnologiya mezhdistsiplinarnogo vzaimodeistviya v inoyazychnoi srede kak sredstvo professionalnoi podgotovki morskikh spetsialistov]. *Scientific Notes of P. F. Lesgaft University*, 2019, Iss. 3 (169), pp. 351–356. EDN: ZBOXBR.

12. Nagornova, A. Yu., Donina, I. A., Zadornaya, M. S. [et al.] Main trends in development of higher education in Russia and abroad: Collective monograph [Osnovnie tendentsii razvitiya vysshego obrazovaniya v Rossii i za rubezhom: Kollektivnaya monografiya]. Responsible editors A. Yu. Nagornova, T. B. Mikhaeva. Ulyanovsk, IE Kenshenskaya Victoria Valerievna (Zebra Publishing House), 2022, 316 p. ISBN 978-5-6048051-4-5. EDN: NVJHXP.

13. Filonenko, V. A. Analytical methods of intercultural communication in the practice of developing professional competences of navigators [Analiticheskie metody mezhekulturnoi kommunikatsii v praktike razvitiya professionalnykh kompetentsii sudovoditelei]. *Bulletin of Admiral Ushakov State Maritime University*, 2017, Iss. 1 (18), pp. 85–88. EDN: ZEUQDB.

14. Filonenko, V. A., Tenishcheva, V. F., Kuznetsova, Yu. S., Tsyganko, E. N. Ch. 4.4. Career guidance and self-organisation as factors of motivation of future seafarers [4.4. Proforientatsiya i samoorganizatsiya kak factory motivatsii budushchikh moryakov]. In: *Modern higher education: ideas, technologies, results*. Ulyanovsk, IE Kenshenskaya Victoria Valerievna (Zebra Publishing House), 2021, pp. 388–397. EDN: IZBZMX.

15. Balyaeva, S. A., Balyaev, D. D. Theoretical foundations for designing basic training for maritime specialists [Teoreticheskie osnovy proektirovaniya bazovoi podgotovki spetsialistov morskogo flota]. In: *Advanced research: theory and practice: collection of articles from the international scientific conference, Kaliningrad, September 2, 2023*. Lomonosov International Institute for Advanced Studies. St. Petersburg, LLC Lomonosov International Institute for Advanced Studies, 2023, pp. 18–19. EDN: JQHPDI.

Information about the authors:

Filonenko, Victoria A., Ph.D. (Pedagogy), Associate Professor at the Department of Foreign Languages of Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia, vicalexfilnov@mail.ru.

Tenishcheva, Vera F., D.Sc. (Pedagogy), Professor at the Department of Foreign Languages of Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia, Vic-Ver@mail.ru.

Popova, Anna V., Ph.D. (Pedagogy), Associate Professor at the Department of Foreign Languages of Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia, dmitrichenko78@list.ru.

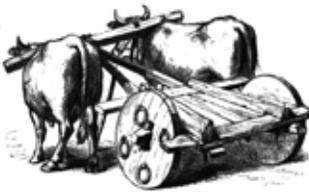
Article received 15.03.2024, approved 19.07.2024, accepted 26.07.2024.

T



TRANSPORT INTEGRATION OF EURASIA **258**

A journey towards the sources of transport component of Eurasian integration.



HISTORY WHEEL



INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT **263**

Different views on the rationale and assessment of the need to expand railway network, as presented in the article of 1912.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-14>

The Role of Transport Vehicles in Ancient Eurasian Integration

**Dmitry A. MACHERET***Dmitry A. Macheret**Railway Research Institute of JSC Russian Railways (JSC VNIIZHT); Joint Scientific Council of JSC Russian Railways; Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

ORCID 0000-0002-1322-3030; RINC Author ID: 380766.

✉ macheretda@rambler.ru.

Дмитрий МАЧЕРЕТ

ABSTRACT

The article is devoted to assessment of the role of transport in development and integration of the Eurasian continent in ancient times. Upon analysing the role of water (river and sea) transport in establishing connections between remote regions of Eurasia, it is highlighted that, given the geographical features of Eurasia, its integration could not be achieved based on the use of water transport alone. Attention is focused on the importance of land transport innovations (the use of horses for riding and the emergence of wheeled carts), thanks to which previously inaccessible areas in the steppe zone of Eurasia became suitable for use and the productivity of cattle breeding increased. It resulted in strengthening of intergroup interaction and development of integration institutions that determined both the life of individual societies and the interaction between them.

New transportation opportunities, increased spatial mobility, and the growing complexity of public institutions gave rise to new social and material needs, stimulated migration and development of interregional exchange. At the same time, not only was there an exchange of surplus products, but production expanded to increase exchange, becoming a commodity manufacture. All this contributed to implementation of the geographical advantages of Eurasia and provision of a higher population density and economic productivity of the use of the territory there compared to the world average.

The synergetic development of water and land transport vehicles and transportation and the long-distance trade based on their use resulted in the transformation of Eurasia by the beginning of II millennium BC into a single system of interconnected cultures.

Keywords: transport, transport vehicles, trade and transport activities, transport innovations, Eurasian integration, population density, economic growth.

For citation: Macheret, D. A. The Role of Transport Vehicles in Ancient Eurasian Integration. *World of Transport and Transportation*, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 258–262. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-14>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Eurasia is the largest continent, occupying almost 36 % of the earth's land. At the same time, its demographic and economic share is even more significant. According to A. Maddison's estimates [1], the share of Eurasia in both the world population and the world GDP at the beginning of our era (these are the deepest estimates in chronological terms) was almost 90 %, and at the beginning of this century, respectively, over 72 % and over 65 %. Thus, the higher population density and economic productivity of Eurasia, compared to the world average, were already formed in ancient times, which makes it relevant to consider the factors that influenced this.

J. Diamond explains the initial successful development of Eurasia by natural and geographical factors, in particular, its latitudinal orientation, which facilitated the spread of innovations between similar geographical zones located at the same latitude [2]. However, although natural and geographical factors are important, they are not sufficient in themselves to ensure successful development [3–5]. Therefore, it is necessary to analyse other factors. Considering that several studies, in particular [6–11], have revealed a significant influence of transport on development of ancient societies, a reasonable *task* is to assess the role of transport in integration and development of the Eurasian continent in ancient times, based on the method of *historical analysis*.

RESULTS

The settlement of Eurasia by modern humans was completed in the Upper Palaeolithic, about 30 thousand years ago, including the Arctic and the islands of Southeast Asia [12; 13]. The latter fact leads to an «important conclusion: the material culture of the people of that time made it possible to create the first waterborne vehicles and use them to cover significant distances by sea» [12, P. 191].

Data from archaeological excavations in Voronezh region, where Kostenki Upper Palaeolithic site complexes existed more than 40 thousand years ago, indicate the use of «stone, which could only be found 100–150 km from the site» and shells, which «could only have been brought from the Black Sea coast, located more than 500 km away» [13, P. 371]. This demonstrates the deep antiquity of the elements of interregional integration, including movement of both people and material goods. However, they covered only neighbouring regions and were fragmentary. In conditions of extremely primitive means of transportation [6], integration processes could not reach large scales either in distance or intensity.

Significant improvements in transport occurred during the Mesolithic (10th–7th millennia BC) and Neolithic (7th–3rd millennia BC), especially during its final division, the Eneolithic (4th–3rd millennia BC), when metal processing began: processing of copper, gold, and then bronze – an alloy of copper with arsenic or (which gave the best result) – with tin [4; 6; 14]. Considering the dispersion and rarity of metal sources, their significant remoteness from the most ancient economic

centres with the highest concentration of population, improvement of means of transportation and development of trade and transportation activities based there-on were *necessary* conditions for development of production and use of metals, which played a key role in formation of ancient civilisations.

Water transport development

First, it is necessary to note development of water (river and sea) transport, which ensured the greatest carrying capacity and low cost of transportation [15]. It is no coincidence that the most ancient civilisation not only in Eurasia, but also in the world – the Sumerian – was formed in Southern Mesopotamia, where two of the «great historical rivers» [16] – the Tigris and Euphrates – flowed into the Persian Gulf, which gave the Sumerians the opportunity to trade both with regions located in the gravitational zone of the Tigris and Euphrates in their northern reaches, and with regions on the shores of the Persian Gulf and, further, of the Indian Ocean. This was extremely important, since in Southern Mesopotamia there were practically no minerals (no stone, no metals), and either no wood [14]. All this had to be brought from hundreds (and sometimes thousands) of kilometres away. So, without long-distance trade, the material basis of which was improvement of transport vehicles, this ancient civilisation could not have existed.

It is worth noting the innovative approach to solving the problem of return (empty) movement of river vessels that delivered goods downstream of the Tigris and Euphrates to the urban centres of Mesopotamia. These vessels were made of skins stretched over a wooden frame. After unloading, the frame was sold along with the cargo or thrown away, and the skins were folded and transported back, loaded onto donkeys, to be used later for the construction of new boats [15; 17]. Considering that the problem of empty movement of vehicles is one of the fundamental ones for transportation activities in our time, its original solution in ancient times is an illustrative example of innovative transport development.

The importance of regular and reliable supplies of raw materials was so great for the Sumerian civilisation that already in the 4th millennium BC Sumerian trading posts were established in Northern Mesopotamia [4]. This was of great importance for interregional integration.

In 3rd millennium, development of navigation led to establishment of stable trade and transport links between Mesopotamia and the Indus Valley, where the Harappan civilisation arose (very likely under the influence of these links) [14; 17], englobing the entire Indus Valley (which was also an important transport artery) and the coast of the Arabian Sea [18]. Thus, a unified trade and transport system was formed, including Mesopotamia (up to the mountainous regions at the sources of the Tigris and Euphrates), the Persian Gulf region, the Arabian Sea coast and the Indus Valley [15], within which a stable movement of goods was carried out, allowing individual regions to specialise in the



production of goods that suited local conditions and to conduct effective exchange with other regions.

In the neighbouring Eastern Mediterranean, navigation also developed, which was facilitated by the appearance of long multi-oared boats at the end of 4th – beginning of 3rd millennium BC, which could accommodate from 20 to 40 rowers [4]. Archaeological data suggest that with their help, contacts were also established with the Northern Black Sea region.

Thus, following development of river and sea transport in the Eneolithic era, connections were established between very remote regions of Eurasia. Where transportation by water was unavailable, pack donkeys were used [15].

Trade relations over significant distances could be carried out not directly, but through intermediaries. A good example of developed intermediary trade is the port of Dilmun, located on an island in the Persian Gulf and providing trade and transport interaction between Mesopotamia and the regions of Arabia and India [11; 19].

However, all these trade and transport links covered only a small part of the Eurasian continent. Most of it was inaccessible to the listed transport means. It is not surprising that the spread of agricultural culture in Europe in the early Neolithic proceeded at about the same rate as the settlement of Upper Palaeolithic Cro-Magnons about 40 thousand years earlier [13]. In inland areas, interaction even between neighbouring cultures developed rather slowly [4].

Land innovations

The situation changed qualitatively after the emergence of a few land transport innovations. Probably, at the end of 5th millennium BC, in the Black Sea-Caspian steppes, where the horse had been domesticated before for the first time, the use of horses for riding began [4]. Horseback riding dramatically increased the productivity of shepherds, the scale and efficiency of cattle breeding, and, accordingly, the volume of surplus product produced. The increase in herds required the use of new pastures, which was associated with the need to regulate land use issues with other clans or tribes, stimulated the expansion of contacts and the development of gift exchange and the «prestigious» economy – important integrative mechanisms [20].

In the middle of 4th millennium BC, wheeled carts appeared in Mesopotamia and that was another important transport innovation [14]. Initially, oxen or donkeys were harnessed in them. Several centuries later, wheeled vehicles spread to the Black Sea-Caspian steppes, but here horse traction was used [4]. The appearance of horse-drawn carts meant the emergence of a fundamentally new means of transport, which became the basis of land transport for the next five millennia. And at that time, this led to a radical transformation of steppe pastoral societies. The synergy of horse-drawn wheeled carts and horseback riding made it possible to move to a mobile (without permanent settlements) form of cattle breeding, which made previously inaccessible (due to remoteness from settlements) steppe regions suitable for use, made it possible to further increase the livestock population, strengthened intergroup interaction and contributed to

strengthening and development of integration institutions that determined both the life of individual societies and the interaction between them. (First of all, it is necessary to highlight the institution of mutual hospitality and the patron-client relationship [4]).

New transport opportunities, increased spatial mobility, new social and material needs, and the increasing complexity of social institutions stimulated migrations of the Proto-Indo-European tribes inhabiting the Black Sea-Caspian steppes both in the western and eastern directions.

In the latter case, new cultures formed in the steppes of the Southern Trans-Urals at the end of 3rd – beginning of 2nd millennium BC, characterised by fortified settlements and metal processing «on a scale unprecedented for the steppe zone» [4, P. 560]. Metallurgical production was largely export-oriented. Its «launch occurred as a result of contact with the markets of urban civilisations [located further south – *author's note*], but the increase in metal smelting led to an increase in its consumption in the steppe and forest-steppe zone, marking the beginning of an intra-European cycle of exchanges, which after 2100 BC led to a boom in metal production in the Eurasian steppes» [4, P. 589]. The resulting Eurasian steppe metallurgical province spread «in 2nd millennium BC from the Dnieper basin to the upper Ob and from the foothills of the Caucasus, Pamir and Tien Shan ... to the taiga zone of Eurasia» [21, P. 514], occupying an area of up to 7–8 million sq. km. It should be noted that it had «close interpenetrating contacts with the centres of the East Asian and European metallurgical provinces» [21, P. 514].

There is an assumption that some settlements in the steppes of the Southern Urals specialised in breeding horses for export [4]. This is consistent with archaeological data, according to which «stable supplies of horses [to the regions of Central and Western Asia – *author's note*] began between 2100–2000 BC» [4, P. 569]. Soon, chariots invented in the steppe zone appeared in all regions of the Middle East. «Chariots... were the first type of wheeled carts designed for fast travel, and this innovation changed land transport forever. The main element that made high speed possible was the spoked wheel» [4, pp. 540–541]. (Previously existing carts had solid wheels).

Due to the transport innovations implemented in the steppe zone, in 2nd millennium BC «for the first time in history, a chain of broadly similar cultures spread from the borders of China to... Europe. Innovations and raw materials began to move across the continent» [4, P. 591]. Thus, «the transformation of Eurasia from a series of isolated cultures into a single, communicating system» [4, P. 618] took place, the catalyst for which was the innovative development of transport.

Socio-economic aspects

Having revealed the role of transport innovations in Eurasian integration in the ancient period, it is necessary to pay attention to a series of important socio-economic aspects of the issue under consideration.

A modern interpretation of the relationship between nomadic tribes and ancient states of Eurasia at the turn of

3rd and 2nd millennia BC, based on archaeological data, indicates that the ancient urban civilisations of Western and Central Asia depended on steppe cattle breeders [4]. Urban civilisations needed supplies of metals from the steppe zone, and then of horses. At the same time, the inhabitants of the steppes were, for the most part, self-sufficient in satisfying their basic needs. They produced the necessary amount of meat and dairy products (gathering was the source of plant food), mined ore and independently manufactured metal products. However, socio-economic developments led to the emergence of new needs that went beyond the basic ones, including the need for luxury goods. Such goods, for example, bronze mirrors and semi-precious stones, apparently fabrics, as well as thin-walled ceramics, were received by the inhabitants of the steppes from the south, in exchange for metals and horses. Thus, in one of the steppe settlements in the territory of northern Kazakhstan, 12 % of the ceramics found were imported, thin-walled ceramics, made in the south of Central Asia, and 88 % were produced locally [4].

Around the same period, on the island of Santorini in the Aegean Sea, which was one of the centres of the Minoan civilisation, the structure of origin of ceramics, according to archaeological excavations, was almost the same: 85 % were produced locally and 15 % were imported [22]. It can be concluded that development of a «prestigious» economy and transport capabilities in different regions of Eurasia by the beginning of 2nd millennium BC led to the fact that «in the course of trade, not only goods were imported that were not produced in a given place or could not be produced in sufficient quantities ..., but also goods that ... made the satisfaction of increased effective demand more diverse and sophisticated» [22, P. 8].

Equally indicative are the same results of cessation of trade relations for different regions. The collapse of the ancient Sumerian system of long-distance trade due to internal problems in Southern Mesopotamia at the end of 4th millennium BC led to the demise of the Maykop culture, which had flourished in the North Caucasus due to the supply of metals to Mesopotamia in exchange for highly valuable handicrafts [4]. And at the beginning of 2nd millennium BC, the degradation of the highly developed Harappan civilization in the Indus Valley began, ending in its complete collapse. This was apparently caused by a combination of various factors, including ecosystem degradation and external invasions. There is reason to believe that one of the most important reasons was the sharp weakening of trade relations with Mesopotamia after the collapse of Sumer [23]. In any case, such an explanation fits into the paradigm of the implementation of the ««advancement effect»» based on trade and transport links (which was fully manifested for the Harappan civilisation in the middle of 3rd millennium BC due to the beginning of intensive trade with Southern Mesopotamia) and decline in the event of the cessation of such links [11].

How had the Eurasian world changed as a result of thousands of years of development, stimulated by

transport innovations and exchange, by the beginning of the period of the continent's most ancient integration? According to modern estimates, the population of Eurasia increased 30-fold from 2 to 60 million people between 10000 BC and 2000 BC [24]. In other words, a dramatic increase in population density was achieved, which was a key condition and result of successful socio-economic development [25; 26]. Although the average annual population growth rate was small, only 0,043 %, this is approximately twice as high as, for example, in 1st millennium AD [1]. In the era under consideration, population growth was the main result of economic growth (and, at the same time, an incentive for it). Almost all the increase in gross domestic product in the long term was absorbed by population growth, which was an essential feature of the prevailing so-called «Malthusian economy» [27].

However, in parallel with the increase in population density, there was also an increase in per capita consumption, called «Malthusian singularity» [28, P. 18]. If we assume that on average about 90 % of the increase in gross product was absorbed by population growth and only about 10 % became the source of growth in per capita consumption (i. e., the per capita gross product grew by at least 0,005 % per year – a negligible amount), over an eight-thousand-year period, per capita consumption should have increased by 1,5 times. Taking into account the formation and, by the end of the period under consideration, the strengthening of social inequality, such *per capita* growth created the opportunity for a radical increase in the well-being of the upper classes of society, which, on the one hand, was stimulated by development of transport and trade, and on the other, within the framework of the «prestigious economy», prompted the intensification of gift exchange, from which commodity exchange grew [25].

CONCLUSION

The analysis shows that development of both water and land means of transportation in ancient times played an important role in the integration of the Eurasian space and the economic progress of the peoples living there. This made it possible to implement the geographical advantages of Eurasia and ensure a higher population density and economic productivity of the territory compared to the world average.

Such results were achieved largely due to the synergy of a number of transport innovations and the development of various types of transport: river, sea and land transportation, which made it possible for regions with different geographical locations to join long-distance trade networks and ensure their effective specialisation within the framework of the interregional division of labour.

Already in ancient times, transport innovations increased the productivity of economic activity, allowing new resources to be involved in it and increasing labour productivity, a clear example of which is the development of an effective pastoral economy in the Eurasian steppes.



At the same time, a surplus product was created that could be used for exchange; there was a growing complexity of social organisation and the development of institutions, which also stimulated exchange. There was no longer a simple exchange of surplus products – production expanded with the aim of increasing exchange, becoming a commodity manufacture.

Thus, the first, but very important steps were taken on the long path of progressive development, which led to the era of modern economic growth and the formation of modern society, at all stages of which transport played a very important and ever-increasing role.

REFERENCES

- Maddison, A. *Contours of the World Economy, 1–2030 AD. Essays in Macro-Economic History*. Oxford, Oxford University Press, 2007, 432 p. ISBN 978-5-93255-350-3.
- Diamond, J. *Guns, Germs and Steel: The Fate of Human Societies*. N.Y., W. W. Norton, 1997, 480 p. ISBN 9780393038910.
- Acemoglu, D., Robinson, J. A. *Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty*. N.Y., Crown Publishers, 2012, 544 p.
- Anthony, D. W. *The Horse, the Wheel, and Language: How Bronze-Age Riders from the Eurasian Steppes Shaped the Modern World*. [Russian Transl. from English]. Moscow, Publ. house of the Higher School of Economics, 2023, 672 p. ISBN: 9785759825487.
- Polterovich, V. M. *Towards a General Theory of Socioeconomic Development. Part 1. Geography, Institutions or Culture? [K obshchei teorii sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya. Chast 1. Geografiya, instituty ili kultura?]. Voprosy ekonomiki*, 2018, Iss. 11, pp. 5–26. EDN: MGNKOT.
- Galahov, V. I. *Evolution of Means of Travel. Part 1. World of Transport and Transportation*, 2007, Iss. 4 (20), pp. 132–141. EDN: KLTQRL.
- Galahov, V. I. *Evolution of Means of Travel. Part 2. World of Transport and Transportation*, 2008, Iss. 1 (21), pp. 144–151. EDN: KDSYDB.
- Galahov, V. I. *Evolution of Means of Travel. Part 3. World of Transport and Transportation*, 2008, Iss. 2 (22), pp. 144–151. EDN: KDSYBN.
- Macheret, D. A. *Transport factor in the era of ancient civilizations. World of Transport and Transportation*, 2014, Iss. 2 (51), pp. 230–239. EDN: SFRIKL.
- Razuvaev, A. D. *The History of Development of Inland Transport Infrastructure: Technology and Economic Aspects. Part 1. World of Transport and Transportation*, 2021, Vol. 19, Iss. 6 (97), pp. 92–102. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-11.
- Macheret, D. A. *The Role of Transport in Formation of the «Advancement Effect» in Ancient and Medieval Societies. World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 4 (107), pp. 112–121. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-13.
- Zubov, A. A. *Columbus of the Stone Age. How our planet was populated [Koluby kamennogo veka. Kak zaselyalas nasha planeta]*. Moscow, AST-Press, 2012, 288 p. ISBN 978-5-462-01198-6.
- Markov, A. V. *Human evolution. In 2 books. Book 1: Monkeys, bones and genes [Evolyuitsiya cheloveka. V 2 kn. Kn. 1: Obez'yany, kosti i geny]*. Moscow, Astrel; CORPUS, 2012, 464 p. ISBN 978-5-17-078088-4.
- Ponting, C. *World History. A New Perspective*. London, Chatto & Windus, 2000, 944 p. ISBN 978-0701168346.
- Bernstein, W. *A Splendid Exchange: How Trade Shaped the World*. Atlantic Monthly Press, 2008, 494 p. ISBN 9780871139795.
- Mechnikov, L. I. *Civilisation and the Great Historical Rivers [Tsivilizatsiya i velikie istoricheskie reki]*. Moscow, Airis-press, 2013, 236 p. ISBN 978-5-8112-5112-4.
- Paine, L. *The Sea and Civilization. A Maritime History of the World*. N.Y., Vintage Books, 2015, 800 p. ISBN 978-1101970355.
- Atlas of World History [Russian Transl. from English by Afanasiev, S. D., Klimova, O. I., Pozdnyakova, N. A.]. Moscow, Astrel, AST, 2004, 480 p. ISBN 978-5-17-020573-8.
- Badak, A. N., Voynich, I. E., Volchek, N. M. [et al]. *World History: In 24 vols. Vol. 1. Stone Age*. Minsk, Literatura publ., 1997, 528 p. ISBN 985-6274-25-7.
- Semenov, Yu. I. *Origin and development of the economy: From primitive communism to societies with private property, classes and the state (ancient eastern, antique and feudal) [Proiskhozhdenie i razvitie ekonomiki: Ot pervobytnogo kommunizma k obshchestvam s chastnoi sobstvennostyu, klassami i gosudarstvom (drevnevostochnomu, antichnomu i feodalnomu)]*. Moscow, KRASAND publ., 2014, 720 p. ISBN 978-5-396-00584-6.
- Eurasian steppe metallurgical province [Evraziiskaya stepnaya metallurgicheskaya provintsiya]. *The Great Russian Encyclopaedia*, Vol. 7. Moscow, Scientific Publishing House «The Great Russian Encyclopaedia», 2007, pp. 514–516. EDN: MGZOAH.
- Macheret, D. A. *The Future of Transport in the Context of Mega-economic Changes. World of Transport and Transportation*, 2014, Iss. 6 (55), pp. 6–13. EDN: TCUSLJ.
- Vasiliev, L. S. *General history. In 6 volumes. Volume 1. The Ancient East and Antiquity [Vseobshchaya istoriya. V 6 t. T. 1. Drevniy Vostok i antichnost]*. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2007, 447 p. ISBN 978-5-98227-850-0.
- Sachs, D. *The Ages of Globalization: Geography, Technology, and Institutions*. N.Y., Columbia University Press, 2020, 280 p. ISBN 978-0231193740.
- Macheret, D. A. *Role of population density, mobility and the movement of material goods in different concepts of economic growth. Voprosy teoreticheskoi ekonomiki*, 2021, Iss. 4 (13), pp. 50–78. DOI: 10.52342/2587-7666VTE_2021_4_50_78.
- Galor, O. *The Journey of Humanity: The Origins of Wealth and Inequality*. N.Y., Dutton, Penguin Publishing Group, 2022, 304 p. ISBN 978-0593185995.
- Clark, G. A. *Farewell to Alms: A Brief Economic History of the World*. [Russian Trans. from English]. Moscow, Gaidar Institute Press, 2012, 544 p. ISBN 978-5-93255-338-1.
- The Cambridge History of Capitalism. Vol. 1. The Rise of Capitalism: from Ancient Origins to 1848*. [Russian Transl. from English]. Moscow, Gaidar Institute Press, 2021, 800 p. ISBN 978-5-93255-606-1.

Information about the author:

Macheret, Dmitry A., D.Sc. (Economics), Professor, Railway Research Institute of JSC Russian Railways (JSC VNIIZHT); First Deputy Chairman of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways; Professor of Russian University of Transport, Moscow, Russia, macheretda@rambler.ru.

Article received 31.01.2024, approved 20.02.2024, accepted 01.03.2024.



On the press review «Extent and duration of construction of indispensable railways» (publication of 1912 in the Rail Business [Zheleznodorozhnoe Delo] Journal)



Press archives

In 1912, the Rail Business journal published a material that was, in fact, a statement of the approaches that had developed at that time to the expediency and pace of further development of the railway network, including the uniformity of this pace, as well as, in modern terms, to the transport connectivity of the country's territory, the socio-economic effects of its growth, and sources of investment. Three points of view were presented: that of the chairman of the High Commission for the Study of the Railway Business; that of his opponent under the initials A. F. whose name remained unknown, but, who, apparently, had the authoritative opinion; and that of the editorial board of the journal itself.

Despite the radically changed economic conditions and technological structure, which have led to the loss of relevance of some of the issues discussed, some other fundamental points raised in the discussion in absentia on the pages of the journal being adapted to modern realities may be of some interest, including, possibly, in the aspect of the implementation of modern large infrastructure projects.

The reprinted, slightly abridged text preserves as much as possible authentic punctuation, vocabulary and abbreviations commonly applied at the time of initial publication.

Keywords: railways, transport connectivity, development of transport infrastructure, history of transport.

«Extent and duration of construction of indispensable railways». Under this title, Novoye Vremya in its №№ 12822 and 12823 published an article by N. P. Petrov, the Chairman of the High Commission for the Study of Railway Affairs in Russia, devoted to the topical issue of expanding the railway network.

«If, with too much haste in developing the network», says N. P. Petrov, «the population does not sufficiently increase their needs for railway services, and they, not receiving all the work they need, will not be able to pay all the interest on their construction capital, then the population will be forced to assume the payment of the entire missing amount of interest. Such a deficiency can amount, according to previous examples, to hundreds of millions of rubles. If, on the contrary, with too much caution in construction of rail

tracks, the construction will proceed slowly and the length of tracks per 10000 inhabitants will increase less than the increase with which the population, with benefit for itself, could deliver to the roads the work they need, it will suffer a major loss in its industrial productivity».

The author further calculates how much the work of railways, expressed in gross income, would have decreased if by 1925 the network length per 10000 inhabitants, for example, will have attain not 6, but only 5 versts. The loss of gross income, it turns out, would have reached 209 million rubles. «The cost of works that will not be transported, and therefore will not be produced, should, according to N. P. Petrov, be considered 7 or 8 times higher than the cost of transportation», i. e. approximately 1 ½ billion rubles.

Acknowledgements: the editors express their gratitude to the staff of the library of Russian University of Transport for their help in preparing the publication.

For citation: On the press review. «Extent and duration of construction of indispensable railways» (publication of 1912 in the Rail Business [Zheleznodorozhnoe Delo] Journal). World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 3 (112), pp. 263–268. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-15>.

The original text of the archival article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст архивной статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

It is impossible to agree with this thought, repeated twice in the article (what is not transported, is not created). For clarity, we present our objection using the following specific example. Due to improvement of transport, the Englishman finds it more profitable, instead of sowing grain in England, to eat bread collected in the Samara steppes. Here we do not have creation of a new product, but only relocation of production points. But reduction in price of a product also increases the demand for it, depending on which more advanced transport is a factor in creation of new products. *Thus, the railway creates a product not to the extent that it transports it, but because it makes it cheaper.* And consequently, of the quantity of products transported, additional due to development of the network, part falls on the newly created product, and part falls on the one created at new places of production *to replace the previous ones.* Which part exactly is it in both cases? – hardly anyone will be able to answer.

Moving on to determining the norm for the required construction, the author of the study bases it on construction of the nineties. During the period of 1892–1900 our construction proceeded at the most accelerated pace, namely: annually per 10000 inhabitants the network of European Russia increased by 0,14 versts, reaching 3,61 versts by 1900.

N. P. Petrov considers this growth rate of 0,14 versts necessary and safe to allow in the future. But development of railways with an annual increase in the norm of more than 0,14 versts may turn out, in the opinion of N. P. Petrov, to be a risky business, «unless some particularly favourable circumstances are discovered in the economic life of European Russia that justify the risk».

Based on the norm of 0,14, it turns out that to achieve the level of railway service for the population that Austria-Hungary now has (8,9 versts per 10 thousand inhabitants), European Russia will need 35 years, and during this period it would be necessary to build 143 thousand versts in the amount that cost 16 billion rubles. Investigating the relationship between the length of the network, its gross income and population growth¹, N. P. Petrov found an empirical formula for the period 1888–1902 according to which the residents' expenditure on railway services is determined as follows: [it is necessary to] multiply 1 rub. 64 k. per number of versts per 10000 inhabitants, and subtract 1 rub. 39 k. from the resulting product. Using this empirical formula, it is easy to determine the gross income of the future network and check its financial capacity.

We note that N. P. Petrov's formula can be paraphrased as follows: gross income per verst is $16.400 \text{ r.} - 13.900/l$, where l is the number of versts per 10.000 inhabitants.

¹ N. P. Petrov. Criterion for railways and its application. [Footnote in the original text].

Since now $l = 3,67$, then income per 1 verst should now be equal to $16.400 \text{ r.} - 13.900/3,67 = 12.858 \text{ rub.}$ With development of the network, this income should grow, reaching its limit of 16.400 r. per a verst. But, as every railway employee knows, even the norm of 12.858 rubles, generally speaking, is completely sufficient for the break-even existence of railways. Consequently, further development of network density per unit of population should promise great and rich favours... if the empirical formula is extrapolated beyond the time of observation.

The question, therefore, comes down to whether one can be sure that at the rate of network development that took place in 1892–1900 (0,14 versts per year per 10 thousand inhabitants), newly constructed lines will be paid for by the population according to the above (in the empirical formula) calculation? And if we can have this confidence, then shouldn't we, in addition, expect that such «particularly favourable circumstances» will be found in the economic life of the country that would justify the risk of network development above the norm of 0,14?

The first question must be answered very carefully. Although the development rate of 0,14 is taken from nature, we must not forget that it ended with the network falling into shortfall. This shortfall was due to both increased operating costs and a decrease in traffic density. The number of pood-versts per a verst, which increased continuously from 1890 to 1900, changed the law of growth after 1900: as if fatigue had set in the network, severe interruptions began. *This crisis had occurred two years earlier than the crisis in network growth, which began to slow down only in 1902*². As for another reason for the deficiency regarding growth in expenses, despite significant improvements in recent times in railway management, the rate of operation of the network of European Russia, due to the rise in prices of labour and materials, in 1910 turns out to be still less favourable than the average for five-year period 1895–1900 (0,62 versus 0,60). So, we cannot draw courage for the future from the *past*. Let's turn to the future directly and see if it promises us any particularly favourable hopes in economic terms. I would like to answer this in the affirmative.

Is it really possible to close our eyes to the fact that a tremendous shift has taken place in the fate of our fatherland, all the consequences of which are now impossible to take into account! Already in the early stages of the new order of things, a colossal reform of communal land ownership was carried out (law of November 9). There is no doubt that within a relatively short time there will be a complete mobilisation of land ownership. The so-called hunger standards will

² A fact clearly visible from the chart attached to the document submitted to the State Duma on February 8, 1911, regarding programs of railway and economic research. [Footnote in the original text].

be replaced by labour standards. Instead of possession that allows the use of some one-tenth of the owner's labour energy, there will be possessions that use this energy entirely. This process of concentration of land in the hands of «strong» workers will be accompanied by the release of a mass of workers who will require new applications. These essentially creative forces, under certain conditions, can turn into destructive forces. The instinct of self-preservation of the nation must direct the liberated energy to productive work. The increase in the well-being of agriculturists, as a consequence of concentration of previously fragmented plots of land, will cause a corresponding demand for items of the manufacturing industry and will require new labour force for it. Thus, the incentives for an enhanced and sustainable economic recovery of the country are undeniable. In connection with this circumstance, it is possible for the railway network to develop not only at the pace of the nineties, but even a very faster pace of construction does not seem implausible. However, it is not within our means to foresee an exact and definite number of versts, the construction of which will satisfy financial and economic interests in the best possible way. We are even inclined to admit that this financial and economic function is not an unambiguous function. The variety of interested factors is so enormous, and their interaction is so complex, that there is nothing impossible in the assumption that the complex of financial and economic interests will be equally well satisfied by both the decision, for example, on 3000 versts of annual construction, and on 4000 versts, and consequently, on all intermediate ones.

It seems to us that it is not so important to guess this figure exactly as it is important to establish the possible uniformity of construction over time. If, for example, in one construction period we build 3000 versts a year, in another – 4000 versts, and in the third again 3000 versts, then this would be a great evil. Changes in the norm are inevitable, but they should not be abrupt but should be smooth. The front of construction and plant production, deployed over 4000 versts, can then shrink to 3000 versts only at the cost of great economic upheaval. This upheaval is of the same order as the consequences of crop failures. But if we still do not know how to repel the adversity sent by the elements, then we have the right to demand from railway policy that it no longer periodically send disastrous droughts to our labour field.

A. F.

From the editors [of the Rail Business journal].

We are deeply grateful to the Chairman of the High Commission for the Study of Railway Affairs in Russia for raising his conclusions on the issue of the order of future development of the railway network for general discussion. The highly respected Nikolai Pavlovich, presenting his thoughts and conclusions, remained

invariably faithful to numerical combinations, although they led him to a rather sad conclusion for the state. We are also grateful to his opponent, Mr. A. F., who pointed out the possibility and validity of hopes for a better future in this matter and those dangerous decisions that could harm it. A state that wants to live and be powerful, as well as its neighbours, should know that it can be powerful at any time, or at least not in the very distant future.

We count ourselves among those publicists who – judging by the first paragraph of the article in question, although popular, but weighty – caused it.

We began discussing this very important issue about the future development of the railway network back in 1882, and we followed its growth without ceasing³. Therefore, we hope that His Excellency will kindly allow us to give some thoughts about the significant, in our opinion, omissions in his article, published in *Novoye Vremya* and interpreted here.

1. This article is based mainly on the size and activity of the population. But the state consists not only of the population, but also of the territory with all its riches, given to it by God and the labours of many previous generations. In the «Comparative Table» of 1882, this was expressed in average values per kilometre of railway length: of the number of inhabitants, as in the article under consideration, but in the opposite ratio, and the number of square kilometres of space, which is not in it. Meanwhile, this last ratio is precisely the value by which one can judge, in general, the difficulty of transporting local products to the railway and transporting goods arriving by rail to places of consumption – if we do not lose sight of the fact that the entire population has the right and wants to use the railways – and which can free the population from the accusation of inactivity provided for in the article, of non-compliance with the needs of the railway, while these qualities are easily explained by the special range of horse-drawn transportation.

2. The very concept of non-use of railways by the population, correct, so to speak, in a cash sense, is hardly so significant in relation to the state, if the population correctly understands the principle that railways are built and operated for them, and not they grow and develop for the railways. But this situation is undoubtedly correct. Otherwise, all the burdens of the actual occupation of the rich parts of the state, but remote from the centre, would lie on the settlers, and not on the state, perhaps even until the time when their numbers and activities in the new place of settlement would exactly correspond to the needs of the railways. No matter how great the contrast is between the size of the railway networks of the North American United States and ours, it is not so much the absolute size of their network that these states should serve as an example to us, but rather the consideration in railway

³ It is enough to point to №№ 5 and 6 of *Rail Business* of 1882 and № 2 of 1906 [Footnote in the original text].



construction that they showed in relation to their settlers. The settlers rewarded them for this with their entrepreneurship and labour. The consequences of the lack of such consideration are a completely inappropriate delay in occupying the mentioned parts of the state, leaving them unsettled economically and, in the end, forced consent to the occupation by their neighbours. Unfortunately, there are examples of this.

3. The article being discussed, devoted to the economic issue, divides Russia into two huge parts, mutually opposite in space and population: one has a larger population, the other has more space, i.e., European Russia with the Caucasus and all Asian possessions, with the exception of southern part of the Caucasus; but the division is only geographical, and its application in this case is hardly correct. It would seem that, for the sake of homogeneity in relation to the degree of supply by railways, Arkhangelsk province, part of Vologda province and the southern part of the Caucasus should be considered along with Siberia and Central Asia.

Finding Arkhangelsk and Vologda provinces and the southern part of the Caucasus in the same account or in the same group with other parts of European Russia, and not with other parts of the Asian possessions, with a separate calculation of the number of railways for these groups and with the dominance of the principle of the population in these calculations, can, obviously, lead the named provinces to a constant loss: their shares in distribution of funds for construction of railways, which they could receive according to the principle of space, will have to go to strengthening the railway network in other parts of European Russia, which is not at all desirable.

4. In the article being interpreted, the sequential construction of new railways in European Russia and Transcaucasia is calculated over five-year periods even until 1947. Such a detailed calculation for the Asian possessions is not given in the article but is explained only based on the principle of population, that by 1946 it is necessary to add 16.000 versts of railways to the existing 10.000 versts there, on the assumption that the population growth there will be close to its growth to Europe Russia. But apparently, this calculation does not consider the ongoing movement of population from European Russia to Asian Russia, which with the construction of new railways in the latter should even intensify. If we count this population movement, then it will be necessary to reduce the number of versts of new railways assigned to European Russia, and those assigned to Asian Russia with Arkhangelsk and Vologda provinces can be added, which, in the fair opinion of the author of the article, will only be to the benefit of the general affairs.

«Firstly, since the population moving beyond the Urals from European Russia will be located closer to the new railways and will therefore use them more. Secondly, because the Trans-Ural railways will

provide new, additional and therefore profitable freight transportation to the railways of European Russia».

These words of the highly respected author are very opportune for our goal of promoting the construction of railways from the centre to the outskirts of the state and within these outskirts to protect them from their neighbours and to develop the wealth available there. It was not for their neighbours that the previous generations of the Russian people worked and shed blood to acquire them. The author of the article has the same opinion:

«This last and, of course, most important need is what publicists most often discuss. They are not mistaken in this, placing it on the first place».

5. Thus, it is desirable to change the order of the sequential construction of railways set out in the article being interpreted somewhat, and if it is not possible to increase the allocations for this construction at all, then it is better to base the increase in allocations for the outskirts on the reduction of allocations for European Russia without Arkhangelsk and Vologda provinces and the southern parts of the Caucasus, rather than leaving the outskirts in their unprotected and unsettled state.

European Russia is so well provided with railways that it has already begun to move on to straightening lines, to constructing roads of the shortest direct route with a gain of several hours in time, and this can be considered a comparative luxury, when neither Yakutsk, nor Przhivalsk, nor even Murman is not yet connected to the centre of the state by rail and it is too early to talk about connecting Kamchatka with the centre of the state in this way, according to even the State Council⁴.

6. The article under review also does not give any space at all to the possibility of using, in order to reduce costs, other types of railways, except for the Russian normal one, developed by technology and suitable for the outskirts... Why not extend the type of 3¹/₂-foot gauge railway to Arkhangelsk province? Why not use, to the east of the future main line connecting Siberia with Turkestan, for example, a gauge of 3 or 2,5 feet, and in other, most difficult places, as in Yakutia region and Kamchatka, also a single-rail railway, whose vest in Alaska, according to newspaper reports, will cost 6.000 rubles (Rail Business, 1911, № 27)?

And in European Russia there are such deviations from the normal gauge.

Of course, many people object to transfers and transshipments, regardless of those who demand a normal gauge at all costs. But there may be cases when one must put up with the circumstances that cause such movements of passengers and cargo, and not only put up with them, but also prefer them...

Without a doubt, these questions deserve the attention of the High Commission for the Study of

⁴ See Rail Business, 1908, №№ 15–16, p. 68 d. [Footnote in the original text].

Railway Affairs in Russia and a detailed, but quick, study. The 8th Department of the Technical Society has already dealt with similar issues, even with participation of representatives of the military department, and could assist in this study.

So it seems to us, firstly, that the question of the indispensable railways, indicated in the title of the article being treated, is presented in it in a completely one-sided way, namely, about the roads necessary for the population only in accordance with its proven adaptability in the last decade; and the railways necessary to the state for the people's well-being in terms of the wealth of their regions, including for political and strategic purposes, are apparently left by the author of the article without the corresponding calculations, and, secondly, that the very recognition of the need for railways for the population is made dependent only on whether the population provides the income the railways need or does not, that is, depending on the circumstances, is a completely conditional value, at least for the first years of operation of the railways, both from the actual and speculative side.

The North Donetsk railway, which showed itself to be profitable from the very first day after the opening of traffic on it, is perhaps the only one; and statements by the highest representatives of the state in 1842 against the construction of St. Petersburg-Moscow, now Nikolaevskaya, railway and articles in the «Moskovskie Vedomosti» in 1879 against the construction of the Ekaterininskaya Railway, i.e. against the construction of railways that are now very profitable ones, have been even condemned by history. Relatively recently, condemnations of the construction of both the Siberian railway were heard, and the State Control classified it as unprofitable, attributing an increase in the income of European railways from transportation of Siberian goods to the merits of European railways, and not of Siberian one.

The proportion of construction of new railways derived from calculations of 0,14 versts per every 10.000 population annually, leaving the sparsely populated outskirts of the state for a long time without railways or with only a small number of them, cannot, it seems, under the influence of the third-party reasons explained by us, expect exact fulfilment or do without amendments, all the more necessary since the author of the article himself states:

«Whichever direction the construction of economically necessary railways deviates, whether towards surplus or towards shortage, the population is exposed to huge losses».

We hope that the losses are only calculated and, in case of excess, easily corrected.

The cursory examination carried out here of the method for determining the length and construction period of the railways necessary for Russia, set out by

the Chairman of the High Commission for the Study of Railway Affairs in Russia, obviously does not promise to this method a long period of application without changes. We regret very much that, probably, the size of the popular article did not allow its author to be critical of another method of determining resources for expanding the railway network, first recommended in our country by I. S. Bliokh [Ivan Stanislavovich Bliokh] in his special work (Rail Business, 1906, № 2, P. 18) and repeated in the Rail Business several times:

«According to the research of the engineers [Charles de] Freycinet, [Jules] Dupuit and [Léon] Leygue, the monetary savings delivered to the country by the railways are estimated at 2 to 4 times the gross income of the railways».

We believe that this formula is applicable to all nationalities and is broad enough to be able to protect the population of the state that uses it from actual losses for construction of railways. It shows both the benefit the population receives from railways and their ability to pay for new railway services. In the article reviewed, the considerations are based on gross income taken only once, i.e., only in the amount in which the population has already paid for railway services. It would seem that the amendment here is very simple – for the first step, it is enough to double the figure of 0,14 versts per 10.000 inhabitants proposed in the article and carefully check the feasibility of this in practice.

To this, however, an objection can be made approximately as follows:

«In 1910, the annual cost of maintaining Russian railways (operation and interest on capital) approached 1 billion rubles. Fortunately, the gross income is close to the same billion. But what would happen if, with an expenditure of a billion, the income would be only half a billion, and the deficit – also half a billion – according to Freycinet, Dupuit and Leygue – would have to be found in those indirect savings that the population receives from railways? Obviously, in addition to the existing indirect taxes (vodka, tobacco, kerosene, trade certificates, stamp duty, etc.), another half a billion would have to be collected! This is where the consideration would be justified: population is for the railways.

No matter how true the idea is that railways cause an increase in values greater than their income, but we must not forget that these added values are not for free. If, for example, we assume that now, due to railways that *directly* create a billion worth value, values are also created *indirectly*, also worth a billion, then this second billion, just like the first, is allocated according to the expense items of the corresponding enterprises: for labour, administration, materials, payment of capital, taxes, etc.

Thus, of this additional billion, only what was included by enterprises in the expenditure heading



«taxes» ends up in state resources, probably from 5 to 10 %. Only this share can be used to cover railway shortfalls.

However, even such use of tax resources will result in a slowdown in improvement of other parts of the state mechanism with all undesirable consequences for the overall progress of the nation. In a word, one cannot say: since this tax was received due to the railways, it must be spent on the railways. Taxes must, in a certain pattern, satisfy all state needs, regardless of considerations about the sources of the tax».

In this objection, regardless of the fact that the formula of Freycinet, Dupuit and Leygue indicates the third and even the fourth billions of people's savings, four points actually deserve special attention:

1) about a billion-dollar expenditure with an income of half a billion;

2) an indication of the need to levy a new tax as a justification for the situation that the population is for railways;

3) an indication of government resources that can be used to cover railway shortfalls, and

4) on slowdowns in improvements in other parts of the state mechanism.

The first point is obviously of a hyperbolic nature, since with the tendency of gross income to reach only half a billion, spending a billion on the railways is completely unacceptable, and at present it is impossible, due to the experience of the administrations. It will be prevented, and the deficit will be much smaller. The source for covering the possible shortfall is indicated in accordance with the 3rd of the points given here. The success of such deficiency payment depends on the wisdom of the administrators.

The second point in this case gives grounds to recognise the correctness of the stated position, and railways in this regard are no exception among all the needs of the state.

The third point, as already explained, is in accordance with the first point.

Finally, the fourth point, which seems to us the most serious, raises the question, what state needs should be given priority in satisfaction? We will not go into a detailed consideration of this issue and will limit ourselves to our opinion regarding the state's need for railways, that everyone and everything needs satisfactory routes of transportation and that, having such routes, the state can succeed much better in all other respects. By reducing travel time, such routes increase for those using them, as well as for the entire state, time and money to satisfy other vital and cultural needs. This is no longer an indirect, but a direct benefit delivered to the population by means of transportation, and paying it in one amount or another with taxes, in addition to fares and transportation, cannot be considered injustice in any respect.

We also believe that the formula of Freycinet, Dupuit and Leygue has not been refuted by the

considerations of our imaginary opponent; but, in addition to it, we also have, as if in reserve, a fair and interesting proposal by E. Yu. Stoll, published in Rail Business, 1907, № 42, under the title «Special taxes of the Ministry of Railways», unfortunately, attracted little attention four years ago. Perhaps it will deserve the attention of supporters of improvement in Russian railway economy now. We will not repeat this article here, but will only cite a postscript to it from the Editorial Board of Rail Business (P. 477):

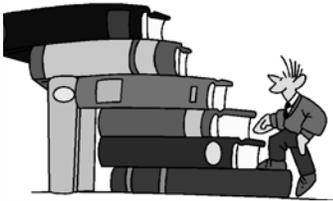
«It would be reasonable to assume that this article (by E. Yu. Stoll) was inspired by its venerable author by those cries of our press about shortages of railways that impede the construction of new railway lines and dictate to our financial department, as well as to the State Control, a constant reduction in allocations for maintenance of railways that are already in operation. The author pointed out a way by following which it would be possible to directly cover these deficits. This path, which has not yet occupied our ruling spheres, is indeed similar to the treasures revealed to Peter the Great by Prince Romodanovsky, preserved by him, and obtained by Tsar Alexei Mikhailovich. And if we add to it the accumulation of that wealth in the population of Russia, which was discussed in the article «On railway construction in Russia according to the lessons of history» (Rail Business, 1906, № 2) and to which it owes railways, then the treasures accumulated in our country, thanks to railways and navigated waterways, will undoubtedly, in many, many times exceed in size the treasures preserved by Prince Romodanovsky. But, of course, the path indicated by the author must be developed in detail by those who will manage it.

«Thus, in our opinion, there is no reason to bemoan the lack of funds in Russia for maintenance and expansion of railways or waterways and to deny the Ministry of Railways (as well as other departments) the allocations it needs, but it is only necessary for wise rulers – «profit-makers» to find the key to the indicated funds and, having removed the seal of oblivion or ignorance from them, establish the correct use of them and not be afraid of their use, since they are constantly increasing while the population lives and works».

In any case, the most successful solution to the question raised by the article of the highly respected Nikolai Pavlovich currently lies not behind treasures, not behind the population and not behind the technical press, but behind the «profit-makers» of the newest system of the Russian State. They should first of all abandon their financial *non possumus* and then turn to the keys to the country's treasures and give the latter to its population in the form of new railways, as well as in the form of a consistency that is necessary for everyone and ensures quick success.

Rail Business [«Zheleznodorozhnoe delo»],
1912, № 10–11, pp. 70–74 ●

T



SELECTED ABSTRACTS OF D.SC. AND PH.D. THESES

270

- *Determining the prospective need for track works in the short and medium term depending on the track operating conditions.*
- *Fretting wear of vibration-loaded flange joints*
- *Energy efficiency of autonomous locomotives: improving the methods of operational traction calculations.*
- *Manufacturing technology and material properties of composite sleepers intended for Chinese conditions.*



BIBLIO-DIRECTIONS



NEW BOOKS

272

New books on transport and transportation, recently printed or posted online by Russian publishing houses and universities.



The original text in Russian is published in the first part of the issue.

Текст на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-16>

Baronaite, R. A. Determining prospective need for track works in the short and medium term depending on the track operating conditions. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Opređenje perspektivnoj potrebnosti v provedenii putevykh работ na kratkosrochniy i srednesrochniy period v zavisimosti ot usloviy ekspluatatsii puti. Avtoref. dis...kand. tekh. nauk]. Moscow, JSC VNIIZhT, 2024, 24 p.

The increasing complexity of operating conditions caused by the increase in the number of heavy trains in circulation, the use of high-power locomotives, the growth of train traffic density and subsequent intensification of processes of cumulation of track deteriorations, leads to the need to adjust the existing track maintenance system.

According to existing approaches, work on prompt elimination of emerging deteriorations is carried out based on the results of processing information on the actual track condition after passage of track measuring cars, and planning of alignment work for the medium term is based on the deadlines for assigning work differentiated by criteria and track classes. Planning of repair intervals on several sections of particularly busy lines is carried out mainly in accordance with the train schedule and available resources.

The objective of the thesis research is to develop a scientifically based system for organising and planning alignment work on sections with high cargo traffic density, based on a multi-variant forecast of changes in indicators characterising the track condition, and to clarify the procedure for assigning the frequency of monitoring the main parameters of the track gauge geometry under various operating conditions on the network.

The experimental component of the research included the results of a network experiment to determine the intensity of the growth of the amplitudes of individual irregularities on the railway network using an array of data obtained from the results of the passage of track measuring cars over a two-year period.

The reliability of results of the scientific research is determined by the results of statistical processing of an array of data on the condition of the track on sections with different operational characteristics with a length of more than 5 thousand km over a two-year observation period.

The results of scientific research on improving the system for organising and planning alignment work on sections with high cargo density, based on a multi-variant forecast of changes in indicators characterising the condition of the track, are summarised.

The patterns of accumulation of general track deteriorations at various stages of the life cycle under conditions of especially heavy-duty lines and the intensity of growth of the amplitudes of individual irregularities under various operating conditions on the network are revealed.

The main provisions of the method of two-component statistical assessment of stability of a track section by

parameters simultaneously distributed along the length and in time (by tonnage) are presented.

The patterns of change in stability indicators of a track section by parameters distributed along the length and in time (passed tonnage) are established based on the developed method.

The influence of operating conditions and the system of organising technical maintenance on occurrence and development of general track deteriorations is proven.

Additional criteria for determining the need for prompt work are obtained and proposed based on the provisions of the theory of emissions within random processes considering the rate of increase in the amplitudes of individual irregularities.

A methodology for multi-variant forecasting of the track condition for the medium term is created depending on the scheme of organising technical maintenance on a specific section and at specific stage of the track life cycle.

Provisions on the need to forecast the condition of the track when determining the need for track maintenance work and proposals to clarify the criteria for assigning preventive track alignment on particularly busy lines have been introduced into the regulatory documentation.

The prospects for further development of the research topic are linked to determining options for using scheduled preventive alignment in the general system of track maintenance to extend the periods between repairs under various operating conditions.

2.9.2. – Railway track, survey and design of railways (technical sciences).

The work was performed at JSC Railway Research Institute of JSC Russian Railways (JSC «VNIIZhT»), defended at Russian University of Transport.

Dubinova, O. B. Fretting wear of vibration-loaded flange joints. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Fretting-iznashivaniie vibronagruzhennykh flantsevykh soedinenii. Avtoref. dis...kand.tekh.nauk]. Moscow, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 2024, 24 p.

A significant part of the equipment and structures of the gas transportation industry is operated using flange joints. Flange joints are widely used in complex gas treatment units, in the main transport system, at compressor stations (CS) and gas distribution stations (GDS). The increase in the volumes and speed of gas transportation in the last decade leads to an increase in the number of failures due to depressurisation of flange joints. According to statistics, the main reason for the loss of tightness in 40 % of cases is a high level of low-frequency vibration that occurs during transportation of the gas flow.

Increasing the reliability and safe operation of flange joints at gas complex facilities requires expanding the range of calculation methods that allow considering the negative impact of vibration on their individual elements and the entire joint. Thus, research aimed at increasing the service life of flange joints of pipeline manifold and gas transportation system equipment subject to fretting wear under vibration conditions are relevant and promising.

2.5.3. – Friction and wear in machines.

The work was carried out at National University of Oil and Gas «Gubkin University» and defended at Rostov State Transport University.

Kurilkin, D. N. Increasing the energy efficiency of autonomous locomotives by improving the methods of operational traction calculations. Abstract of D.Sc (Eng) thesis [Povysheni energoeffektivnosti avtonomnykh lokomotivov za schet sovershenstvovaniya

metoov operativnykh tyagovykh raschetov. Avtoref. dis...dokt.tekhn.nauk]. St.Petersburg, PGUPS publ., 2024, 32 p.

The main problem solved in the thesis research was to increase the energy efficiency of autonomous locomotives by improving the methods of operational traction calculations based on the analysis of the current state of the power plant according to the data of on-board microprocessor control and diagnostic systems.

The objective of the study was to reduce fuel consumption for train traction and increase the accuracy of traction calculations by considering the actual state of the power plant of an autonomous locomotive when determining energy-optimal modes of train operation along a section.

As a result of the study of the current state of the issue of energy-optimal control of train traffic, it was found that, despite availability of information on the actual technical condition of the power plant of modern locomotives, this information is practically not used when performing variant and optimisation traction calculations, which reduces the accuracy of calculations and, as a consequence, the efficiency of rationing energy consumption for train traction and planning transportation work.

It has been established that the data recorded by microprocessor control and diagnostic systems of modern locomotives makes it possible to determine the components of the energy balance of the locomotive power circuit in various modes of its operation and to calculate the current traction characteristic corresponding to the current technical condition of the locomotive power plant.

A method has been developed and tested for determining the power consumption for the most significant auxiliary loads of the locomotive energy circuit, namely:

- for excitation of traction and auxiliary generators of diesel locomotives with various excitation unit circuits (2TE116U and TEP70BS);
- for driving electric and hydrostatic motor-fans of the diesel cooling device according to MSU-T (P, E, A) data;
- for driving the brake compressor;
- for recharging the battery.

A method for determining power losses in the elements of a diesel locomotive power circuit has been developed and tested, circuit including traction generator, switcher, traction electric motor, traction gearbox, wheelset.

A method for determining the actual circuit resistance and load characteristics of the traction electric motor based on MSU-T(P, E, A) data has been developed and tested.

Algorithms and software for calculating the actual traction characteristics of a locomotive have been developed; the actual traction characteristics of 2TE116U diesel locomotive have been calculated. When testing the software, it was shown that using the actual traction characteristics of locomotives allows for a more than twofold reduction in the error in determining the speed curve and the running time per haul.

A method for accounting for transient processes in the locomotive power plant caused by a change in the position of the driver's controller has been developed during traction calculations. It has been established that transient processes do not affect fuel consumption while simultaneously reducing the average power and operation of the diesel generator set.

A method for multidimensional search for an energy-optimal train trajectory has been developed and tested, considering the actual characteristics of the train, predicted climatic conditions, and the actual state of the locomotive's energy circuit. It has been established that implementation of the energy-optimal trajectory of train movement, found using the proposed method, allows to reduce fuel consumption by 5–7 % compared to the control modes used by drivers in ordinary operation.

A method for determining the modes of stopping and adjusting braking and a technique for calculating the braking forces of a train during pneumatic and electropneumatic braking, considering the inertia of the brake circuit, have been developed and tested. An empirical dependence for determining the friction coefficient of the brake linings of disc brakes of a high-speed train has been proposed and substantiated.

The scientific and practical novelty of the proposed technical and software solutions is confirmed by patent for invention No. 2015108825/11, certificates of state registration of computer programs No. 2022616927, 2019663752, 2019666370, 2018613898.

2.9.3 – Rolling stock of railways, train traction and electrification.

The work was performed and defended at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

C. Wang. Manufacturing technology and material properties of composite sleepers (for Chinese conditions). Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Tehnologiya izgotovleniya i svoitva materiala kompozitsionnykh shpal (dlya uslovii Kitaya). Avtoref. dis...kand.tekhn.nauk]. Moscow, RUT publ., 2024, 24 p.

The objective of the thesis research was to develop a manufacturing technology and determine the physical and technical properties of the material of composite sleepers intended for use in China.

The scientific novelty and the most significant results of the studies include establishing:

- the optimal content of nanoparticles (≈ 1 % by weight) in polyvinyl chloride, due to occurrence of two competing processes associated with ordering (due to the formation of crystallites) and loosening of the polymer structure;
- the influence of intrinsic stresses within the polymer composite on the nature of destruction and its behaviour under load with formation of block structures during destruction;
- the properties of the material of the composite sleeper, considering their operation in the system «roadbed – ballast prism – sleeper – rail – rolling stock»;
- a multi-level approach (from the atomic-molecular to the macro level which is sleeper design) to control of the most important properties of the composite sleeper material: the modulus of elasticity and the value of the linear thermal expansion coefficient.

Analysis of the work of domestic and foreign scientists has shown the prospects for introduction of composite (composite, polymer, plastic) sleepers in railway transport due to the use of various large-tonnage household waste, by-products of industry and agriculture for their production, and thanks to availability in a number of countries, in particular, in China, of a local raw material base in the form of fast-growing bamboo; at the same time, the use of composite under-rail bases helps to solve a number of environmental problems.

It has been established that one of the main obstacles to the widespread use of composite sleepers for railways is the high rate of linear thermal expansion of the polymer matrix.

Multi-level modification of polyvinyl chloride, the matrix polymer of the composite sleeper, was carried out at five structural levels: atomic-molecular (with polymers), nano- (with carbon nanotubes), micro- (with fine chalk and wood flour), meso- (with bamboo fibre) and macro-level (with bamboo rods), as a result of which the value of the rate of linear thermal expansion $\alpha \leq 25,3 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$, was achieved, which enables the possibility of their use in most provinces of China.



The most important physical and technical properties of the developed material of composite sleepers of optimal composition, determining their long-term operation in the railway track, have better indicators than the material of the industrially developed composition: the value of the rate of linear thermal expansion is 1,6 times lower, and water absorption is 7,8 times lower; in this case, to establish the latter dependence, a new method for determining ultra-low water absorption for high-density materials was used, based on establishing a change in the volume of a sample upon its contact with water using electron-correlation speckle interferometry.

Contactless measurement of the deformation field by laser interferometry made it possible to establish the block nature of the destruction of samples of the material of composite sleepers under load, and using laser interferometry according to the developed method for assessing natural stresses, to show that the plastic nature of destruction of samples of optimal composition is due to a decrease in the level of natural stresses in it; Russian Federation patents No. 2672192 and No. 2710953 were received for devices

for determining sample deformations during loading using a contactless laser interferometry method.

Technological schemes have been developed for extrusion (Russian Federation patent No. 2738498) and injection (Russian Federation patent No. 2737711) manufacturing of not only composite sleepers for various types of railway tracks, but also of bridge and switch beams, and of developed (Russian Federation patent No. 2707435 and People's Republic of China patent No. 20862218.6) innovative design of a composite sleeper reinforced with bamboo rods with adjustable load-bearing capacity and a reduced (up to 11 % of the maximum permissible) value of the rate of linear thermal expansion. The life cycle assessment of the composite sleeper confirms the competitiveness of the proposed composite sleeper design relative to wooden sleepers in terms of environmental sustainability.

2.1.5. Construction materials and products.

The work was performed and defended at Russian University of Transport. ●

NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

The list of original titles in Russian is published in the first part of the issue

Список на русском языке публикуется в первой части данного выпуска

DOI: <https://doi.org.10.30932/1932-3252-2024-22-3-17>

Artyakov, V. V., Chursin, A. A., Ostrovskaya, A. A. Innovation Management. Methodological Tools: Textbook [Upravlenie innovatsiyami. Metodologicheskii instrumentariy: Ucheb. posobie]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 295 p. ISBN 978-5-16-019241-3 (print).

Belyakov, V. V., Vakhidov, U. Sh., Kolotilin, V. E. Engines of Special Transport and Technological Machines: Study guide [Dvizhiteli spetsialnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin: Ucheb. posobie]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 2024, 259 p. ISBN 978-5-502-01785-5.

Bugakova, N. Yu., Gruntov, A. V., Zorchenko, N. K., Pelmenev, V. K. Didactic model of continuous professional and legal training of cadets in the educational process at a maritime university: Monograph [Didakticheskaya model nepreryvnoi professionalno-pravovoi podgotovki kursantov v obrazovatelnom protsesse morskogo vuza: Monografiya]. Kaliningrad, Publishing house of BGARF, 2024, 109 p. ISBN 978-5-7481-0552-1.

Chursin, A. A., Abueva, M. M.-S. Innovation Management: Textbook [Upravlenie innovatsiyami: Ucheb. posobie]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 330 p. ISBN 978-5-16-017566-9 (print).

Degtyarev, V. S. English-Russian marine dictionary [Anglo-russkii morskoi slovar]. Moscow, U Nikitskikh vorot publ., 2024, 1196 p. ISBN 978-5-00246-010-6.

Dorokhin, E. G. Fundamentals of Operation of Relay Protection and Automation: Study guide [Osnovy ekspluatatsii releinoi zashchity i avtomatiki: Ucheb. posobie]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 409 p. ISBN 978-5-16-019509-4.

Edimichev, D. A., Minkin, A. N., Klochkov, S. V. [et al.] Fire Safety of Electrical Installations: Study guide

[Pozharnaya bezopasnost' elektroustanovok: Ucheb. posobie]. Moscow, INFRA-M publ.; Krasnoyarsk, SFU publ., 2024, 195 p. ISBN 978-5-16-019590-2.

Ergashev, U. E., Suslov, O. A., Begmatov, N. I. Features of laying welded rails of a continuous track using hinged type technological equipment: Monograph [Osobennosti ukladki svarnykh relsovykh pletei besstykovogo puti s primeneniem tekhnologicheskoi osnastki navesnogo tipa: Monografiya]. Ufa, Aeterna publ., 2024, 131 p. ISBN 978-5-00177-958-2.

Grechanik, A. V., Zamukhovskiy, A. V., Semenov, E. V. Design and calculation of the track gauge: Study-method. guide [Proektirovanie i raschet relsovoi kolei: Uchebno-metod. posobie]. Moscow, Pero publ., 2024, 58 p. ISBN 978-5-00244-215-7.

Grodsky, V. S. Three aspects of reconstruction of the economy: Monograph [Tri aspekta rekonstruktsii ekonomiki: Monografiya]. Moscow, RIOR: INFRA-M publ., 2024, 314 p. ISBN 978-5-369-01943-6.

Ivanov-Tolmachev, I. A., Sidrakov, A. A., Seredov, E. A., Kolmykov, V. S. Features of development of railway junctions: Study guide [Osobennosti razvitiya zheleznodorozhnykh uzlov: Ucheb. posobie]. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2024, 134 p. ISBN 978-5-6051508-5-5.

Kazakova, N. A., Permitina, L. V. ESG-concept of production accounting and management of industrial organisation development sustainability: Monograph [ESG-kontseptsiya proizvodstvennogo ucheta i upravlenie ustoichivostyu razvitiya promyshlennoi organizatsii: Monografiya]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 250 p. ISBN 978-5-16-018717-4.

Korostovenko, V. V., Medved, N. V., Galayko, A. V. Organisation of industrial and production safety: Study guide [Organizatsiya proizvodstvennoi i promyshlennoi bezopasnosti: Ucheb. posobie]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk: SFU, 2024, 195 p. ISBN 978-5-16-019584-1.

Skubriy, E. V., Melnichuk, I. I., Zheltenkov, A. V., Pleshkov, M. L. Innovative mechanism for the development of industrial organisation management: Monograph [Innovatsionnyi mekhanizm razvitiya upravleniya promyshlennoi organizatsiei: Monografiya]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 166 p. ISBN 978-5-16-019044-0.

Vorobyov, S. A. Operation of transport and technological machines and complexes: Study guide [Ekspluatatsiya transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov: Ucheb. posobie]. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2024, 193 p. ISBN 978-5-907804-25-8.

Compiled by Natalia Oleynik ●



INTELLIGENT SYSTEMS FOR CITIES

The introduction and development of intelligent transport systems continues in the Russian regions within the framework of the «Safe High-Quality Roads» national project. Today, these measures are being implemented in 56 regions of the country and 62 urban agglomerations within them.

«The number of urban agglomerations participating in the implementation of the program for the introduction of intelligent transport systems is growing. If last year there were 57 of them in 51 regions of the country, then this year there are already 62 in 56 regions. In addition, 18 urban agglomerations have reached the first of the six ITS maturity levels, of which Krasnoyarsk and Tyumen have reached the second,» said Minister of Transport Roman Starovoit.

He also recalled that «smart» systems have been introduced in urban agglomerations with a population of over 300 thousand people since 2020. «The creation of an intelligent transport system will optimise the movement of public transport, which will increase the average speed of cars, increase the capacity of city roads, and reduce the number of congestions. And, of course,

the safety of all road users will grow. This year, for the first time, within the framework of the national project, ITS began to be introduced in the Republic of North Ossetia-Alania, Primorsky Krai, Smolensk and Kurgan regions, as well as in Sevastopol,» said the head of the Ministry of Transport.

The program for the introduction of «smart» systems is being implemented within the framework of the «System-wide measures for the development of the road sector» federal project, which is part of the national project. Funds from the federal budget are provided for these purposes.

The introduction of various modules and subsystems helps to collect, deliver, store, analyse and visualise information received from photo and video recording systems, vehicle detectors installed in the street-and-road network. Based on this data, the system will offer solutions to optimise traffic management.

Compiled based on the news released by press service of the Ministry of transport of the Russian Federation: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11364>





**World of Transport
and Transportation**

Vol. 22, Iss. 3, 2024

Editor-in-Chief

Igor N. Rozenberg

For your letters:

Russian University of Transport,
World of Transport and
Transportation Journal,
9, str. 9, Obraztsova ul.,
Moscow, 127994, Russia.
e-mail: mirtr@mail.ru

Почтовый адрес редакции:

127994, Москва,

ул. Образцова, д. 9, стр. 9.

Российский университет
транспорта,

Издательство «Транспорт РУТ»

Тел.: + 7(495)2740274 доб. 3004

e-mail: mirtr@mail.ru



ISSN 1992-3252



9 771992 325778 >