

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРАВОВОГО СТАТУСА  
И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ИНФРАСТРУКТУР**

**О РОЛИ СИСТЕМНЫХ ИНТЕГРАТОРОВ  
В ТРАНСПОРТНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ**

**ВЕРоятНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ  
ГРУЗОТРАНСПОРТНЫХ ПЕРЕВОЗЧИКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОГРАММ ЛОЯЛЬНОСТИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО  
КОРИДОРА «СЕВЕР — ЮГ» ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ РОССИЙСКИХ ГРУЗОВ**



**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ  
АКТИВНОГО ПРИОРИТЕТА АВТОБУСАМ  
ПРИ ПРОЕЗДЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ**



### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Галкин Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
2. Буйносов Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
3. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия
4. Симармата Джулиатер, доктор менеджмента, Институт транспорта и логистики Трисакти, Джакарта, Индонезия
5. Цяо Цун, канд. техн. наук, Чжэнчжоуский железнодорожный профессиональный технический институт, Чжэнчжоу, Китай

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Бородин Андрей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Москва
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Гриценко Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, Челябинск
5. Куренков Петр Владимирович, д-р экон. наук, профессор, Москва
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва
10. Неволин Дмитрий Германович, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
11. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
12. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
13. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
16. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
17. Якунин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Оренбург

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Galkin Alexander Gennadyevich, DSc, professor, editor-in-chief, USURT, Ekaterinburg, Russia
2. Buynosov Alexander Petrovich, DSc, professor, USURT, Ekaterinburg, Russia
3. Kozlov Petr Alexeevich, DSc, professor, Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia
4. Simarmata Juliater, DSc, Trisakti Institute of Transportation and Logistics, Jakarta, Indonesia
5. Qiao Cong, PhD, Zhengzhou Railway Vocational and Technical Institute, Zhengzhou, China

### EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Borodin Andrey Fedorovich, DSc, professor, Moscow
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsenko Alexander Vladimirovich, DSc, associate professor, Chelyabinsk
5. Kurenkov Petr Vladimirovich, DSc, professor, Moscow
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
9. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
10. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Rumyantsev Sergey Alexeevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
17. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

*В. М. Корякин, С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, П. А. Красильников.*  
**Актуальные вопросы правового статуса и функциональных особенностей железнодорожных инфраструктур ..... 3**

*П. А. Козлов, И. С. Абдуллаев, Н. А. Тушин, Н. В. Якушев.*  
**О роли системных интеграторов в транспортном обеспечении экономических связей ..... 12**

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

*Н. Ф. Сирина, В. Б. Свердлов.*  
**Модель формирования внутрифирменных реляционных отношений ОАО «РЖД» в области обеспечения сохранности вагонного парка ..... 17**

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

*П. А. Козлов, И. С. Абдуллаев, О. В. Осокин, Н. В. Якушев.*  
**О транспортных потоках, каналах и очередях ..... 25**

*В. Ю. Пермикин, А. Э. Александров, И. А. Ковалев, А. В. Сурин, В. В. Лесных.*  
**Модель оптимального поездообразования на сортировочной станции с учетом обеспечения локомотивными бригадами ..... 27**

*Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин.*  
**Вероятностное моделирование поведения грузоотправителей при оценке программ лояльности на железнодорожном транспорте ..... 34**

*А. В. Мартыненко, Е. Г. Филиппова.*  
**Моделирование влияния городского кольцевого железнодорожного маршрута на транспортную доступность в зависимости от характеристик улично-дорожной сети ..... 41**

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**

*С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. П. Буйносов.*  
**Аппроксимация кривой износа профиля обода железнодорожного колеса, примыкающего к гребню ..... 47**

**ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

*О. Н. Ларин, Ц. Моононхуу.*  
**Перспективы использования международного транспортного коридора «Север — Юг» для перевозки российских грузов ..... 54**

*Н. Е. Окулов, Е. Н. Тимухина, А. А. Кошчев, Н. В. Кашеева.*  
**Влияние случайных факторов на внутренние транспортные процессы промышленных предприятий ..... 62**

*Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова, Д. А. Краснобаев.*  
**Совершенствование работы транспортно-логистической инфраструктуры с использованием средств дискретно-событийного имитационного моделирования ..... 67**

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

*А. В. Гриценко, К. В. Глемба, А. С. Меньшенин, С. А. Чоккой.*  
**Исследование экологичности бензинового автомобиля путем анализа состава отработавших газов перед антиоксидантной системой ..... 72**

*А. С. Гусельников, Н. С. Захаров.*  
**Исследование влияния условий эксплуатации на надежность элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320 ..... 83**

*Д. А. Захаров, А. В. Писцов.*  
**Анализ эффективности способов активного приоритета автобусам при проезде регулируемых перекрестков ..... 90**

**ELECTRIC SUPPLY**

*И. А. Юшкова.*  
**Оценка энергетических потерь системы электроснабжения при уменьшении межпоездного интервала ..... 96**

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

*V. M. Koryakin, S. P. Vakulenko, D. Yu. Romenskiy, K. A. Kalinin, P. A. Krasil'nikov.*  
**Topical issues of the legal status and functional peculiarities of railway infrastructures ..... 3**

*P. A. Kozlov, I. S. Abdullaev, N. A. Tushin, N. V. Yakushev.*  
**About the role of system integrators in transport economic ties guarantee ..... 12**

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

*N. F. Sirina, V. B. Sverdlov.*  
**The model of the formation of intra-corporate relational interactions of JSC «RZD» in the sphere of the car fleet preservation ..... 17**

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

*P. A. Kozlov, I. S. Abdullaev, O. V. Osokin, N. V. Yakushev.*  
**About transport flows, canals, lines ..... 25**

*V. Yu. Permikin, A. E. Alexandrov, I. A. Kovalev, A. V. Surin, V. V. Lesnykh.*  
**Optimal train formation model at a marshalling station taking into account the provision of locomotive crews ..... 27**

*G. A. Timofeeva, A. D. Khazimullin.*  
**Probabilistic modeling of shipper behavior when assessing loyalty programs on railway transport ..... 34**

*A. V. Martynenko, E. G. Filippova.*  
**Modelling of the influence of the urban circle railway route on the transport accessibility depending on the characteristics of the street and road network ..... 41**

**ROLLING STOCK AND TRACTION**

*S. V. Krotov, D. P. Kononov, A. P. Buynosov.*  
**Approximation of the wear curve of the rim profile of a railway wheel adjoined to the ridge ..... 47**

**TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES**

*O. N. Larin, Ts. Moononhuu.*  
**Prospects for using the North-South International Transport Corridor for the transportation of Russian goods ..... 54**

*N. E. Okulov, E. N. Timukhina, A. A. Koshcheev, N. V. Kashheeva.*  
**The influence of random factors on internal transport processes of industrial enterprises ..... 62**

*D. V. Kuzmin, V. V. Baginova, D. A. Krasnobaev.*  
**Improving the operation of transport and logistics infrastructure using discrete-event simulation modeling tools ..... 67**

**MOTOR TRANSPORT**

*A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, A. S. Menshenin, S. A. Chokoy.*  
**Study of the environmental friendliness of a gasoline car by analyzing the composition of exhaust gases before the anti-toxic system ..... 72**

*A. S. Guselnikov, N. S. Zakharov.*  
**The research of the influence of the exploitation conditions on the safety of the parts of the fuel system parts of Ural-4320 vehicle ..... 83**

*D. A. Zakharov, A. V. Pistsov.*  
**Analysis of the effectiveness of active priority methods for buses when passing through controlled intersections ..... 90**

**ELECTRIC SUPPLY**

*I. A. Yushkova.*  
**Assessment of energy losses in power supply system at decrease of train-to-train interval ..... 96**

УДК 656.21

**Виктор Михайлович Корякин**, доктор юридических наук, профессор кафедры «Теория права, гражданское право и гражданский кодекс» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,  
**Сергей Петрович Вакуленко**, кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,  
**Дмитрий Юрьевич Роменский**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,  
**Кирилл Антонович Калинин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,  
**Павел Андреевич Красильников**, ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРАВОВОГО СТАТУСА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ИНФРАСТРУКТУР

**Viktor Mikhaylovich Koryakin**, DSc in Law, Professor, Theory of Law, Civil Law and Civil Code Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

**Sergey Petrovich Vakulenko**, PhD in Engineering, Professor, Head of Institute of Management and Digital Technologies, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

**Dmitriy Yuryevich Romenskiy**, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

**Kirill Antonovich Kalinin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

**Pavel Andreevich Krasil'nikov**, Assistant Lecturer, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

### Topical issues of the legal status and functional peculiarities of railway infrastructures

#### Аннотация

Теория и практика работы железнодорожного транспорта в Российской Федерации предполагает наличие двух видов железнодорожных инфраструктур, разделение на которые закреплено законодательно: инфраструктура общего пользования и инфраструктура необщего пользования. Результаты анализа, представленные в данной статье, показали, что по итогам начатой в 2003 г. реформы железнодорожного транспорта сохраняется ситуация, при которой наличествует недостаточная ясность с использованием функциональных признаков железнодорожных инфраструктур. В статье разработаны предложения по совершенствованию транспортного законодательства и даны рекомендации по сквозному применению терминологии в железнодорожной отрасли.

**Ключевые слова:** транспортное право, железнодорожный транспорт, промышленный транспорт, магистральный транспорт, грузовые перевозки, пассажирские перевозки, железнодорожная станция, пути общего пользования, пути необщего пользования

#### Abstract

Theory and practice of railway transport operation in Russian Federation suggests the presence of two kinds of railway infrastructures the division of which is stated legally: infrastructure of general use and infrastructure of non-general use. The analyses results, suggested in the article, showed that on the results of the started in 2003 reform of railway transport there is the condition kept with the presence of unclearness with the use of functional features of railway infrastructures. The article gives the developed suggestions on the modernization of the transport law and also recommendations on the end-to-end terminology use in the railway sector are given.

**Keywords:** transport law, railway transport, industrial transport, mainline transport, freight transportations, passenger transportations, railway station, lines of general use, lines of non-general use

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-3-11

## ПУТИ ОБЩЕГО И НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**В** результате эволюционного развития железнодорожного транспорта и обслуживаемых им отраслей экономики в России, как и в большинстве стран с активно работающим железнодорожным транспортом, сформировалось функциональное разделение железнодорожных компаний (инфраструктур) на магистральный и промышленный железнодорожный транспорт [1]. Такое функциональное деление выражается в характере владения инфраструктурой, режимах движения поездов, правовом статусе и других факторах. Таким образом, внутрипроизводственный, ведомственный или промышленный железнодорожный транспорт [2] обеспечивает в основном технологические нужды производства (перевозка грузов в пределах предприятия, доставка сырья, топлива, материалов с магистральной железной дороги и вывоз готовой продукции и порожних вагонов в обратном направлении), а внешний, или магистральный, обеспечивает экономические связи между производителями и потребителями продукции, а также пассажирские перевозки.

В специальной литературе (в том числе в ГОСТ 34530–2019 [3]) встречается термин «железнодорожная магистраль» или его синонимы «магистральный железнодорожный путь» и «железнодорожная линия». Исходя из этого под железнодорожной магистралью следует понимать железнодорожную линию (технологический комплекс), обеспечивающую основные общегосударственные транспортные связи внутри страны или с зарубежными странами. Как отмечается в энциклопедической литературе, по сравнению с линиями местного значения магистральные железные дороги имеют более высокую категорию при строительстве и эксплуатации, т.е. они сооружаются с более пологими уклонами и кривыми, имеют большую ширину земляного полотна, более мощное верхнее строение пути и другие технические улучшения, рассчитанные на более высокую пропускную способность. В актуальной Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. был введен такой термин, как «Единая опорная сеть», объединивший в себе важнейшие объекты транспортной инфраструктуры. По своей сути Единая опорная сеть — это перечень важнейших для страны железнодорожных линий и железнодорожных направлений, что пересекается с определением железнодорожной магистрали и делает эти два понятия тождественными.

Железнодорожным магистралям в СССР и в России всегда отводилось и отводится большое социально-экономическое, оборонное и транспортное значение. Магистральные железные дороги прокладывались на стратегически важных территориях, их работоспособность охраняется государством в виде административной и уголовной ответственности за нарушение их жизнедеятельности, а также в виде особого правового режима по открытию и закрытию железнодорожных линий.

Железнодорожные хозяйства, находящиеся в собственности промышленных предприятий и функционально относимые к промышленному транспорту, выполняя главным образом задачи по обеспечению производственных процессов в промышленных комплексах [4, 5]. Это могут быть внутрипроизвод-

ственные перемещения сырья и готовой продукции между производственными участками, а также взаимодействие с сетью магистральных железных дорог через станции примыкания. Некоторые промышленные железные дороги существуют в полностью автономном режиме без взаимодействия с магистральной сетью, вплоть до отсутствия примыкания к магистральной сети. Причем такие комплексы могут иметь существенные технико-технологические отличия от магистральных железных дорог колеи 1520 мм по габаритам подвижного состава, осевой нагрузке, допускам на качество железнодорожного пути и т.д. Пассажирские перевозки на таких инфраструктурах, как правило, не выполняются, а если организованы, то только в интересах обслуживаемых предприятий в крайне ограниченном виде.

Исходя из данного функционального разделения в научной литературе и на практике появился другой важный функциональный термин, закрепляющий подобное разделение железнодорожных хозяйств, а именно термин «подъездной путь», имевший свое отражение в Уставе железных дорог Российской Федерации, действовавшем до 2003 г. Как правило, на практике под термином «подъездной путь» понимают небольшое хозяйство железнодорожного транспорта, принадлежащее промышленному предприятию, главной задачей которого является погрузка и выгрузка грузов в вагоны, подаваемые со станции примыкания и обратно на нее. Под промышленным транспортом чаще подразумевают более крупные железнодорожные хозяйства (подъездные пути) с собственным парком маневровых локомотивов, деповским хозяйством и службой содержания пути. Но самым важным отличием хозяйств железнодорожного промышленного транспорта от обычных «подъездных путей» является, помимо функций погрузки-выгрузки внешних грузов, наличие внутрипроизводственных логистических задач, решаемых силами железнодорожного транспорта без взаимодействия с магистральной сетью железных дорог.

Существовавшее до 2003 г. Министерство путей сообщения Российской Федерации (МПС РФ) было единым комплексом железнодорожного транспорта в стране, правопреемником МПС СССР на территории Российской Федерации, соответственно и транспортное право подразумевало существование только МПС как единого комплекса магистральных железных дорог. С началом процесса реформирования железнодорожного транспорта происходила эволюция терминологии, в которой, помимо функционального разделения, стали возникать нормы, создававшие правовую базу для появления магистральных железных дорог с новыми формами собственности (полностью частные, с разделением долей собственности между Российской Федерацией и ее субъектами или в форме государственно-частного партнерства, например: Амуро-Якутская железнодорожная магистраль или Ямальская железнодорожная компания).

Современное железнодорожное транспортное право в Российской Федерации имеет в своей первоначальной логике множество базирующихся именно на упомянутом выше функциональном разделении норм и правил, подразумевающих, что существует два вида железнодорожных инфраструктур: неких хозяйств государственного значения (магистральных железных дорог общего пользования) и не-

ких хозяйств, представляющих интерес и значимость только для конкретных промышленных предприятий (подъездных путей необщего пользования). Главными нормативно-правовыми актами, закрепляющими основы взаимоотношений между участниками перевозочного процесса, в том числе между владельцами железнодорожной инфраструктуры магистрального транспорта и подъездными путями, являются Федеральный закон «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» (далее — Закон о железнодорожном транспорте) [6] и Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации (далее — Устав) [7], непрерывно дополняющиеся по мере развития железнодорожного комплекса в стране.

С точки зрения условий пользования железнодорожными путями и доступа к ним перевозчиков и иных заинтересованных лиц вся совокупность железнодорожных путей, согласно Закону о железнодорожном транспорте, подразделяется на две группы (разделение по организационно-правовому признаку):

1) железнодорожные пути общего пользования — железнодорожные пути на территориях железнодорожных станций, открытых для выполнения операций по приему и отправлению поездов, приему и выдаче грузов, багажа и грузобагажа, по обслуживанию пассажиров и выполнению сортировочной и маневровой работы, а также железнодорожные пути, соединяющие такие станции;

2) железнодорожные пути необщего пользования — железнодорожные подъездные пути, примыкающие непосредственно или через другие железнодорожные подъездные пути к железнодорожным путям общего пользования и предназначенные для обслуживания определенных пользователей услугами железнодорожного транспорта на условиях договоров или выполнения работ для собственных нужд.

Отнесение железнодорожных путей к той или иной группе осуществляется, как правило, при их проектировании и строительстве. При этом должны соблюдаться соответствующие требования, предъявляемые к железнодорожным путям различных классов и групп.

Положения Постановления Правительства Российской Федерации от 20.11.2003 г. № 703, устанавливающие основы взаимодействия перевозчика и владельца инфраструктуры, диктуют обязанность владельцу инфраструктуры общего пользования оказывать приведенный в тексте документа перечень технологических услуг на основании публичного договора. Согласно п. 11 данного постановления, владелец инфраструктуры не вправе отказывать перевозчику в заключении договора, кроме специально оговоренных случаев.

Так, в ст. 15 Закона о железнодорожном транспорте определены основные требования к железнодорожным путям общего пользования. Одно из таких основных требований — содержание железнодорожных путей общего пользования с соблюдением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта в техническом состоянии, отвечающем требованиям соответствующих нормативных правовых актов, документов по стандартизации, правил и технических норм. В случаях, установленных законодательством Российской Федерации, железнодорожные пути общего пользования должны иметь сертификаты соответствия, т.е. доку-

менты, удостоверяющие соответствие объектов требованиям технических регламентов, документам по стандартизации или условиям договоров.

Согласно п. 5 ст. 15 Закона о железнодорожном транспорте, открытие железнодорожных путей общего пользования для постоянной эксплуатации осуществляется по решению Росжелдора на основании предложений владельцев инфраструктур, которым принадлежат указанные железнодорожные пути. Процедура принятия такого рода решений закреплена в нормативном порядке Административным регламентом Федерального агентства железнодорожного транспорта предоставления государственной услуги по принятию решений об открытии для постоянной эксплуатации железнодорожных путей общего пользования на основании предложений владельцев инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования, которым принадлежат указанные железнодорожные пути, утвержденным приказом Минтранса России от 01.02.2013 г. № 20.

При этом Законом о железнодорожном транспорте установлено, что Росжелдор не вправе отказать в открытии для постоянной эксплуатации железнодорожных путей общего пользования, если они отвечают установленным требованиям и при их проектировании, строительстве, приемке в эксплуатацию и эксплуатации не были нарушены требования указанного Закона, иных нормативных правовых актов, соответствующие правила и технические нормы, а также ранее согласованные обязательства по проектированию, строительству и эксплуатации указанных железнодорожных путей. Владельцы инфраструктур вправе обжаловать отказ в открытии для постоянной эксплуатации железнодорожных путей общего пользования в судебном порядке.

Несмотря на убыточность для владельца инфраструктуры и сложности поддержания приемлемой эффективности работы малоделятельных железнодорожных линий [8–10], их закрытие, как и любых железнодорожных путей общего пользования, осуществляется на основании решения Минтранса России в порядке, определенном Административным регламентом Министерства транспорта Российской Федерации предоставления государственной услуги по принятию решения о закрытии железнодорожных путей общего пользования, в том числе малоинтенсивных линий и участков, утвержденным приказом Минтранса России от 05.05.2012 г. № 130.

При этом в п. 5 ст. 15 Закона о железнодорожном транспорте сделана важная оговорка о том, что Правительством Российской Федерации и (или) органом государственной власти соответствующего субъекта Российской Федерации в случае невозможности закрытия железнодорожных путей общего пользования, имеющих государственное, социальное или оборонное значение, определяется источник финансирования содержания и эксплуатации этих железнодорожных путей. В случае невозможности закрытия железнодорожных путей общего пользования, имеющих социальное и экономическое значение, финансирование их содержания и эксплуатации может осуществляться за счет средств пользователей услугами железнодорожного транспорта и других заинтересованных лиц на условиях договоров с владельцами инфраструктур.

В соответствии с п. 4.2 «Свода правил. Железные дороги колеи 1520 мм» (утвержденного и введенного в действие приказом Минстроя России от 12.12.2017 г. № 1648/пр и являющегося одним из ключевых нормативных документов в сфере строительства железных дорог) новые железнодорожные линии и подъездные пути, дополнительные главные пути и реконструируемые существующие линии, предназначенные для совместного движения грузовых и пассажирских поездов в общей сети железных дорог, в зависимости от характера и размера перевозок подразделяются на категории, приведенные в табл. 1. На каждый железнодорожный путь необщего пользования (вне зависимости от категории) по окончании его строительства и приема в эксплуатацию обязательно составляется инструкция о порядке обслуживания и организации на нем движения.

### РАЗЛИЧИЯ ВИДОВ ИНФРАСТРУКТУР НА ПРАКТИКЕ

В настоящее время в России, помимо ОАО «РЖД», есть два полноценных владельца инфраструктуры общего пользования: это ФГУП «Крымская железная дорога», АО «АК Железные дороги Якутии», а еще в 2023 г. формируется ФГУП «Железные дороги Новороссии». Оба предприятия владеют железнодорожными линиями, станциями, подвижным составом, а также осуществляют грузовые и пассажирские перевозки на протяженных полигонах своей инфраструктуры. На практике все

строящиеся ОАО «РЖД» и этими организациями железнодорожные линии сразу вводятся в эксплуатацию в статусе путей общего пользования с внесением их в соответствующие тарифные руководства.

Помимо трех основных владельцев инфраструктуры общего пользования, есть целый ряд владельцев магистральной железнодорожной инфраструктуры, являющихся при этом владельцами путей необщего пользования и не осуществляющих оказание услуг на основе публичного договора для неограниченного круга лиц. Такие инфраструктурные комплексы, как ООО «Эльга-Дорога», эксплуатирующая линию Верхнезейск — Эльга (подъездной путь длиной 317 км на Эльгинское угольное месторождение), АО «Ямальская железнодорожная компания» (комплекс из линий суммарной длиной более 500 км), линия Обская — Карская (длиной 575 км для снабжения месторождений ПАО «Газпром» на полуострове Ямал) и другие подобные комплексы, находятся в промежуточном статусе между обыкновенными «подъездными путями» и полноценными владельцами инфраструктуры общего пользования. Несмотря на то что они имеют все функциональные признаки, присущие магистральной железнодорожной инфраструктуре, с точки зрения положений Устава и Закона о железнодорожном транспорте эти инфраструктуры являются путями необщего пользования, и на них распространяются все положения, разработанные для подъездных путей.

Таблица 1

Категории железнодорожных линий в Российской Федерации

Категория железнодорожной линии	Назначение железнодорожной линии	Признак определения категоричности		Максимальная скорость движения поездов, км/ч	
		Суммарный расчетный объем перевозок грузов (нетто) на 10-й год эксплуатации, млн т	Пассажирское движение	Пассажирских	Контейнерных, рефрижераторных/грузовых
Скоростная	Железнодорожные линии для движения пассажирских поездов со скоростью свыше 160 и до 200 км/ч	Не регламентируется	Скорость движения пассажирских поездов более 160 км/ч	200	160/90
Пассажирская	Железнодорожные линии с преимущественно пассажирским движением для пассажирских поездов со скоростью до 160 км/ч	Не регламентируется	Более 50 пар пассажирских поездов в сутки, их доля не менее 80 % поездопотока	160	160/90
Особо грузонапряженная	Железнодорожные линии для большого объема грузовых перевозок	Свыше 80	Не регламентируется	140	140/90
I	Универсальные железнодорожные линии	Свыше 40 и до 80		160	160/90
II		Свыше 20 и до 40		160	140/90
III		Свыше 10 и до 20		140	120/80
IV		До 10		120	100/80
V		Подъездные пути с организованным пассажирским движением	Не регламентируется	80	80/60
	Подъездные пути	–		60	
Подъездные пути с организованным пассажирским движением при максимальной скорости поездов свыше 80 км/ч должны удовлетворять нормам железнодорожных линий категории IV					

Отнесение железнодорожных хозяйств различной формы собственности к тем или иным видам железнодорожных инфраструктур приобретает особую актуальность в контексте строительства и ввода в эксплуатацию новых магистральных железных дорог, строящихся на основе государственно-частного партнерства или за частный капитал. Отсутствие обязанности вводить в эксплуатацию новые объекты магистральной железнодорожной инфраструктуры в статусе путей общего пользования создает ситуацию, для которой реализация некоторых положений государственной политики в сфере транспорта становится затруднительной. Это социально значимые пассажирские перевозки, государственное регулирование тарифов на перевозки, обеспечение мобилизационной готовности транспорта и др.

Путь необщего пользования может представлять собой построенный по нормам магистрального железнодорожного транспорта инфраструктурный комплекс с десятками и сотнями километров развернутой длины путей, парком локомотивов, железнодорожными станциями, средствами связи и блокировки, а также другими признаками магистральных железных дорог. Таким образом, можно констатировать, что функциональный термин «подъездной путь» и организационно-правовой термин «путь необщего пользования» нетождественны.

Справедливо и обратное — подъездной путь от железнодорожной станции магистральной сети железных дорог общего пользования (например, принадлежности ОАО «РЖД») может принадлежать как самому владельцу инфраструктуры общего пользования, так и третьим лицам — контрагентам (владельцам путей необщего пользования).

### ПРАВОВОЙ СТАТУС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

В соответствии с Уставом железнодорожная станция — это пункт, который разделяет железнодорожную линию на перегоны или блок-участки, обеспечивает функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта, имеет путевое развитие, позволяющее выполнять операции по приему, отправлению, обгону поездов, операции по обслуживанию пассажиров и приему, выдаче грузов, багажа, грузобагажа, а при развитых путевых устройствах выполнять маневровые работы по расформированию и формированию поездов и технические операции с поездами. Для выполнения этих операций станции оснащаются определенным набором устройств, требования к которым отражены в многочисленных подзаконных актах.

Правильное и последовательное использование в подзаконных актах, во внутренних документах ОАО «РЖД» и в науке терминов «подъездной путь», «путь необщего пользования», «промышленный транспорт» и «технологический транспорт», несмотря на вполне конкретную формулировку, сталкивается с непроработанностью законодательства в части отнесения инфраструктурных комплексов железнодорожного транспорта к железнодорожным станциям.

Перевозки пассажиров, грузов, багажа, грузобагажа, порожних грузовых вагонов осуществляются по железнодорожным путям общего пользования и между железнодорожными станциями, открытыми для выполнения соответствующих операций. В соответствии с положениями Постановления Правительства Российской Федерации от 30.07.2004 г. № 397 уста-

новлен перечень полномочий Федерального агентства железнодорожного транспорта (Росжелдор), согласно которым именно силами Росжелдора на основании заявок владельцев инфраструктур составляется, утверждается и публикуется в соответствующем тарифном руководстве перечень железнодорожных станций, открытых для выполнения каждого рода грузовых или пассажирских операций. Также Росжелдор публикует решения об открытии или закрытии железнодорожных путей общего пользования, об открытии или закрытии железнодорожных станций. Учет открытия/закрытия железнодорожной станции для выполнения отдельных видов коммерческих операций (так называемое «открытие параграфов тарифного руководства») происходит не только на уровне Минтранса России, но и на межгосударственном уровне Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, являющегося координирующим органом железнодорожных администраций стран СНГ и Балтии.

С точки зрения правоприменения эта норма эквивалентна лицензированию со стороны Росжелдора всех станций и пассажирских остановочных пунктов, принадлежащих владельцу инфраструктуры общего пользования. Внесением в соответствующее тарифное руководство Росжелдор подтверждает, что эти станции отвечают требованиям, предъявляемым к железнодорожным станциям, и могут выполнять соответствующие коммерческие операции, предусмотренные отдельными параграфами (пассажирская работа, отдельные виды грузовой работы, пограничные операции и т.д.). Каждой станции присваивается официальное название и уникальный код, попадающий в реестр.

Другая практика складывается на путях необщего пользования, которые приравниваются к подъездным путям. На подъездном пути (пути необщего пользования) с точки зрения транспортного права не может быть «железнодорожной станции» как комплекса, открытого для выполнения коммерческих операций, так как станция может быть только у владельца путей общего пользования. Хотя эта норма не прописана напрямую в федеральных законах и в подзаконных актах, она подразумевается на практике и в тарифных руководствах станции необщего пользования не вносятся.

В случае если магистральная железнодорожная инфраструктура, являющаяся путем необщего пользования, имеет комплексы, полностью функционально и инфраструктурно соответствующие понятию «железнодорожная станция», такие комплексы жаргонно называют станциями, но формально они ими не являются, а представляют собой некие «маневровые районы» или «парки путей», соединенные не «перегонами», а некими «соединительными путями». Между этими комплексами передвигаются не «поезда», а «маневровые составы», хотя функционально это могут быть полноценные грузовые поезда, ведомые на десятки и сотни километров магистральными тепловозами и электровозами.

Логика законодательства подразумевает, что путь необщего пользования — это некоторая группа путей, принадлежащих одному владельцу для обслуживания одного или нескольких предприятий. Правовыми нормами подразумевается, что пути необщего пользования — это некоторая локальная инфраструктура, расположенная вблизи «железнодорожной станции».



Но нередки ситуации, когда на пути необщего пользования может быть развитое хозяйство, фактически имеющее признаки магистральной железнодорожной инфраструктуры, а именно полноценные железнодорожные станции (не лицензированные в Росжелдоре), перегоны длиной в десятки километров, магистральные локомотивы, средства СЦБ и связи, диспетчерский аппарат, деповское хозяйство, пассажирская инфраструктура и собственные службы по содержанию инфраструктуры.

На практике применение терминов «путь общего пользования» и «путь необщего пользования» может иметь еще более размытую юридическую границу в случае смешанных форм собственности и эксплуатации, даже несмотря на наличие конкретных границ подъездного пути, указанных в технологических документах владельца инфраструктуры. В качестве примеров можно рассмотреть разницу в трактовке терминов для следующих типовых ситуаций.

**Первая ситуация.** ОАО «РЖД», как владелец магистральной инфраструктуры общего пользования, владеет станцией примыкания, открытой по соответствующим параграфам тарифного руководства, к которой непосредственно примыкает подъездной путь, принадлежащий третьему лицу (владельцу пути необщего пользования). Эту ситуацию можно назвать идеальной или нормативной с точки зрения логики законодательства.

**Вторая ситуация.** ОАО «РЖД», как владелец магистральной инфраструктуры общего пользования, владеет станцией примыкания, открытой по соответствующим параграфам тарифного руководства, от которой расходится множество путей к различным предприятиям крупной промышленной зоны. На территории этой промышленной зоны могут быть крупные парки путей с развернутой длиной в десятки километров и с активным движением маневровых составов на них. Пути к этим маневровым районам вплоть до ворот предприятий тоже принадлежат ОАО «РЖД», но провозные платы исчисляются от станции примыкания, а так называемые «промышленные станции» на территории промзоны, несмотря на принадлежность к ОАО «РЖД», не являются железнодорожными станциями. Эти парки путей или непосредственно являются частью станции примыкания (т.е. являются путями общего пользования), или же являются путями необщего пользования в собственности ОАО «РЖД» (перевозчика) с соответствующей тарификацией пользования этой инфраструктурой. В такой ситуации формально подъездные пути начинаются за воротами промышленных предприятий.

**Третья ситуация.** К перегону или к станции ОАО «РЖД» примыкает инфраструктурный комплекс путей необщего пользования стороннего владельца, с которым у ОАО «РЖД» выстроен единый технологический процесс по обмену поездными формированиями [11, 12]. Таким образом, инфраструктурно и технологически примыкающий подъездной путь выравнивается с магистральной инфраструктурой по качеству работы и приобретает ее признаки. Подобные ситуации возникают при больших объемах работы по погрузке и выгрузке вагонов (например, на шахтах и комбинатах). На таких подъездных путях выполняется весь комплекс технологических операций по формированию и расформированию поездов установленного веса и длины, ведомых поездными локомотивами на собственных «промышленных станциях».

Единственным объективным и конкретным отличием этих путей необщего пользования от магистральной инфраструктуры общего пользования становится отсутствие статуса пути общего пользования и вытекающих отсюда сопутствующих формальных признаков, таких как наличие публичного договора на оказание услуг по пользованию инфраструктурой.

## О СТАТУСЕ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Как известно, пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте регулируются положениями тех же федеральных законов, что и грузовые перевозки, а именно Устава и Закона о железнодорожном транспорте. Важнейшим подзаконным актом являются Правила перевозок пассажиров, багажа, грузобагажа железнодорожным транспортом (далее — Правила пассажирских перевозок), устанавливающие ключевые нормы, обязательные к исполнению всеми участниками пассажирской перевозки.

Пассажирские перевозки могут осуществляться только на инфраструктуре общего пользования и между станциями (остановочными пунктами), открытыми для выполнения пассажирских операций (п. 8 Правил пассажирских перевозок). Это положение также подразумевается упомянутой выше ст. 4 Устава, которая гласит, что «перевозки пассажиров, грузов, багажа, грузобагажа, порожних грузовых вагонов осуществляются по железнодорожным путям общего пользования и между железнодорожными станциями, открытыми для выполнения соответствующих операций...». Таким образом, формальное прочтение данной статьи диктует обязательность требования о том, что пассажирские перевозки с продажей проездных документов для пассажиров возможны только между станциями инфраструктуры общего пользования, открытыми для выполнения пассажирских операций. Но прямого запрета на перевозки людей по инфраструктуре необщего пользования в существующих нормах нет. Поэтому с точки зрения правоприменения фактически выполняемые на путях необщего пользования перевозки работников промышленных предприятий или работников железнодорожного транспорта к их рабочим местам могут осуществляться при условии выполнения всех технических требований, устанавливаемых законодательством, но без продажи проездных документов и заключения договора перевозки. Человек, находящийся в поезде и не заключивший с перевозчиком договор перевозки пассажира, не является пассажиром (ст. 2 Устава), следовательно, его перевозка не является пассажирской. Такую ситуацию можно условно назвать квазипассажирской перевозкой, так как функционально эта транспортная работа имеет все признаки пассажирской перевозки (движение пассажирского подвижного состава по заданному маршруту и известному узкому кругу лиц расписанию), но формально таковой не является.

В России и на пространстве СНГ действует целый ряд железнодорожных инфраструктур, принадлежащих крупным организациям, сохраняющим и развивающим свои собственные квазипассажирские перевозки. Среди них можно отметить ГК «Роскосмос» (перевозки работников космодромов от мест проживания к производственным площадкам), Саяногорский алюминиевый завод в Республике Хакасия (перевозки между заводом и городом), линию Обская — Бованенково, принад-

лежащую ПАО «Газпром», Железногорский горно-химический комбинат, принадлежащий ГК «Росатом» (перевозки между заводом и городом) и др.

Под категорию квазипассажи́рских перевозок можно отнести и туристические (чартерные) круизные пассажирские перевозки, не предполагающие продажу пассажиру билета на проезд от станции отправления до станции назначения, а предполагающие оказание ему некоторой комплексной транспортной услуги в рамках туристической путевки [13].

Правовой статус путей необщего пользования в пассажирских перевозках является одним из препятствий к развитию пригородно-городских железнодорожных или трамвайно-железнодорожных пассажирских перевозок в областных центрах России [14]. Наличие готового землеотвода у предприятий промышленного железнодорожного транспорта делает их привлекательной основой для организации движения электропоездов в пределах городов (примерами могут служить Нижний Новгород, Новосибирск, Краснодар и др.), но реализация подобных проектов возможна только через перепродажу имущественного комплекса путей необщего пользования, через его формальное закрытие, реконструкцию и последующее открытие в статусе путей общего пользования. Подобный опыт есть только у Московской железной дороги.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Постановлением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р, утверждающим положения Транспортной стратегии, предусматривается целый набор мероприятий по совершенствованию нормативно-правовой базы промышленного железнодорожного транспорта, таких как:

создание равных условий землепользования и налогообложения для организаций железнодорожного транспорта общего и необщего пользования;

совершенствование системы государственного регулирования тарифов на работы и услуги, оказываемые организациями промышленного железнодорожного транспорта;

определение правового статуса субъектов промышленного транспорта и порядка использования ими транспортных средств и оборудования;

обеспечение равного доступа всех заинтересованных лиц к услугам промышленного транспорта;

учет особенностей функционирования промышленного транспорта при разработке тарифов организаций железнодорожного транспорта общего пользования и технических регламентов.

Анализ показывает, что железнодорожный транспорт по-прежнему нуждается в развитии транспортного права по перечисленным пунктам, необходимым для приведения основополагающих положений законодательства к реалиям рыночных отношений. Привнесение новых механизмов в законодательство необходимо как для повышения инвестиционной привлекательности железнодорожного транспорта в условиях недостаточности финансирования строительства новых железнодорожных линий со стороны федерального бюджета, так и для выстраивания более последовательной логики нормативно-правового регулирования работы магистрального и промыш-

ленного железнодорожного транспорта с учетом многообразия форм собственности, выполняемых задач и интересов собственников железнодорожной инфраструктуры.

Исходя из описанной выше проблематики использования таких основополагающих для железнодорожного транспорта терминов, как «путь общего пользования», «владелец инфраструктуры» и «путь необщего пользования», можно сформулировать следующий ряд рекомендаций к перспективной правовой модели железнодорожных перевозок, развивающихся поднимаемые отечественными учеными проблемы [11, 15–17], которая должна найти свое отражение в Федеральном законе о железнодорожном транспорте, в Уставе и в подзаконных актах.

1. Необходимо конкретизировать в нормативно-правовых актах признак, по которому происходит разделение инфраструктур при выстраивании договорных отношений между участниками перевозочного процесса (организационно-правовой аспект). С учетом проведенного анализа предлагается в качестве данного признака выбрать наличие/отсутствие публичного договора на пользование железнодорожной инфраструктурой, из которого вытекает необходимость установления регулируемых тарифов, наличие или отсутствие государственного контроля по управлению инфраструктурой и возможность отказа перевозчикам в праве пользования инфраструктурой без объяснения причин.

Мерой государственной политики в области железнодорожного транспорта может быть управление требованиями к тому, какая инфраструктура должна работать по публичному договору. В подзаконных актах и в перекрестных ссылках между федеральными нормативно-правовыми актами должны также детализироваться права и обязанности владельцев инфраструктуры в зависимости от публичности или непубличности. Предполагается, что публичный статус несет социальную нагрузку на владельца инфраструктуры и несколько ограничивает владельца в распоряжении имуществом, но открывает ему возможность к субсидированию его работы со стороны регионального или федерального бюджета, получению государственных заданий на возмездной основе и к софинансированию развития инфраструктуры. Непубличный статус освобождает владельца инфраструктуры от любого ценового регулирования его деятельности и дает ему свободу деятельности на рынке транспортно-логистических услуг как в пассажирских, так и в грузовых перевозках при соблюдении технических норм и правил. Непубличный статус инфраструктуры влечет за собой риск самоокупаемости бизнеса и закрывает возможности по субсидированию работы инфраструктуры.

Таким образом, новые нормы о публичном или непубличном статусе инфраструктуры следует включить во все законы и подзаконные акты, в которых упоминаются пути общего и необщего пользования, подъездные пути, железнодорожные линии, владельцы инфраструктуры и прочие смежные термины в контексте именно организационно-правовой формы владения железнодорожной инфраструктурой.

Примерами инфраструктур, которые в обязательном порядке должны работать на принципах публичного договора, являются:

скоростные и высокоскоростные железнодорожные линии и станции на них;

припортовые железнодорожные станции;

железнодорожные пассажирские станции с вокзальными комплексами высших классов;

магистральные железнодорожные линии и станции в районах Крайнего Севера и на приравненных к ним территориях; пограничные железнодорожные станции.

2. Все инфраструктурные комплексы, отвечающие функциональным признакам, присущим железнодорожным станциям, должны быть в обязательном порядке включены в тарифные руководства с открытием соответствующих операций, т.е. они должны получить официальный статус железнодорожной станции. Это могут быть железнодорожные станции с публичным договором и с непубличным. Нормы строительства и нормы на содержание железнодорожных станций вне зависимости от формы собственности и функциональной схемы выравниваются для всех возможных случаев. Решение о том, является ли инфраструктурный комплекс железнодорожной станцией или же это парк путей на подъездном пути, должен принимать Росжелдор исходя из технологии работы и технического оснащения комплекса.

В случае если владелец публичной или непубличной инфраструктуры хочет организовать на своих путях пассажирские перевозки, он обязан выделить соответствующие железнодорожные станции и (или) остановочные пункты с внесением их в тарифные руководства.

Железнодорожные станции (в том числе различных владельцев) соединяются друг с другом перегонами, на которых применяется поездный порядок движения в соответствии с требованиями ПТЭ.

3. После детализации норм применения термина «железнодорожная станция» следует детализировать, что функциональный термин «подъездной путь» относится ко всем железнодорожным путям с публичным или непубличным догово-

ром, обязательно примыкающим к железнодорожной станции. Подъездные пути могут принадлежать любому лицу — как владельцу станции, так и третьему лицу. При этом каждый подъездной путь может примыкать более чем к одной железнодорожной станции.

На подъездном пути не может быть железнодорожной станции, поездной работы (только маневровая) и движения со скоростями выше 40 км/ч. Также на подъездном пути не могут осуществляться пассажирские перевозки.

Таким образом, уточненные термины «подъездной путь» и «железнодорожная станция» следует использовать во всех законах и подзаконных актах, где применяются эти или схожие с ними (путь общего пользования, путь необщего пользования, промышленный железнодорожный транспорт и т.д.) термины, в контексте именно технико-технологических требований к строительству, содержанию и эксплуатации подъездных путей, идущих от железнодорожных станций к местам погрузки и выгрузки вагонов.

4. Следует произвести полную отвязку всех функциональных, а также технических терминов и определений железнодорожного транспорта от организационно-правовой формы владения инфраструктурой. Например, использование термина «главный путь» как железнодорожного пути «перегонов», соединяющих «станции» и продолжающихся по территории станций, в подзаконных актах, например в Условиях эксплуатации железнодорожных поездов, утверждаемых Министерством транспорта Российской Федерации, возможно только вкуче с детализацией термина «железнодорожная станция» как комплекса, внесенного в тарифное руководство. В случае если железнодорожный путь имеет функциональные признаки главного пути, но не соединяет «железнодорожные станции», а соединяет некие промышленные станции, парки путей или пути необщего пользования, он не является главным и может быть отнесен к «соединительным» или «прочим».

## Литература

1. Журавлев Н. П., Потапов И. П., Савельев М. Ю. Промышленный железнодорожный транспорт: состояние и перспективы развития. Курск : ЗАО «Универ», 2023. 145 с.
2. Корякин В. М. Генезис транспортного права России // Аграрное и земельное право. 2016. № 3 (135). С. 28–36. ISSN 1815-1329.
3. ГОСТ 34530–2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2019. 50 с.
4. Журавлев Н. П. Нормативная база пространства 1520: предложения по усовершенствованию // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 1 (38). С. 41–47. ISSN 1994-831X.
5. О перспективах развития нормативной базы безопасности движения на железнодорожном транспорте / С. П. Вакулenco, Н. П. Журавлев, М. Ю. Савельев, А. А. Сидраков // Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом : материалы международной научно-

## References

1. Zhuravlev N. P., Potapov I. P., Savelyev M. Yu. Industrial railway transport: the condition and the perspectives of its development [Promyshlennyy zheleznodorozhnyy transport: sostoyaniye i perspektivy razvitiya]. Kursk : Univer, 2023. 145 p.
2. Koryakin V. M. The genesis of transport law of Russia [Genezis transportnogo prava Rossii]. Agrarian and land law. 2016. No. 3 (135). Pp. 28–36. ISSN 1815-1329.
3. GOST 34530–2019. Railway transport. General. Terms and definitions [Transport zheleznodorozhnyy. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya]. Moscow : Standardinform, 2019. 50 p.
4. Zhuravlev N. P. Improvement suggestions for regulatory system of the 1520 mm gauge area [Normativnaya baza prostranstva 1520: predlozheniya po usovershenstvovaniyu]. Transport of the Russian Federation. 2012. No. 1 (38). Pp. 41–47. ISSN 1994-831X.
5. Vakulenko S. P., Zhuravlev N. P., Savelyev M. Yu., Sidrakov A. A. About the perspectives of the development of the legal base of the railway transportation safety [O perspektivakh razvitiya normativnoy bazy bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte]. The tendencies of railway transport development and the transportation process control. Pro-

- технической конференции. Москва : Российский университет транспорта, 2020. С. 33–41.
6. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 17-ФЗ // Российская газета. 18 янв. 2003 г.
  7. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации : Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ // Российская газета. 18 янв. 2003 г.
  8. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова [и др.] ; под ред. С. П. Вакуленко. Москва : ВИНТИ РАН, 2018. 218 с.
  9. Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. О правовых основах эксплуатации малоинтенсивных линий // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 1 (80). С. 164–171. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-1-164-173. ISSN 1992-3252.
  10. Раскрытие туристического и пассажирского потенциала малонапряженных железнодорожных линий на примере линии «Берендеево — Переславль» / К. А. Калинин, П. А. Красильников, М. В. Роменская [и др.] // Транспортное дело России. 2022. № 4. С. 88–92. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_4\_88. ISSN 2072-8689.
  11. Особенности технологии работы станций примыкания и путей необщего пользования в едином технологическом процессе / С. П. Вакуленко, Н. П. Журавлев, А. А. Сидраков, М. Ю. Савельев // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. 2022. № 1 (4). С. 52–55. ISSN 2664-5025.
  12. Бородина Е. В., Прокофьева Е. С., Бадамбаева С. Е. Разработка рациональной системы обслуживания портовых комплексов железнодорожным транспортом в припортовых железнодорожных узлах // Наука и техника транспорта. 2020. № 1. С. 52–59. ISSN 2074-9325.
  13. Шорохова Л. С., Тимкова А. Ю., Ефимов Р. А. Туризм как драйвер развития мультимодальности пассажирских перевозок // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки : труды Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. Москва : Российский университет транспорта, 2021. С. 271–279. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.39.
  14. Николаев К. Ю. Выбор полигона и параметров применения технологии «трамвай-поезд» в России // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 5 (90). С. 40–44. ISSN 1994-831X.
  15. Баукин В. Г. Реализация правил о публичном договоре в системе законодательства о перевозке грузов железнодорожным транспортом // Российское правосудие. 2022. № 9. С. 56–62. DOI: 10.37399/issn2072-909X.2022.9.56-62. ISSN 2072-909X.
  16. Ткаченко Е. В. Проблемы понятия инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования // Бизнес, менеджмент и право. 2011. № 2 (24). С. 123–126. ISSN 2072-1722.
  17. Плахотич С. А. Некоторые пробелы в железнодорожном законодательстве // Инновационный транспорт. 2012. № 3 (4). С. 6–13. ISSN 2311-164X.
  - ceedings of International scientific and technical conference. Moscow : Russian University of Transport, 2020. Pp. 33–41.
  6. On railway transport in the Russian Federation [O zheleznodorozhnom transportе v Rossiyskoy Federatsii]. Federal Law of the Russian Federation dated 10.01.2003 No. 17-FZ. Russian newspaper. January 18, 2003.
  7. The Constitution of railways transport of the Russian Federation [Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii]. Federal Law of the Russian Federation dated 10.01.2003 No. 18-FZ. Russian newspaper. January 18, 2003.
  8. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. [et al.]. The effectiveness of low-intensity rail lines exploitation and maintenance [Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy]. Moscow : VINITI RAS, 2018. 218 p.
  9. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Legal framework for low-density traffic railways operation [O pravovykh osnovakh ekspluatatsii malointensivnykh liniy]. World of Transport and Transportation. 2019. Vol. 17. No. 1 (80). Pp. 164–171. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-1-164-173. ISSN 1992-3252.
  10. Kalinin K. A., Krasil'nikov P. A., Romenskaya M. V. [et al.]. Disclosure of the tourist and passenger potential of low-density railway lines on the example of the Berendeevo — Pereslavl line [Raskrytie turistscheskogo i passazhirskogo potentsiala malodeyatel'nykh zheleznodorozhnykh liniy na primere linii «Berendeevo — Pereslavl'»]. Transport business of Russia. 2022. No. 4. Pp. 88–92. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_4\_88. ISSN 2072-8689.
  11. Vakulenko S. P., Zhuravlev N. P., Sidrakov A. A., Savelyev M. Yu. Features of the technology of junction stations and paths of non-public use in a single technological process [Osobennosti tekhnologii raboty stantsiy primykaniya i putey neobshhego pol'zovaniya v edinom tekhnologicheskom protsesse]. Problems of railway stations and junctions perspective development. 2022. No. 1 (4). Pp. 52–55. ISSN 2664-5025.
  12. Borodina E. V., Prokof'eva E. S., Badambaeva S. E. Rational system development of port complex operation by rail transport in port railway junctions [Razrabotka ratsional'noy sistemy obsluzhivaniya portovykh kompleksov zheleznodorozhnym transportom v priportovykh zheleznodorozhnykh uzлах]. Science and technology in transport. 2020. No. 1. Pp. 52–59. ISSN 2074-9325.
  13. Shorokhova L. S., Timkova A. Yu., Efimov R. A. Tourism as the driver for the development of the passenger transportation multimodality [Turizm kak drayver razvitiya mul'timodal'nosti passazhirskikh perevozk]. Academician Vladimir Nikolayevich Obratsov — the founder of transport science. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021. Moscow : Russian University of Transport, 2021. Pp. 271–279. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.39.
  14. Nikolaev K. Yu. Selection of operating domain and parameters for application of the tram-train technology in Russia [Vybor poligona i parametrov primeneniya tekhnologii «tramvay-poezd» v Rossii]. Transport of the Russian Federation. 2020. No. 5 (90). Pp. 40–44. ISSN 1994-831X.
  15. Baukin V. G. Implementation of the rules on the public contract (compulsory contract) in the system of legislation on the carriage of goods by rail [Realizatsiya pravil o publichnom dogovore v sisteme zakonodatel'stva o perevozke грузов zheleznodorozhnym transportom]. Russian Justice System. 2022. No. 9. Pp. 56–62. DOI: 10.37399/issn2072-909X.2022.9.56-62. ISSN 2072-909X.
  16. Tkachenko E. V. The problems of the concept of infrastructure for rail transport of common use [Problemy ponyatiya infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya]. Business, Management and Law. 2011. No. 2 (24). Pp. 123–126. ISSN 2072-1722.
  17. Plakhotich S. A. Some of the problems in the railway legislation [Nekotorye probely v zheleznodorozhnom zakonodatel'stve]. Innotrans. 2012. No. 3 (4). Pp. 6–13. ISSN 2311-164X.

Объем статьи 1,25 авторских листа

УДК 656.078

**Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии Российской Федерации, президент Научно-производственного холдинга «СТРАТЕГ», Москва, Россия,**  
**Ильдар Салимович Абдуллаев, кандидат технических наук, заместитель начальника**  
**Управления комплексной экспертизы проектов ОАО «РЖД», Москва, Россия,**

**Николай Андреевич Тушин, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**

**Николай Васильевич Якушев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## О РОЛИ СИСТЕМНЫХ ИНТЕГРАТОРОВ В ТРАНСПОРТНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

**Petr Alexeevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, Laureate of the State Prize of the Russian Federation, President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,**

**Ildar Salimovich Abdullaev, PhD in Engineering, Deputy Head of Division for Complex Examination of the JSC «RZD» Projects, Moscow, Russia,**

**Nikolay Andreevich Tushin, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**

**Nikolay Vasilyevich Yakushev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### About the role of system integrators in transport economic ties guarantee

#### Аннотация

В настоящее время в ОАО «РЖД» идет трансформация бизнес-модели «перевозчик» в модель «транспортно-логистический холдинг». В том числе ставится задача о предоставлении комплексных интегрированных услуг, предусматривается формирование диверсифицированной продуктовой корзины, внедряются принципы политики клиентоориентированности, приобретает актуальность технологическая координация. Соответственно встает вопрос об операторе комплексных транспортных услуг.

В статье рассматриваются функции системных интеграторов в транспортном обеспечении экономических связей. Показано, что появление системных интеграторов — это объективная необходимость, так как они формируют цепи поставок и организуют прохождение потока через разные виды транспорта. Управление транспортными процессами активизирует так называемые динамические резервы, что повышает эффективность транспортных связей. В результате экономический выигрыш получают все участники цепей поставок.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, поток, система, экономическая связь, системный интегратор, управление

#### Abstract

Nowadays JSC «RZD» is transforming its business model «transporter» into the model «transport-logistic holding». Meantime there is a set task about providing the complexed integrated service, the formation of a diverse product basket is included, the principles of the policy of the orientation to clients are being instilled, technological coordination is becoming more actual. Therefore, there is a question about the operator of the complexed transportation service.

The article describes the functions of the system integrators in transport economic ties guarantee. It is shown that the appearance of the system integrators is an objective necessity as they form the chains of supplies and organize the flow through several transport means. The control for the transport processes activates the so-called dynamic reserves which rises the effectiveness of the transport ties. As a result, every representative of the supply chains gets an economical benefit.

**Keywords:** railway transport, flow, system, economical tie, system integrator, control

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-12-16

## ВВЕДЕНИЕ

Реализация стратегии развития холдинга «РЖД» до 2030 г. осуществляется по пяти ключевым направлениям, в том числе в сфере транспортно-логистических услуг, железнодорожных перевозок и инфраструктуры. Важнейшим приоритетом становится формирование диверсифицированной продуктовой корзины с переходом от оказания преимущественно услуг по перевозкам к предоставлению комплексных интегрированных услуг «от двери до двери», с последовательным расширением спектра от 2PL- до 4PL-услуг, а также с созданием глобальных логистических цепочек [1]. В стратегии сформулированы цели, направленные на повышение уровня удовлетворенности клиентов, обеспечение обслуживания цепочек поставок, расширение логистического бизнеса.

Генеральным приоритетом развития инфраструктуры является снижение издержек и повышение возможностей для создания новых логистических продуктов, главной целью становится планомерное обновление активов.

Санкции, принятые в отношении нашей страны, односторонние разрывы деловых связей и логистических цепочек сказались в том числе и на транспортной отрасли. Изменились и приоритеты управления. Основные усилия направлены на обеспечение бесперебойной работы транспорта. В то же время ставятся задачи по формированию новых логистических цепочек и организации конструктивного взаимодействия со всеми участниками рынка. Достижение таких разновекторных целей требует научного осмысления роли транспорта в обеспечении экономических связей.

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Железнодорожный транспорт выполняет двойственную функцию. Он выступает и как самостоятельная система, и как элемент системы «народное хозяйство» [2, 3]. В первом случае его функцию можно сформулировать как перевозки, во втором — как обеспечение экономических связей связями транспортными. Это положение относится и к другим видам транспорта (рис. 1).

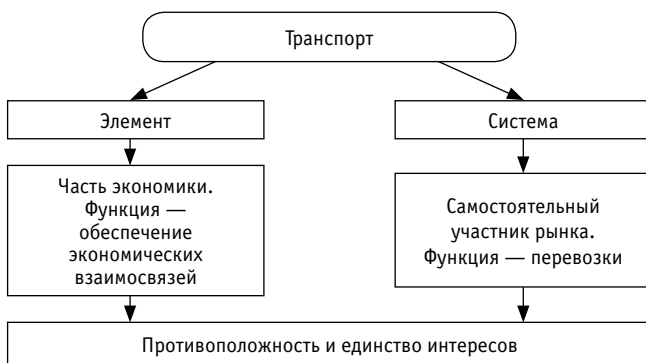


Рис. 1. Двойственная функция транспорта

Для реализации экономической связи могут использоваться несколько видов транспорта. На стыках возникает преобразование потоков. Например, сначала груз везут в автомобилях, а затем его нужно отправлять в контейнерах по железной

дороге. Требуется к тому же и документальное переоформление. И должны быть согласованы ритмы работы всех участников перевозки. Но в силу объективных функций это не может делать ни один из участвующих перевозчиков. Возникает необходимость в системных интеграторах (рис. 2). Обычно эти обязанности выполняют специализированные экспедиторские компании [4, 5].

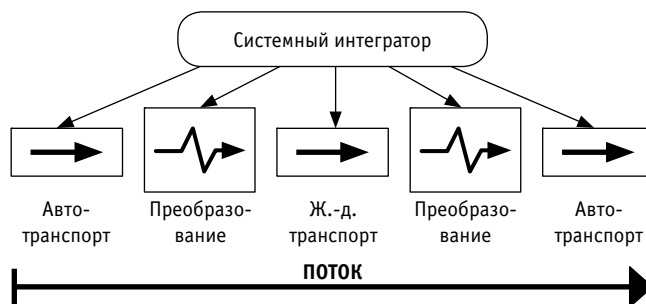


Рис. 2. Схема транспортного обеспечения экономической связи

Задача системного интегратора — организовать и надежную, и эффективную транспортную связь. Поэтому на время перевозки он создает своего рода виртуальную систему. Здесь совокупность участников обладает временной целостностью. Они объединены единым перевозочным процессом и единым управлением. Управление потоками сокращает потери на стыках между видами транспорта и между транспортом и производством. Управляемый подвод снижает простои подвижного состава в местах преобразования потока и в пунктах потребления. То есть вынужденно возникающие статические резервы заменяются динамическими (по классификации это динамические резервы первого рода) [6, 7]. И именно динамические резервы обеспечивают не только надежность, но и эффективность транспортной связи.

Кроме согласования ритмов интегратор совместно с транспортниками может организовывать и приоритетный пропуск опаздывающих поездов. Тогда возникают динамические резервы второго рода.

Но системные интеграторы способны играть организующую роль и в рамках одного вида транспорта.

Рассмотрим пример подвода составов с рудой или углем к металлургическим заводам. Процессы подвода — неуправляемые с точки зрения экономической связи. У каждого отправителя есть контракт, в котором указано, сколько груза он должен отправить каждому получателю. Отправитель определяет, по какому потребителю он отстает, и отправляет ему груз в первую очередь. Конечно, это управляемый процесс с точки зрения поставщика, но неуправляемый по критерию обеспечения требуемого ритма прибытия. Время хода от разных производителей к различным потребителям неодинаково, да и интенсивность потока разная, поэтому даже если бы все составы отправлялись равномерно, они прибывали бы неравномерно [8, 9]. Как выглядит, например, график прибытия составов с углем на металлургический завод при равномерном отправлении от всех участников и при разном фактическом времени хода, показано на рис. 3.

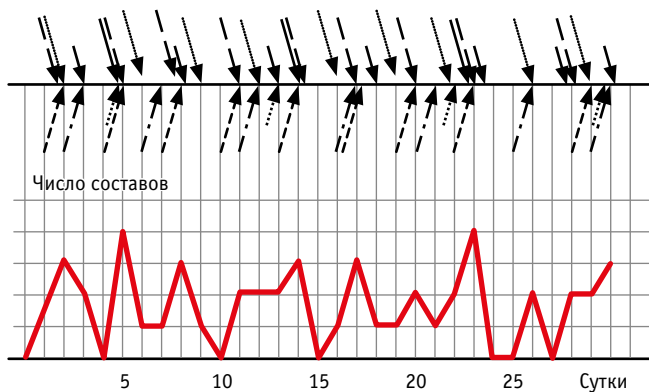


Рис. 3. График прибытия маршрутов с углем при ритмичном отправлении

### МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТА И ПРОИЗВОДСТВА

Схематично процесс взаимодействия отправителей, получателей и транспорта можно представить следующим образом (рис. 4).

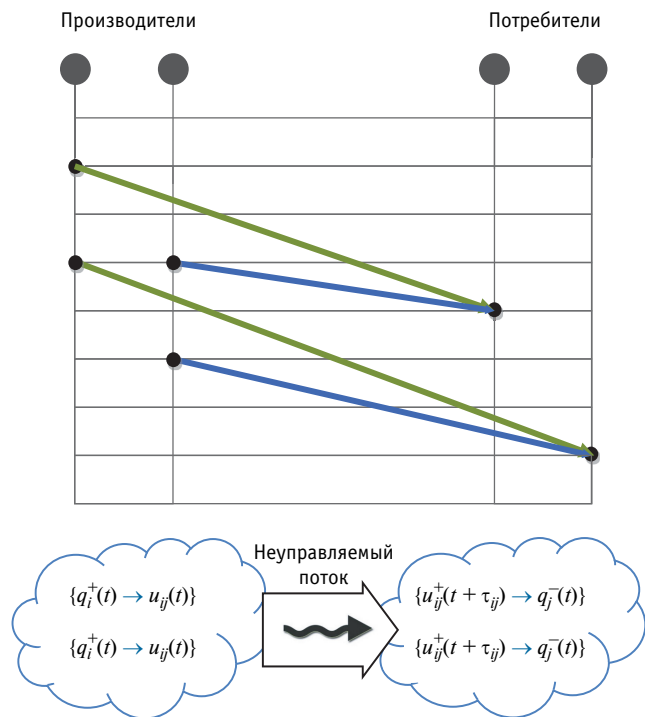


Рис. 4. Схема взаимодействия производителей, потребителей и транспорта без системного интегратора:  
 $q_i^+(t)$  — динамика производства;  $q_j^-(t)$  — динамика потребления;  
 $u_{ij}(t)$  — отправляемый поток;  $u_{ij}(t + \tau_{ij})$  — прибывающий поток;  
 $\tau_{ij}$  — время хода;  $\{ \}$  — неорганизованное множество

$$\{q_i^+(t) \rightarrow u_{ij}(t)\} \rightarrow \{u_{ij}(t + \tau_{ij}) \rightarrow q_j^-(t)\}$$

Рис. 5. Схема доставки груза без системного интегратора

И отправители, и получатели представляют собой, по сути, неупорядоченные множества. Ритмы своей работы они никак не согласуют друг с другом. Работу транспорта здесь тоже можно определить как пассивную: он не участвует в согласовании ритмов отправления и прибытия и в постройном управлении потоками. Цепочку такого производственно-транспортного взаимодействия можно изобразить в виде схемы, представленной на рис. 5, где все стрелки обозначают неуправляемые процессы.

При системном интеграторе процессы взаимодействия существенно меняются (рис. 6).

В данном случае отправители и получатели превращаются из неорганизованных множеств в организованные совокупности (вертикальные стрелки на рис. 6). Процесс охвачен сквозным управлением (рис. 7), поэтому возникает виртуальная система.

Теперь производитель отправляет груз получателю, указанному интегратором. Для расчета оптимального согласования ритмов рекомендуется использовать динамическую транспортную задачу [10]. Транспорт осуществляет перевозку по маршруту, указанному интегратором. Кроме того, по его же требованию в процессе перевозки может быть ускорение и замедление струй потока.

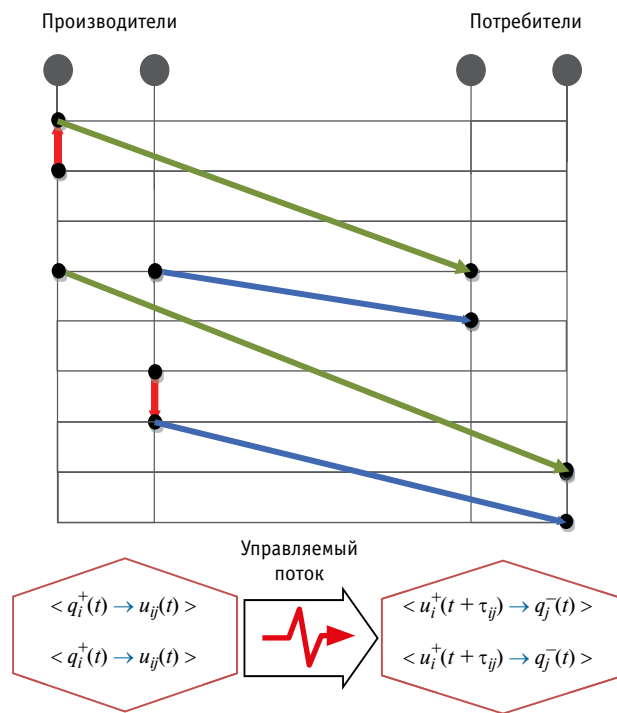


Рис. 6. Схема взаимодействия производителей и потребителей с системным интегратором:  
 $q_i^+(t)$  — динамика производства;  $q_j^-(t)$  — динамика потребления;  
 $u_{ij}(t)$  — отправляемый поток;  $u_{ij}(t + \tau_{ij})$  — прибывающий поток;  
 $\tau_{ij}$  — время хода;  $\langle \rangle$  — организованная совокупность

$$\langle q_i^+(t) \rightarrow u_{ij}(t) \rangle \rightarrow \langle u_{ij}(t + \tau_{ij}) \rightarrow q_j^-(t) \rangle$$

Рис. 7. Схема доставки груза с системным интегратором

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

У потребителя при согласованном подводе снижается простой подвижного состава. Здесь не рассматривается задержка производства из-за недостатка груза, но в общем случае такая ситуация вероятна.

А теперь возникает вопрос: почему бы этот процесс не организовать железнодорожному транспорту? Рассмотрим проблему с системных позиций.

У железнодорожного транспорта как системы основная задача — перевозки. Главное — объемы, потому что нужны доходы для обеспечения затратной жизнедеятельности. Необходимое для второй функции постройное управление потоками требует гибкой технологии с переходными процессами. А они всегда связаны с дополнительными затратами. Доходы падают, страдает первая функция. То есть две функции в какой-то мере мешают друг другу. Возникает зона противоречий (рис. 8).

А у системного интегратора обе функции практически совпадают (рис. 9).

Задача системного интегратора как самостоятельной системы — эффективное транспортное обеспечение экономических связей, он для этого и создавался [11]. Но эта же функция присуща ему и как элементу единой транспортной системы страны.

Таким образом, организующая роль системного интегратора — необходимо, а само его появление — объективно.

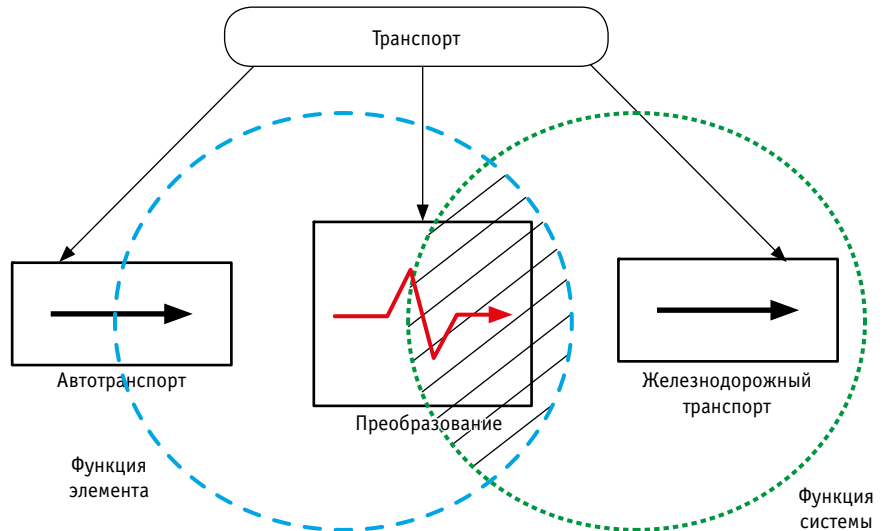


Рис. 8. Противоречие двух функций железнодорожного транспорта

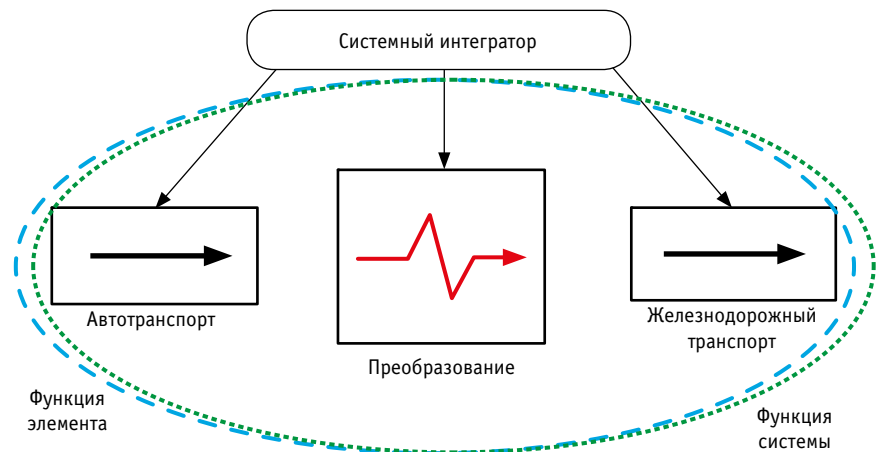


Рис. 9. Совпадение функций системы и элемента у системного интегратора

## Литература

1. Выбираем зеленое будущее. Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2021 год. URL: <http://ar2021.rzd.ru> (дата обращения: 17.07.2023).
2. Козлов П. А. Системные исследования — новый подход // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 46–50. ISSN 2074-9325.
3. Козлов П. А. О системах и системности на транспорте // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815-9400.
4. Козлов П. А., Тушин Н. А. Системная интеграция в области перевозок // Железнодорожный транспорт. 2010. № 9. С. 68–70. ISSN 0044-4448.
5. Тушин Н. А., Улижева Н. Н. Роль экспедитора в транспортных процессах // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 56–58. ISSN 1815-9400.
6. Владимирская И. П. Оптимизация структурно-функционального взаимодействия в транспортных и производственно-тран-

## References

1. Choose green future. Annual report JSC «RZD» for 2021 [Vybirаем zelenoe budushhee. Godovoy otchet OAO «RZhd» za 2021 god]. URL: <http://ar2021.rzd.ru> (access date: 17.07.2023).
2. Kozlov P. A. System studies — new approach [Sistemnyye issledovaniya — novyy podkhod]. Science and technology in transport. 2014. No. 1. Pp. 46–50. ISSN 2074-9325.
3. Kozlov P. A. On systems and systemacity of transport [O sistemakh i sistemnosti na transporte]. Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815-9400.
4. Kozlov P. A., Tushin N. A. System integration in sphere of transportation [Sistemnaya integratsiya v oblasti perevozok]. Railway Transport. 2010. No. 9. Pp. 68–70. ISSN 0044-4448.
5. Tushin N. A., Ulizheva N. N. The role of forwarding companies in transport processes [Rol' ekspeditora v transportnykh protsessakh]. Transport of the Urals. 2014. No. 4 (43). Pp. 56–58. ISSN 1815-9400.
6. Vladimirskaia I. P. Optimization of structural and functional interaction in transportation and industrial transportation systems [Optimizatsiya strukturno-funktsional'nogo vzaimodeystviya v transportnykh i



портных системах : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2011. 273 с.

7. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Организационные подходы и модели оптимизации // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 18–23. ISSN 1992-3252.
8. Козлов П. А., Тушин Н. А., Копылова Е. В. Динамическое согласование в системе «производство — транспорт — потребление» // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 3–6. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-3-6. ISSN 1815-9400.
9. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин, О. В. Осокин // Вестник УрГУПС. 2019. № 1 (41). С. 60–69. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69. ISSN 2079-0392.
10. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521–531. ISSN 0424-7388.
11. Козлов П. А., Тушин Н. А. Экспедитор как системный интегратор в области перевозок грузов // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. № 10. С. 13–16. ISSN 0236-1914.

proizvodstvenno-transportnykh sistemakh]. DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2011. 273 p.

7. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Organizational approach and optimization models [Organizatsionnye podkhody i modeli optimizatsii]. World of Transport and Transportation. 2011. Vol. 9. No. 5 (38). Pp. 18–23. ISSN 1992-3252.
8. Kozlov P. A., Tushin N. A., Kopylova E. V. Dynamic coordination in «production — transport — consumption» system [Dinamicheskoe soglasovanie v sisteme «proizvodstvo — transport — potrebleniye»]. Transport of the Urals. 2018. No. 4 (59). Pp. 3–6. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-3-6. ISSN 1815-9400.
9. Kozlov P. A., Kolokol'nikov V. S., Tushin N. A., Osokin O. V. On using effective management models for transport flow [Ob ispol'zovanii modely optimal'nogo upravleniya transportnymi potokami]. Herald of USURT. 2019. No. 1 (41). Pp. 60–69. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69. ISSN 2079-0392.
10. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers [Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebiteley]. Economics and Mathematical Methods. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424-7388.
11. Kozlov P. A., Tushin N. A. Dispatcher as a system integrator in sphere of freight transportation [Ekspeditor kak sistemnyy integrator v oblasti perevozok gruzov]. Transport: science, equipment, management. 2010. No. 10. Pp. 13–16. ISSN 0236-1914.

Объем статьи 0,54 авторских листа

УДК 656.212.6

**Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**  
**Вадим Борисович Свердлов, кандидат технических наук, преподаватель Свердловского учебного центра профессиональных квалификаций — структурного подразделения Свердловской железной дороги — филиала ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия**

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРИФИРМЕННЫХ РЕЛЯЦИОННЫХ ОТНОШЕНИЙ ОАО «РЖД» В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

**Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**  
**Vadim Borisovich Sverdlov, PhD in Engineering, Teacher of the Sverdlovsk educational centre of the professional qualifications — structural division of the Sverdlovsk Railway — branch of the JSC «RZD», Ekaterinburg, Russia**

### The model of the formation of intra-corporate relational interactions of JSC «RZD» in the sphere of the car fleet preservation

#### Аннотация

Рассмотрено внутреннее реляционное пространство ОАО «РЖД» в сфере сохранности вагонного парка. Показаны и проанализированы образовавшиеся коммерческие и производственные связи между участниками реляционного процесса внутри холдинга «РЖД». Проанализированы противоречия, возникающие между участниками внутреннего реляционного пространства. Предложены решения, которые упрощают процедуру контроля за сохранностью вагонного парка и обеспечивают выполнение подразделениями, не входящими в состав Дирекции инфраструктуры, требований, установленных нормативными документами ОАО «РЖД» и железной дороги.

Показано, что реляционные отношения позволяют снизить остроту несоответствий между задачами каждого подразделения ОАО «РЖД» и управленческими решениями, направленными на контроль сохранности вагонного парка.

**Ключевые слова:** повреждение вагона, сохранность вагонного парка, вагонное хозяйство, актор, капиталоцентрическая модель, реляционная стратегия, внутрифирменная реляция

#### Abstract

The intra-corporate relational space of JSC «RZD» in the sphere of the car fleet preservation is considered. The formed commercial and production ties between the participants of the relational process within the RZD Holding are shown and analyzed. Contradictions between the participants of the inner relational space are analyzed. There are suggested solutions which simplify the procedure of the control by the departments not included into the Directorate of the infrastructure for the car fleet preservation and provide the compliance of the requirements set by the legal documentations of JSC «RZD» and the railways.

It is shown that relational interactions let reduce the acuity of inconsistencies between the tasks of each department of JSC «RZD» and the management decisions directed to the control of the car fleet preservation.

**Keywords:** car damage, safety of car fleet, car equipment, actor, capital-centric model, relational strategy, inter-company relation

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-17-24

#### ВВЕДЕНИЕ

Представленная статья продолжает тематику научных исследований, посвященных организации обеспечения сохранности вагонного парка [1]. Авторы рассматривают направление развития ОАО «РЖД» в области сохранности вагонного парка как достижение реляционных отношений между всеми участниками рынка железнодорожных перевозок, учитывающих интересы собственников вагонов, владельца инфраструктуры и владельцев путей необщего пользования ОАО «РЖД» с внешней средой и механизма оценки сохранности вагонного парка при допуске вагонов на инфраструктуру.

Отметим, что авторы развивают реляционную стратегию ОАО «РЖД», основанную на формировании доверительных отношений между участниками реляционного контракта, именуемыми акторами. При этом подразумевается, что благодаря реляционной стратегии каждый актор будет обеспечен необходимыми доходами и капиталом.

#### ПОНЯТИЕ ВНУТРИФИРМЕННЫХ РЕЛЯЦИОННЫХ ОТНОШЕНИЙ

Реляционная стратегия наряду с созданием стратегических альянсов с внешней средой, т.е. другими участниками рынка железнодорожных перевозок, подразумевает разработку внутренней модели взаимодействия подразделений ОАО «РЖД», участвующих в процессе достижения необходимого уровня сохранности вагонного парка. Такая модель понимается как внутрифирменная реляция, описывающая взаимодействие внутри самого ОАО «РЖД», а также взаимодействия с дочерними подразделениями и обществами.

17

Октябрь–Декабрь

Применительно к железнодорожному транспорту термин «реляционные отношения» означает, что благодаря внутрифирменной реляции взаимосвязи между собственными подразделениями ОАО «РЖД» переходят на новый уровень, умножающий их значимость и результативность за счет новых технологий, существенно повышающих ожидаемый результат.

Взаимоотношения, при которых возрастает непосредственная роль каждого подразделения, называют внутренней реляционной средой.

Взаимоотношения между предприятиями внутри ОАО «РЖД» регулируются документами холдинга. Пакет документов по сохранности вагонного парка можно разделить на несколько больших групп. В рамках законодательных актов Российской Федерации это законы и уставы [2–5], а также стандарты, важнейшим из которых является ГОСТ 22235–2010 [6], однако, так как он носит рекомендательный характер, это приводит к существенным противоречиям между участниками рынка железнодорожных перевозок.

В ОАО «РЖД» главная ответственность за обеспечение сохранности вагонного парка возложена на работников вагонного хозяйства, руководящий орган которого — управление вагонного хозяйства. Основное структурное подразделение вагонного хозяйства — эксплуатационное вагонное депо, на которое непосредственно возложена задача по выявлению поврежденных вагонов и проведению профилактической работы с владельцами путей необщего пользования.

Внутренняя реляционная среда реализуется в виде правил, технологий и документов, которые формализуют обязанности каждого актора с целью обеспечивать поддержание исправного состояния грузового вагона [7]. Устанавливая производственные взаимоотношения с другими субъектами внутри ОАО «РЖД», управление вагонного хозяйства привносит в производственно-хозяйственную и управленческую деятельность систему обучения, документирования и кодификации бизнес-процессов по обеспечению сохранности вагонного парка.

При реляционных отношениях особенности заключения контракта состоят в отражении единых для всех предприятий, участвующих в контракте, связей и отношений, ценностей, норм и принципов, которые в результате выполнения контракта становятся общими для каждого актора. С учетом последовательности заключения контрактов этими принципами постепенно начинают руководствоваться все участники взаимоотношений, что формирует как внешнюю, так и внутреннюю реляционную среду.

### ДЕЙСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

Рассмотрим формирование внутреннего реляционного пространства ОАО «РЖД» в области сохранности вагонного парка. Основные задачи по обеспечению контроля за сохранностью вагонного парка решает служба вагонного хозяйства. В каждой службе работают старший инспектор по сохранности вагонного парка и инспекторы по сохранности вагонного парка в регионах. Например, на Свердловской железной дороге пять таких регионов (Екатеринбургский, Нижнетагильский, Сургутский, Пермский и Тюменский).

Внутри региональной дирекции инфраструктуры ключевая ответственность за содержание пути, согласно распоряжению [8], возложена на службу пути.

Служба автоматики и телемеханики несет ответственность за работу средств диагностики, узлов управления стрелочными переводами и горочных устройств. Здесь наиболее высокие риски повреждения вагонов на сортировочных горках от некачественной работы горочных замедлителей при торможении отцепов. Превышение скорости соударения вагонов на механизированных и автоматизированных сортировочных горках приводит к изломам деталей ударно-тяговых приборов, выбиванию пружин рессорного подвешивания тележек. Порядок содержания систем торможения и закрепления вагонов определен в распоряжении ОАО «РЖД» «Об утверждении инструкции по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки механизированных и автоматизированных сортировочных горок» [9]. На рис. 1 представлена структурная схема организации контроля за сохранностью вагонного парка на железной дороге.

Поскольку вагонное хозяйство, хозяйство автоматики и телемеханики, путевое хозяйство входят в Дирекцию инфраструктуры (ДИ), процесс управления сохранностью вагонного парка внутри этих подразделений находится в «одних руках», реализуется и контролируется в службе вагонного хозяйства. Внутри ДИ разрабатываются и осуществляются мероприятия по обеспечению сохранности вагонного парка. Примером реализации таких мероприятий является «Единый день горок», который ежемесячно проводится во всех регионах Свердловской железной дороги.

Основными структурными подразделениями, несущими риски повреждения вагонов, являются Дирекция по ремонту пути (ДРП) и Дирекция управления движением. На ДРП возложены задачи по организации всех видов ремонта и реконструкции железнодорожного пути, сооружений и земляного полотна в объемах, необходимых для безопасного пропуска поездов с установленными скоростями. Для выполнения этой задачи Дирекция инфраструктуры предоставляет ДРП вагоны необходимых моделей. Основу таких вагонов составляют платформы для перевозки рельсовых плетей с унифицированным съемным оборудованием (платформы УСО), также используются думпкары, хоппер-дозаторы для перевозки сыпучих грузов и ряд других вагонов. Правила предоставления и ответственности за сохранность вагонов определены распоряжением ОАО «РЖД» «Об утверждении Типового порядка взаимодействия между структурными подразделениями Центральной дирекции инфраструктуры и Центральной дирекции по ремонту пути по предоставлению вагонов для работы по ремонту инфраструктуры ОАО «РЖД» [10]. Риски повреждения вагонов собственности ДИ под ответственностью ДРП велики. Так, в 2022 г. в местах дислокации вагонов в границах Свердловской железной дороги было выявлено 176 поврежденных вагонов. Основными повреждениями вагонов, участвующих в путевых работах, являются отсутствие (повреждение) роликов УСО, повреждение кузова вагона, подножек, поручней соствителя, автосцепного оборудования.

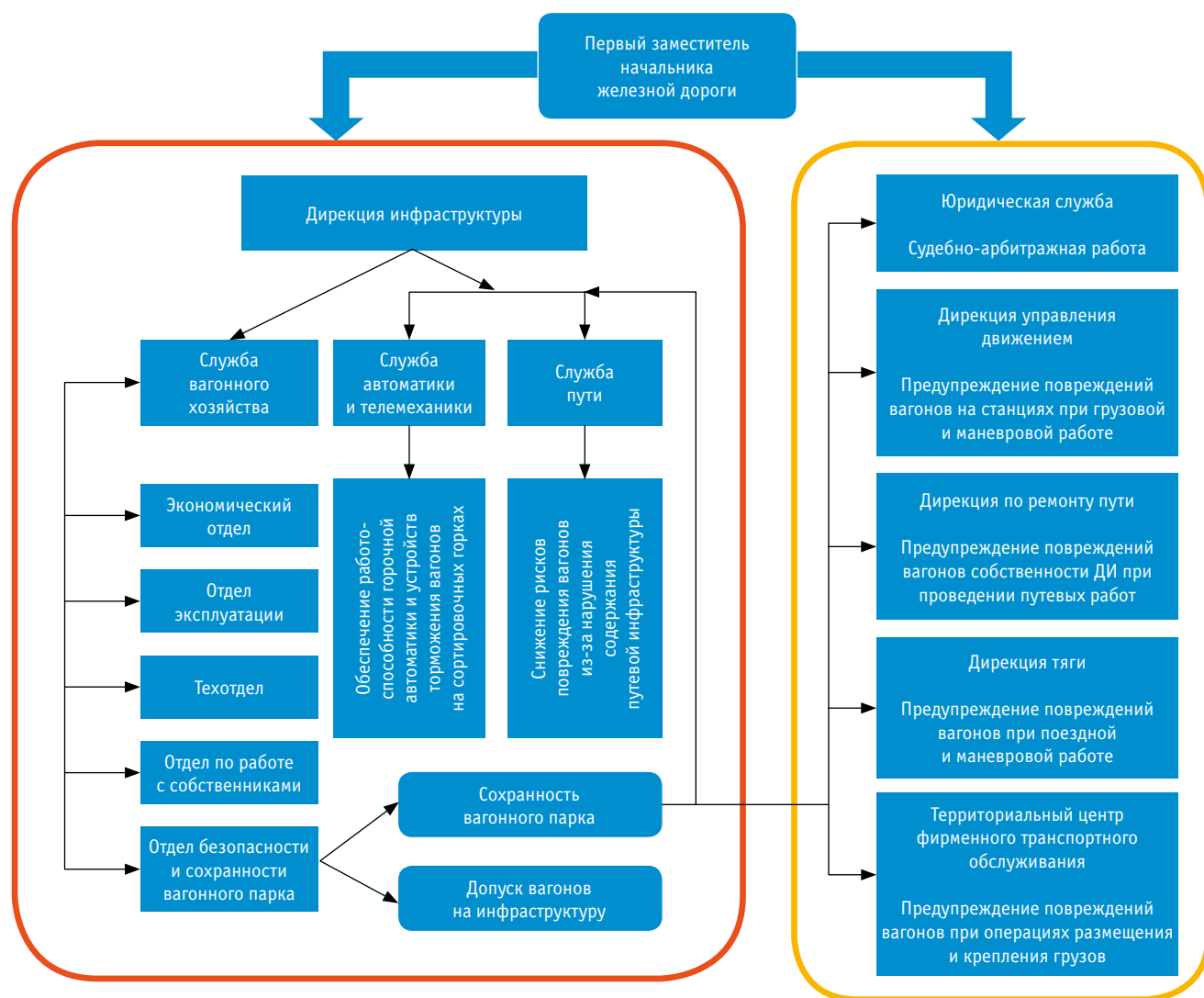


Рис. 1. Модель организации работ по обеспечению сохранности вагонного парка на железной дороге

Ответственность за повреждение вагонов в границах железнодорожной станции нормативными документами ОАО «РЖД», Министерства транспорта Российской Федерации и Министерства путей сообщения Российской Федерации возложена непосредственно на начальника станции [11, 12]. На крупных сортировочных станциях основные виды повреждений вагонов допускаются в результате нарушения технологии роспуска вагонов с сортировочной горки. Особо велики потери на немеханизированных сортировочных горках, где торможение вагонов осуществляется башмаками. Имеются данные об образовании ползунов при нарушениях режимов ведения поезда. Согласно [13], образование ползунов на колесных парах имеет эксплуатационную причину. Такие неисправности относятся к зоне ответственности Дирекции тяги и зависят от квалификации локомотивной бригады и качества подготовки составов в рейс.

Независимо от причин образования ползунов (торможение на горках либо образование в процессе эксплуатации) на месте ползунов впоследствии возникают выщербины, которые

приводят к отцепкам вагонов и предъявлению к ОАО «РЖД» претензий со стороны собственников подвижного состава.

Взаимодействие структурных подразделений внутри ОАО «РЖД» по вопросам обеспечения сохранности вагонного парка не что иное, как реляционные отношения, или внутрифирменная реляция. Ориентиром деятельности представителей вагонного хозяйства, участвующих в контроле за сохранностью вагонного парка, является поддержание на требуемом уровне сохранности вагонов путем реляционных взаимодействий, формирующих реляционную культуру ОАО «РЖД». То есть требуется организация таких связей и отношений, которые бы охватывали ценности, нормы и принципы, действующие в каждом структурном подразделении.

Поэтому реляционная стратегия ОАО «РЖД» как единого предприятия должна рассматриваться в качестве интеграционного процесса, который реализуется в виде правил и технологий, общих для всех структурных подразделений, и устанавливает нормы взаимоотношений между ними.

## ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

При рассмотрении внутрифирменной реляции следует понимать, что каждый из ее участников (акторов) стремится к максимуму собственного дохода, т.е. показателя основной деятельности, при минимизации собственного риска. Для оценки доходности основной деятельности каждого актора внутреннего реляционного пространства, как и при внешней реляции, используются следующие показатели ранжирования доходности:

неудовлетворительный,  $Er = 1$  — потенциал получения денежных доходов практически отсутствует;

удовлетворительный,  $Er = 2$  — имеется незначительный экономический эффект;

хороший,  $Er = 3$  — обеспечивается существенный эффект от дополнительных видов деятельности со стороны частного партнера на объекте сохранности вагонного парка;

отличный,  $Er = 4$  — высокий уровень получения чистого дисконтированного дохода, низкие финансовые риски или их отсутствие (стремление к 0).

В [1, 14] разработаны капиталозцентрические модели, описывающие состояние вагоноремонтного комплекса и парно-

го реляционного пространства при взаимодействии двух акторов. Взаимоотношения двух собственных структурных подразделений внутри капиталозцентрической модели относятся к первой сфере — микроэкономике.

На уровень сохранности вагонного парка оказывают влияние факторы микроэкономики, выявляющие как сильные, так и слабые стороны (табл. 1).

Цель — это конкретное конечное состояние или желаемый результат для органа управления по обеспечению сохранности вагонного парка. Цель не должна вступать в противоречие с задачами по обеспечению перевозочного процесса. Например, снижение скорости роспуска вагонов на механизированных и автоматизированных сортировочных горках приведет к сокращению числа повреждаемых вагонов, однако снизится перерабатывающая способность станции, что недопустимо. Одна из задач руководства — координация и согласование целей и задач подразделений для достижения общей цели. Сохранность вагонного парка состоит из многочисленных зависимостей, порядок управления которыми определен нормативными документами структурных подразделений (от линейных предприятий до ОАО «РЖД» в целом) на каждом этапе.

Таблица 1

Влияние внешних факторов на уровень сохранности вагонного парка

Фактор	Влияние	
	Благоприятное	Неблагоприятное
Объекты — вагоны и вагоноремонтная база	Слежение за сохранностью вагонного парка, модернизация деталей вагонов Обеспечение движения технически исправными вагонами Обеспечение сохранности перевозимых грузов	Значительный износ производственных фондов подвижного состава Кадры имеют свои цели, не всегда совпадающие с целью предприятия
Квалифицированный персонал	Наличие квалифицированных работников Направленность на прием молодых специалистов Укомплектованность штатов	Нет системы подготовки специалистов по сохранности вагонного парка Текущая текучесть кадров Большое количество документов по сохранности вагонного парка с взаимоисключающими требованиями при отсутствии цельного документа
Технология — способ решения поставленных задач	Рост механизации, автоматизации Внедрение достижений научно-технического прогресса Внедрение электронных форм учета повреждений вагонов	Устаревшее оборудование Примитивные технологии Изменения в технологии, требующие затрат на переподготовку персонала
Цель — конкретное конечное состояние или желаемый результат	Постоянная координация и согласованность цели (что приводит к достижению общей цели вагонного хозяйства) Наличие и знание цели (что приводит к стремлению ее достижения работниками вагонного хозяйства) Достижение цели требует адаптации вагонного хозяйства к текущей ситуации	Наличие у работников целей, не всегда совпадающих с общей целью
Организационная структура	Взаимосвязь подразделений ведет к достижению поставленных целей Высокий уровень управляемости отрасли Адаптация структуры к изменениям внешней среды	Жесткая централизация организации Отсутствие специалистов по сохранности вагонного парка в структурах
Соисполнители — смежные хозяйства	Контроль сохранности вагонного парка при отсутствии работников вагонного хозяйства, особенно на малодеятельных станциях	Большая зависимость от соисполнителей (от слаженности работников вагонного, локомотивного хозяйств и движения зависит безопасность движения, допуск вагонов на инфраструктуру)

Технология — это способ выполнения поставленных задач, включающий навыки и знания отдельных работников, оборудование, инструменты. Задачи и технологии связаны между собой действующими технологическими процессами. Например, процесс роспуска вагона на немеханизированной сортировочной горке включает в себя порядок применения вилки регулировщика скорости движения вагонов и безопасные условия труда [15].

Под организационной структурой управления понимается состав, взаимодействие, иерархия и порядок распределения работы по структурным и линейным подразделениям и их управляющим органам, между которыми формируются определенные отношения, связанные с реализацией управляющих полномочий, потоков распоряжений и информации. Основой для появления и функционирования того или иного типа организационной структуры управления на предприятии, а также залогом увеличения производительности является горизонтальное разделение труда, при котором весь объем работы разбивается на компоненты [16].

Процесс обеспечения сохранности вагонного парка внутри структурного подразделения железной дороги — это миниэкономика. Между структурными подразделениями дороги возникает реляционный контакт, задача которого — получить максимальный результат ( $\max v_i$ ) при минимальном риске ( $\min r_i$ ).

Доход между участниками реляционного контракта определяется по формуле

$$v_i = k_i v, \sum_i k_i = 1. \quad (1)$$

Применительно к реляционным внутрифирменным отношениям реляционная стратегия ОАО «РЖД» должна базироваться на двух компонентах. Первый — система увязанных целей (СУВ), второй — система увязанных мероприятий (СУМ).

Система увязанных целей является объединяющим компонентом. Она определяет общие задачи для железнодорожного транспорта, формулируется в действующих стандартах, ГОСТах, законах, отражая глобальную экономику в капиталоцентрической модели.

Система увязанных мероприятий включает внутренние распоряжения организации, затрагивающие интересы каждого актора. Для предприятий вагонного хозяйства, входящих в Дирекцию инфраструктуры, СУМ распространяется на основную деятельность, а для смежных подразделений, не входящих в структуру ДИ, совокупность увязанных мероприятий рассматривается как дополнение к результатам функционирования конкретного актора. Изменение в одном из мероприятий автоматически приводит к корректировке всей системы связанных с ним действий.

Таким образом, на внутрифирменные реляционные отношения значительное влияние оказывает именно система увязанных мероприятий. Для реализации СУМ в ОАО «РЖД» необходима координация бизнес-процессов, опирающихся на внутрифирменные отношения.

Систему увязанных мероприятий можно сформулировать как совокупность математических зависимостей [17]:

$$v_i = f_i(u_{ij}(t)), j = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_i u_{ij}(t) \leq U_j(t), j = 1, \dots, m, t = 1, \dots, T; \quad (3)$$

$$V = \sum_i v_i, \quad (4)$$

где  $v_i$  — прирост оценки от реализации  $i$ -го мероприятия при вложении в него  $u_{ij}$  ресурсов;  $u_{ij}$  — ресурсы  $j$ -го вида, вкладываемые в  $i$ -е мероприятие в период  $t$ ;  $U_j$  — максимальная величина ресурса  $j$ -го вида, которая может быть выделена под все мероприятия стратегии;  $m$  — количество видов ресурсов;  $n$  — число мероприятий, включенных в СУМ;  $T$  — число интервалов времени;  $V$  — общее значение желаемой оценки от реализации СУМ.

Как пример следует привести ежегодно разрабатываемые в ОАО «РЖД» и на дорогах мероприятия [18] по обеспечению сохранности вагонного парка, включающие в себя предупреждение повреждения вагонов на сортировочных горках, хищения деталей и узлов вагонов, повышение качества приемки вагонов после грузовых операций на путях необщего пользования и ряд других.

Для получения совершенной модели внутрифирменной реляции в модель описания реляционной стратегии целесообразно включить дополнительные математические соотношения:

$$\Delta v_{ik} = f_i(u_{kj}(t)), k = 1, \dots, n; \quad (5)$$

$$\sum_t \sum_j u_{ij}(t) = r_{ik} \sum_t \sum_j u_{kj}(t); \quad (6)$$

$$V = \sum_i (v_i + \sum_k \Delta v_{ik}), \quad (7)$$

где  $\Delta v_{ik}$  — изменение оценки от реализации  $i$ -го мероприятия при вложении  $u_{kj}$  ресурсов в  $k$ -е мероприятие;  $r_{ik}$  — коэффициент пропорциональности потребных ресурсов между  $i$ -м и  $k$ -м мероприятиями.

Совокупность функций  $f_i(u_{kj}(t))$  описывает взаимовлияние мер, включенных в реляционную стратегию ОАО «РЖД», которое проявляется через распределение по ним лимитируемых ресурсов и через последовательность реализации мероприятий.

И наконец, внутрифирменная реляция применительно к условиям ОАО «РЖД» учитывает роль каждого актора в реализации реляционной стратегии в целом и их действия:

$$J = \sum_i (v_i + \sum_k \Delta v_{ik}) + \sum_s \alpha_s h_s; \quad (8)$$

$$h_s = \varphi_s(u_{ij}(t)), j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n; s = 1, \dots, p, \quad (9)$$

где  $\alpha_s$  — коэффициент значимости показателя результативности  $s$ -го актора;  $h_s$  — показатель результативности  $s$ -го актора;  $p$  — число акторов, участвующих в реализации стратегии.

В этом аспекте реляционная стратегия объединяет плановые стратегические действия акторов и обеспечивает совокупность реляционных стратегических договоров.

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

Чтобы обеспечить функционирование внутрифирменной реляции, необходимо создать предпосылки к росту СУМ, учитывая

имеющиеся на дороге и в ОАО «РЖД» нормативные документы, распоряжения и приказы, касающиеся взаимодействия между структурными подразделениями. Наиболее весомым аргументом в таком случае является перевод управления сохранностью вагонного парка непосредственно под руководство ДИ с выделением в самостоятельное подразделение дирекции, осуществляющее деятельность по обеспечению сохранности вагонного парка в границах дороги (рис. 2).

## Выводы

1. Предлагаемые решения позволят значительно упростить процедуру контроля за сохранностью вагонного парка и обеспечить:

выполнение структурными подразделениями ОАО «РЖД», не входящими в состав Дирекции инфраструктуры, требуемых нормативных документов ОАО «РЖД» и дороги по вопросам обеспечения сохранности вагонов при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ;

соблюдение технологии и обеспечение качества ремонта поврежденных вагонов;

разработку общих нормативных документов для всех структурных подразделений дороги по вопросам обеспечения сохранности вагонов;

единый инспекторский контроль в границах дороги по вопросам обеспечения сохранности вагонного парка.

2. Реляционная стратегия ОАО «РЖД» должна быть направлена на формирование внутреннего реляционного пространства (внутрифирменной реляции) между структурными подразделениями, реализующими мероприятия по обеспечению сохранности вагонного парка. В рамках реляционной стратегии благодаря взаимообменным отношениям создаются партнерские преимущества, возрастает синергетический эффект от совместного действия подразделений-партнеров.

3. Реляционные отношения между подразделениями внутри ОАО «РЖД» позволят снизить остроту несоответствий между задачами каждого подразделения и управленческими решениями, направленными на контроль за сохранностью вагонного парка. Наличие общих звеньев свидетельствует о степени снижения неопределенности внутреннего рынка и о повышении уровня безопасного развития каждого подразделения.

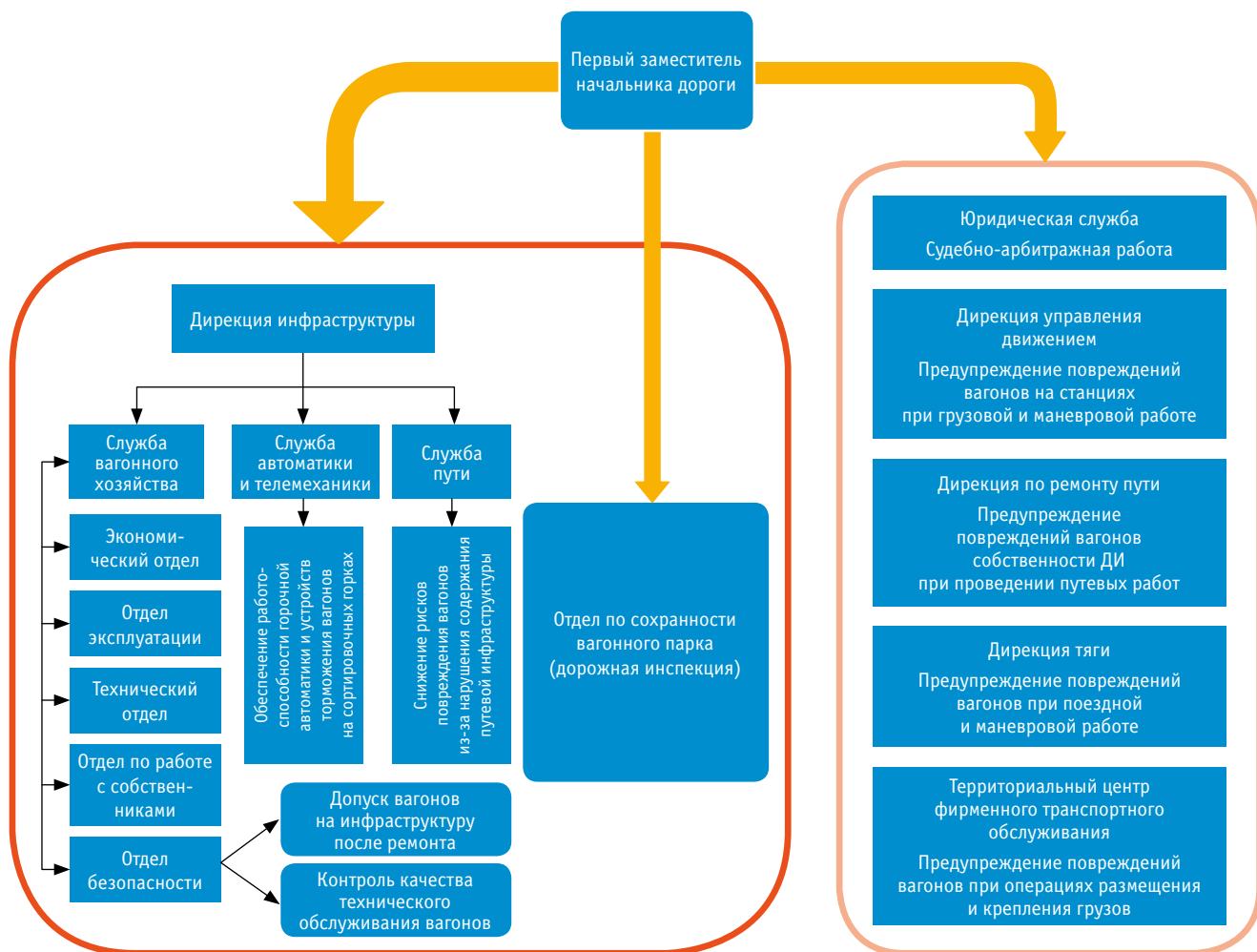


Рис. 2. Модель перспективной организации обеспечения и контроля сохранности вагонного парка в границах железной дороги

## Литература

1. Сирина Н. Ф., Свердлов В. Б. Реляционная стратегия обеспечения сохранности вагонного парка // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 22–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-22-27. ISSN 1815-9400.
2. О безопасности железнодорожного подвижного состава (ТР ТС-001–2011): технический регламент ТР ТС 001/2011 (с изменениями на 25.11.2022 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (дата обращения: 14.02.2023).
3. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации: Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 17-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838120> (дата обращения: 18.02.2023).
4. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации: Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ (с изменениями на 11.06.2022 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838121> (дата обращения: 18.02.2023).
5. Об утверждении правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 23.06.2022 г. № 250. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/316> (дата обращения: 15.02.2023).
6. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. Москва: Стандартинформ, 2011. 18 с.
7. Положение о порядке контроля сохранности грузовых вагонов при их приеме и перевозке на инфраструктуру ОАО «РЖД» и обеспечение их сохранности в процессе перевозки: утв. распоряжением ОАО «РЖД» 29.05.2020 г. № 1153/р. URL: [https://e-ecolog.ru/docs/JvFPI\\_oXGqTDCwUQ6\\_U6b?ysclid=llnk1455bm806175643](https://e-ecolog.ru/docs/JvFPI_oXGqTDCwUQ6_U6b?ysclid=llnk1455bm806175643) (дата обращения: 19.02.2023).
8. Об утверждении и введении в действие инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути: распоряжение ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288р. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/189> (дата обращения: 19.02.2023).
9. Об утверждении инструкции по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки механизированных и автоматизированных сортировочных горок: распоряжение ОАО «РЖД» от 30.01.2019 г. № 154/р.
10. Об утверждении Типового порядка взаимодействия между структурными подразделениями Центральной дирекции инфраструктуры и Центральной дирекции по ремонту пути по предоставлению вагонов для работы по ремонту инфраструктуры ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 29.09.2020 г. № 2136/р.
11. О мерах по повышению сохранности грузовых вагонов при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ и предотвращению случаев хищения их деталей: приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 08.09.1999 г. № 13 ЦЗ. URL: <http://umcздт74.ru/images/PDF/prikazMPS13CZ.pdf> (дата обращения: 15.02.2023).
12. О мерах по обеспечению сохранности вагонного парка при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ на полигоне Свердловской железной дороги: приказ начальника Свердловской железной дороги от 31.12.2019 г. № СВЕРД-477.
13. К ЖА 2005 05. Классификатор. Основные неисправности грузовых вагонов: утв. заседанием Комиссии Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций, протокол от 23–25

## References

1. Sirina N. F., Sverdlov V. B. Relational strategy of car fleet safety assurance [Relyatsionnaya strategiya obespecheniya sokhrannosti vagonnogo parka]. Transport of the Urals. 2022. No. 3 (74). Pp. 22–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-22-27. ISSN 1815-9400.
2. On safety of railway rolling stock (TR CU-001–2011) [O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (TR TS-001–2011)]. Technical regulations (with additions on 25.11.2022). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (access date: 14.02.2023).
3. On railway transport in the Russian Federation [O zheleznodorozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii]. Federal Law of the Russian Federation dated 10.01.2003 No. 17-FZ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838120> (access date: 18.02.2023).
4. The Constitution of railway transport of the Russian Federation [Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii]: Federal Law of the Russian Federation dated 10.01.2003 No. 18-FZ (with additions on 11.06.2022). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838121> (access date: 18.02.2023).
5. About the approval of rules of technical exploitation of the Russian Federation railways [Ob utverzhdenii pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii]: the Order of the Ministry of transport of the Russian Federation dated 23.06.2022 No. 250. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/316> (access date: 15.02.2023).
6. GOST 22235–2010. Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations [Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshhie trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovyykh rabot]. Moscow: Standardinform, 2011. 18 p.
7. Regulation about the order of the car fleet preservation control on their acceptance and transportation to the JSC «RZD» infrastructure and their safety in the transportation process [Polozhenie o poryakke kontrolya sokhrannosti gruzovykh vagonov pri ikh prieme i perevozke na infrastrukturu ОАО «RZD» i obespechenie ikh sokhrannosti v protsesse perevozki]: approved by the Order of JSC «RZD» from 29.05.2020 No. 1153/r. URL: [https://e-ecolog.ru/docs/JvFPI\\_oXGqTDCwUQ6\\_U6b?ysclid=llnk1455bm806175643](https://e-ecolog.ru/docs/JvFPI_oXGqTDCwUQ6_U6b?ysclid=llnk1455bm806175643) (access date: 19.02.2023).
8. About the approval and the enactment of the instruction on the current maintenance of railways [Ob utverzhdenii i vvedenii v deystvie instruksii po tekushhemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti]: the Order of JSC «RZD» dated 14.11.2016 No. 2288r. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/189> (access date: 19.02.2023).
9. About the approval of the instruction on technical exploitation of the units and systems of signaling, centralization, and blocking of mechanized and automated marshaling humps [Ob utverzhdenii instruksii po tekhnicheskoy ekspluatatsii ustroystv i sistem signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki mekhanizirovannykh i avtomatizirovannykh sortirovochnykh gorok]: the Order of JSC «RZD» dated 30.01.2019 No. 154/r.
10. About the approval of the Typical order of interactions between the structural departments of the Central Directorate of the infrastructure and the Central Directorate on tracks mending on the provision of cars for the work on mending the JSC «RZD» infrastructure [Ob utverzhdenii Tipovogo poriyadka vzaimodeystviya mezhdru struktturnymi podrazdeleniyami Tsentral'noy direktsii infrastruktury i Tsentral'noy direktsii po remontu puti po predstavleniyu vagonov dlya raboty po remontu infrastruktury ОАО «RZD»]: the Order of JSC «RZD» dated 29.09.2020 No. 2136/r.
11. About the measures of the increase of the safety of freight cars under the loading-unloading and shunting operations and the prevention of the cases of their parts theft [O merakh po povysheniyu sokhrannosti gruzovykh vagonov pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovyykh rabot i predotvrashheniyu sluchaev khishheniya ikh detaley]: the Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 08.09.1999 No. 13 TsZ. URL: <http://umcздт74.ru/images/PDF/prikazMPS13CZ.pdf> (access date: 15.02.2023).
12. About the measures to provide car fleet preservation under the loading-unloading and shunting operations at the site of the Sverdlovsk railway [O merakh po obespecheniyu sokhrannosti vagonnogo parka pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovyykh rabot na poligone Sverdlovskoy zheleznoy dorogi]: the Order of Head of Sverdlovsk Railway dated 31.12.2019 No. SVERD-477.



марта 2004 г. URL: <https://e-ecolog.ru/docs/uP39hnbu8v3vIMTzl-mhj?ysclid=llnkc05k3530974739> (дата обращения: 09.02.2023).

14. Сирина Н. Ф. Капиталоцентрическая модель вагонного хозяйства // Проблемы транспорта Дальнего Востока: материалы шестой Международной научно-практической конференции, Владивосток, 5–7 октября 2005 г. Владивосток : Дальневосточное отделение Российской академии транспорта, 2005. С. 60–62.
15. Инструкция по охране труда для регулировщика скорости движения вагонов железнодорожной станции ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.07.2020 г. № 1449/р (ред. от 13.03.2023 г.). URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjzhenie-oao-rzhd-ot-07072020-n-1449r-ob-utverzhdenii/?ysclid=llnknhbwj8393263101> (дата обращения: 09.02.2023).
16. Минцберг Г. Менеджмент. Природа и структура организаций. URL: <https://iknigi.net/avtor-genri-mincberg/162480-menedzhment-priroda-i-struktura-organizaciy-genri-mincberg.html> (дата обращения: 09.02.2023).
17. Глухов В. В., Левенцов В. А. Экономико-математическая модель реляционной стратегии промышленного предприятия // *π-Economy*. 2022. Т. 15. № 2. С. 117–129. DOI: DOI: 10.18721/JE.15208. ISSN 2782–6015.
18. Организационно-технические мероприятия по обеспечению сохранности вагонного парка при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ, недопущению случаев хищения узлов и деталей подвижного состава на Свердловской железной дороге на 2022 год: утв. первым заместителем начальника Свердловской железной дороги 27.12.2021 г. № 76 НЗ1–891.
13. CRWA 2005 05. Classifier. The main malfunctions of freight railcars [KZhA 2005 05. Klassifikator. Osnovnye neispravnosti грузовых вагонов] : approved by the Commission of the Council for Railway Transport of Authorized Representatives of the Railway Carriage Economy of Railway Administrations, protocol of March 23–25, 2004. URL: <https://e-ecolog.ru/docs/uP39hnbu8v3vIMTzl-mhj?ysclid=llnkc05k3530974739> (access date: 09.02.2023).
14. Sirina N. F. Capital-centric model of car services [Kapitalotsentricheskaya model' vagonnogo khozyaystva]. Transport problems of the Far East. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference, October 5–7, 2005. Vladivostok : Far East branch of Russian Academy of Transport, 2005. Pp. 60–62.
15. Labor safety instruction for the regulator of the speed of cars of JSC «RZD» railway station [Instruktsiya po ohrane truda dlya regulirovshhika skorosti dvizheniya vagonov zheleznodorozhnoy stantsii OAO «RZhD»] : approved by the Order of JSC «RZD» from 07.07.2020 No. 1449/r (in the edition of 13.03.2023). URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjzhenie-oao-rzhd-ot-07072020-n-1449r-ob-utverzhdenii/?ysclid=llnknhbwj8393263101> (access date: 09.02.2023).
16. Mintsberg G. Management. Nature and structure of companies [Menedzhment. Priroda i struktura organizatsiy]. URL: <https://iknigi.net/avtor-genri-mincberg/162480-menedzhment-priroda-i-struktura-organizaciy-genri-mincberg.html> (access date: 09.02.2023).
17. Glukhov V. V., Leventsov V. A. Economic-mathematical model of the relational strategy of an industrial enterprise [Ekonomiko-matematicheskaya model' relyatsionnoy strategii promyshlennogo predpriyatiya]. *π-Economy*. 2022. Vol. 15. No. 2. Pp. 117–129. DOI: DOI: 10.18721/JE.15208. ISSN 2782-6015.
18. Organization and technical activities for providing car fleet preservation under the loading-unloading and shunting operations, prevention of the cases of theft of knots and parts of a rolling-stock on the Sverdlovsk Railway for 2022 [Organizatsionno-tehnicheskie meropriyatiya po obespecheniyu sokhrannosti vagonnogo parka pri proizvodstve pogruchno-razgruzochnykh i manevrovnykh rabot, nedopushheniyu sluchaev khishheniya uzlov i detaley podvizhnogo sostava na Sverdlovskoy zheleznoy doroge na 2022 god] : approved by First deputy chief of Sverdlovsk Railway from 27.12.2021 No. 76 NZ1-891.

Объем статьи 1 авторский лист

УДК 656.078

**Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии Российской Федерации, президент Научно-производственного холдинга «СТРАТЕГ», Москва, Россия,**

**Ильдар Салимович Абдуллаев, кандидат технических наук, заместитель начальника Управления комплексной экспертизы проектов ОАО «РЖД», Москва, Россия,**

**Олег Викторович Осокин, доктор технических наук, директор ООО «Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм», Москва, Россия,**

**Николай Васильевич Якушев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## О ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКАХ, КАНАЛАХ И ОЧЕРЕДЯХ

**Petr Alexeevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, Laureate of the State Prize of the Russian Federation, President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,**

**Ildar Salimovich Abdullaev, PhD in Engineering, Deputy Head of Division for Complex Examination of the JSC «RZD» Projects, Moscow, Russia,**

**Oleg Viktorovich Osokin, DSc in Engineering, Director of «Analytical and controlling systems on transport traffic accidents algorithm» LLC, Moscow, Russia,**

**Nikolay Vasilyevich Yakushev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

## About transport flows, canals, lines

### Аннотация

В статье рассматриваются разные виды транспортных потоков, их свойства и возникающие очереди. Авторы анализируют три типа потока — организованный, дезорганизованный и смешанный (последний, в свою очередь, состоит из двух частей — случайной и управляемой), исследуют их свойства. Установлено, что при определенном соотношении частей свойства смешанного потока соответствуют свойствам равномерного.

**Ключевые слова:** транспортный поток, организация, дезорганизация, случайность, управление

### Abstract

The article analyses several types of transport flows, their features, and lines appearing. The authors analyze and research the features of three types of flows — organized, disorganized, and mixed (the last in its turn consists of two parts — random and controlled). It is defined that under a definite ratio of parts the features of the mixed flow are equal to those of the uniform one.

**Keywords:** transport flow, organization, disorganization, randomness, control

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-25-26

**В** исследованиях, особенно в диссертациях, часто совершают серьезную ошибку — любой неравномерный транспортный поток рассматривают как случайный. Однако в общем случае это не так. И чрезмерное применение теории вероятностей приводит к грубым ошибкам в расчетах (отметим, что некоторые аспекты этой проблемы уже рассматривались в статьях [1–4]).

Итак. Перед каналами обслуживания (такими как горка, грузовой фронт и др.) образуются, как правило, очереди. Причиной является дезорганизация в потоке и канале. Определим необходимые понятия.

**Дезорганизация** — это свойство канала или потока создавать очередь. С точки зрения дезорганизации потоки можно разделить на три класса.

**Дезорганизованный поток.** Неравномерный поток, который никак не подстраивается к ритмам канала. Его частным случаем является **случайный поток**, который соответствует требованиям теории вероятностей.

**Организованный (управляемый) поток.** Управляемые колебания пото-

ка полностью совпадают со случайными колебаниями канала. При этом очереди не возникает. Управляемый поток уничтожает очередь, которую создавал бы канал даже при равномерном потоке.

**Частично организованный (смешанный) поток.** По сути он состоит из двух составляющих: дезорганизованной (случайной) и организованной (управляемой).

В дальнейшем для простоты изложения будем использовать привычную терминологию, т.е. под организованным потоком будем понимать управляемый, а под дезорганизованным — случайный.

Для единого описания всех видов потока необходимо ввести новый параметр — уровень дезорганизации  $\rho$ . Этот параметр имеет, конечно, некоторый количественный смысл, но его нельзя непосредственно использовать в расчетных формулах. Здесь как раз важно смысловое значение параметра. В некотором приближении его можно сопоставить с коэффициентом вариации случайного потока.

Тогда можно записать, что средняя очередь  $M$  является функцией  $\rho$ :

$$M = f(\rho).$$

Но очередь состоит из двух частей — создаваемой каналом  $\rho_k$  и создаваемой потоком  $\rho_{\Pi}$ . То есть

$$\rho = \rho_k + \rho_{\Pi}.$$

Вместе с тем смешанный поток  $\rho_{\Pi}$  тоже состоит из двух частей: это  $\rho_{\Pi}^+$  для случайной составляющей и  $\rho_{\Pi}^-$  — для управляемой:

$$\rho_{\Pi} = \rho_{\Pi}^+ + (-\rho_{\Pi}^-).$$

Знак минус означает, что «минус дезорганизация» есть «организация».

При равенстве составляющих параметр дезорганизации равен нулю, и соответственно смешанный поток в данном случае не создает очереди, если:

$$\rho_{\Pi}^+ = \rho_{\Pi}^-; \rho_{\Pi} = 0; M = 0.$$

Экспериментами на имитационной модели это было доказано следующим образом.

Этап 1. В бункер 1 подается равномерный поток. Возникает средняя очередь  $M_{оч1}$  (рис. 1).

Этап 2. Перед бункером 1 ставится бункер 2, в который подается случайный поток (рис. 2).

Перед бункером 2 возникает средняя очередь  $M_{оч2}$ . Но при этом изменяется очередь  $M_{оч1}$ .

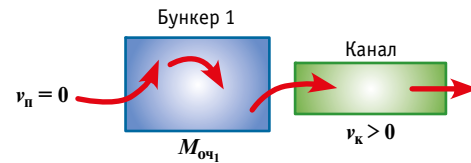
Изменяя емкость бункера 2, в эксперименте добились того, что очереди  $M_{оч1}$  в обоих экспериментах стали равны. Естественно было ожидать, что из бункера 2 в бункер 1 подается равномерный поток. Но он оказался неравномерным.

То есть в бункер 1 начал поступать смешанный поток с практически равными составляющими — управляемой и случайной. По уровню дезорганизации смешанный поток стал соответствовать равномерному.

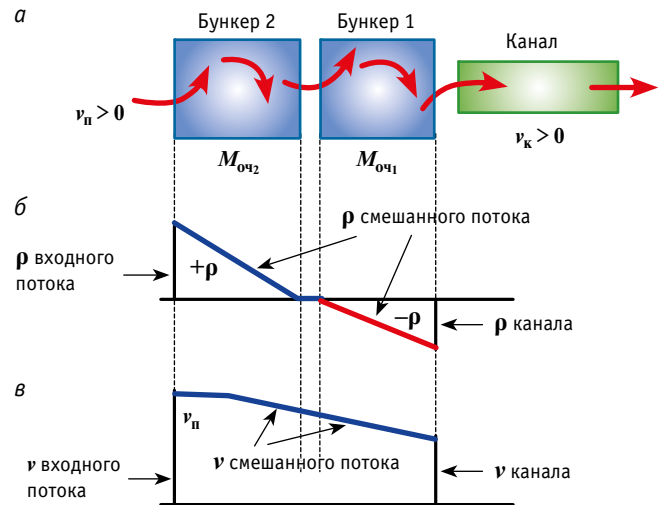
Это весьма важный вывод. Ибо в диссертациях, как правило, любой неравномерный поток рассматривается как случайный, выводятся соответствующие закономерности, а в результате совершается грубая ошибка.

Исследовать систему со смешанными потоками необходимо только на имитационной модели.

Оценить величину управляемой части можно, например, так.



**Рис. 1. Преобразование потока в комплексе «бункер — канал»:**  
 $v_{\Pi}$  и  $v_k$  — коэффициенты вариации потока и канала соответственно



**Рис. 2. Преобразование потока в комплексе «бункер — бункер — канал»:**

*a* — схема движения потока в комплексе «бункер — бункер — канал»;  
*б* — уровень дезорганизации потока при его преобразовании;  
*в* — коэффициент вариации потока при его преобразовании;  
 $\rho$  — уровень дезорганизации

Допустим, на сортировочную станцию поступает некоторый неравномерный поток. Время отпуска тоже колеблется.

Вариант 1. Считаем случайными и интервалы между моментами прибытия поездов, и продолжительность отпуска. Определяем параметры случайных процессов. Рассчитываем среднюю очередь по теории массового обслуживания.

Вариант 2. Задаем реальный поток с конкретными моментами прибытия поездов. Имитационная модель выдает динамику очереди, определяем ее среднюю величину. Отношение разницы средних очередей к очереди из модели массового обслуживания покажет долю в потоке управляемой составляющей.

## Литература

1. Козлов П. А., Владимирская И. П., Осокин О. В. Закономерности структурного взаимодействия в транспортных системах // Транспорт Урала. 2010. № 3 (26). С. 25–28. ISSN 1815-9400.
2. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О технологии расчета железнодорожных станций // Железнодорожный транспорт. 2017. № 6. С. 42–46. ISSN 0044-4448.
3. Козлов П. А., Пермикин В. Ю. Преобразование потока в транспортных процессах // Наука и техника транспорта. 2013. № 2. С. 50–56. ISSN 2074-9325.
4. Козлов П. А., Тушин Н. А. Взаимодействие структуры с частично управляемым потоком // Наука и техника транспорта. 2016. № 4. С. 31–35. ISSN 2074-9325.

## References

1. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P., Osokin O. V. Principles of structural interaction in transport system [Zakonomernosti strukturnogo vzaimodeystviya v transportnykh sistemakh]. Transport of the Urals. 2010. No. 3 (26). Pp. 25–28. ISSN 1815-9400.
2. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. On the technology of calculating of railway stations [O tekhnologii rascheta zheleznodorozhnykh stantsiy]. Railway Transport. 2017. No. 6. Pp. 42–46. ISSN 0044-4448.
3. Kozlov P. A., Permikin V. Yu. Car flow transformation in transport processes [Preobrazovanie potoka v transportnykh protsessakh]. Science and technology in transport. 2013. No. 2. Pp. 50–56. ISSN 2074-9325.
4. Kozlov P. A., Tushin N. A. Interaction of a structure and a partially controlled traffic current [Vzaimodeystvie struktury s chastichno upravlyаемым potokom]. Science and technology in transport. 2016. No. 4. Pp. 31–35. ISSN 2074-9325.

Объем статьи 0,22 авторских листа

УДК 656.222.6

**Вадим Юрьевич Пермикин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Александр Эрнстович Александров**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Игорь Александрович Ковалев**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Александр Владимирович Сурин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Владислав Владиславович Лесных**, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕЗДООБРАЗОВАНИЯ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛОКОМОТИВНЫМИ БРИГАДАМИ

**Vadim Yuryevich Permikin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Alexander Ernstovich Alexandrov**, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Igor Alexandrovich Kovalev**, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Alexander Vladimirovich Surin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Vladislav Vladislavovich Lesnykh**, postgraduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

## Optimal train formation model at a marshalling station taking into account the provision of locomotive crews

### Аннотация

Эффективность использования локомотивного и вагонного парков на сети железных дорог во многом определяется качеством планирования поездообразования на сортировочных станциях. Автоматизация планирования предполагает использование математических моделей. В статье дано описание оптимизационной потоковой модели основной технологической линии сортировочной станции. Особенность этой модели заключается в том, что в ней удалось адекватно отобразить не только процесс перемещения вагонопотока на каждой стадии переработки (при подготовке составов к расформированию, при их расформировании, при накоплении вагонов в сортировочном парке, при окончании формирования составов и перестановке их в парк отправления, при подготовке составов к отправлению и отправлении их со станции), но и важную часть процесса поездообразования — обеспечение сформированных поездов локомотивными бригадами. Предполагается, что модель будет использоваться в автоматизированной системе управления и позволит улучшить натуральные и экономические показатели работы сложной транспортной системы — сортировочной станции.

**Ключевые слова:** сортировочная станция, технологическая линия, ритм накопления составов, управление поездообразованием, обеспечение локомотивными бригадами, автоматизация оперативного планирования, математическая модель, линейное программирование, оптимальное решение

### Abstract

The efficiency of using locomotive and carriage fleets on the railway network is largely determined by the quality of train formation planning at marshalling stations. Automation of planning involves the use of mathematical models. The article describes the optimization flow model of the main technological line of a marshalling station. An important feature of this model is that it was able to adequately reflect not only the process of moving car flow at each stage of processing (when preparing trains for disbandment, during their disbandment, while accumulating cars in the marshalling yard, at the end of the formation of trains and rearranging them into the fleet departure, when preparing trains for departure and when leaving the station) also including an important part of the train formation process which is the provision of formed trains with locomotive crews. It is assumed that the model will be used in an automated control system and will improve the natural and economic performance of a complex transport system — a marshalling station.

**Keywords:** marshalling station, technological line, train accumulation rhythm, train formation control, provision of locomotive crews, automation of operational planning, mathematical model, linear programming, optimal solution

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-27-33

## ВВЕДЕНИЕ

Представленная статья является продолжением работы [1] по созданию и использованию модели текущего планирования сортировочной станции на основе частично целочисленной задачи линейного программирования в динамической постановке. Развитие подхода, описанного ранее, заключается в расширении постановки задачи за счет учета увязки локомотивных бригад и сформированных составов. Новый вариант позволяет дополнить оптимизационный контур, включить в него не только составо-, но и поездообразование. Исследование базируется на аппарате линейного программирования и опыте решения задач в работах [2–18].

Описание задачи в данной статье можно рассматривать как замену раздела «Подсистема «формирование — отправление» из работы [1].

## ОТОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ И ОПЕРАЦИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ И ОТПРАВЛЕНИЮ ПОЕЗДОВ

Пусть в подсистеме имеется  $N$  назначений плана формирования,  $j = 1, \dots, N$ , и  $P$  путей парка отправления,  $k = 1, \dots, P$ , специализированных для выставки сформированных составов  $j$ -го назначения. Составы формируются на  $R$  направлений отправления,  $l = 1, \dots, R$ . Будем считать, что в рамках одного расчета каждое  $j$ -е назначение плана формирования входит только в одно направление, т. е.:

$$\forall j \in N_l \exists! N_l; \quad (1)$$

$$N = N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_l; \quad (2)$$

$$N_1 \cap N_2 \cap \dots \cap N_l = \emptyset, \quad (3)$$

где  $N_l$  — множество назначений плана формирования, входящих в одно направление.

Для описания продвижения потока при накоплении и последующих операциях (при формировании, обработке по отправлению и отправлении) введем в задачу следующие переменные, отображающие основные указанные этапы технологии:

$x_j^H(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения при накоплении в сортировочном парке;  $x_{jk}^{\Phi}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми производится формирование состава и перестановка на  $k$ -й путь отправления;  $x_{kl}^{\text{OTO}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, ожидающих осмотра по отправлению на  $k$ -м пути отправления;  $x_{kl}^{\text{TO}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми выполняется осмотр по отправлению на  $k$ -м пути отправления;  $x_{kl}^{\text{OTR}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, ожидающих опробования тормозов по отправлению на  $k$ -м пути отправления;  $x_{kl}^{\text{TP}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми выполняется опробование тормозов по отправлению на  $k$ -м пути отправления;  $x_{kl}^{\text{OF}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, ожидающих отправления (нитки графика) на  $l$ -е направление с  $k$ -го пути;  $x_{kl}^{\text{O}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, отправленных на  $l$ -е направление с  $k$ -го пути.

Для отображения отправления поездов по ниткам графика для каждого  $k$ -го пути, с которых возможно отправление поездов на  $l$ -е направление, введем переменную  $x_{kl}^{\text{OP}}(t)$  — ис-

пользование нитки графика при отправлении поезда на  $l$ -е направление с  $k$ -го пути парка отправления в момент времени  $t$ .

Возможные моменты отправления на каждое  $l$ -е направление для каждого момента  $t$  укажем в виде констант  $G_l(t)$  со значением  $(0; 1)$ , где 0 будет означать, что нитки поезда на данное направление в момент времени  $t$  нет, 1 — нитка графика существует. По сути, таким образом задается график по отправлению для каждого направления.

Поскольку каждый этап обработки (кроме простоя под накоплением) состав должен пройти целиком, введем в задачу булевы переменные:

$b_{jk}^{\Phi}(t)$  — выполняется формирование состава  $j$ -го назначения с перестановкой на  $k$ -й путь отправления,

$$b_{jk}^{\Phi}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав формируется;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_{kl}^{\text{OTO}}(t)$  — состав ожидает осмотра по отправлению на  $k$ -м пути на  $l$ -е направление,

$$b_{kl}^{\text{OTO}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает осмотра;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_{kl}^{\text{TO}}(t)$  — состав проходит осмотр по отправлению на  $k$ -м пути на  $l$ -е направление,

$$b_{kl}^{\text{TO}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав проходит осмотр;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_{kl}^{\text{OTR}}(t)$  — состав ожидает опробования тормозов на  $k$ -м пути на  $l$ -е направление,

$$b_{kl}^{\text{OTR}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает опробования тормозов;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_{kl}^{\text{TP}}(t)$  — состав проходит опробование тормозов на  $k$ -м пути на  $l$ -е направление,

$$b_{kl}^{\text{TP}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав проходит опробование тормозов;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_{kl}^{\text{OF}}(t)$  — состав ожидает отправления (нитки графика) на  $k$ -м пути на  $l$ -е направление,

$$b_{kl}^{\text{OF}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает отправления;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$$b_{kl}^{\text{I}}(t) — отправление поезда на  $l$ -е направление с  $k$ -го пути,$$

$$b_{kl}^{\text{I}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если поезд отправлен;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Схема сети задачи укрупненно представлена на рис. 1.

Обозначим через  $c_j(t)$  расходы (затраты) на простой вагонов  $j$ -го назначения в сортировочном парке, а через  $c_k(t)$  — расходы (затраты) на простой вагонов в парке отправления. В общем случае указанные расходы могут быть одинаковыми, например, это может быть приведенная к такту задачи стоимость вагоно-часа простоя на станции.

Цель нашей задачи — разработка оптимального режима для подсистемы «формирование — отправление», при котором затраты на простои вагонов в сортировочном парке и в парке отправления будут минимальны:

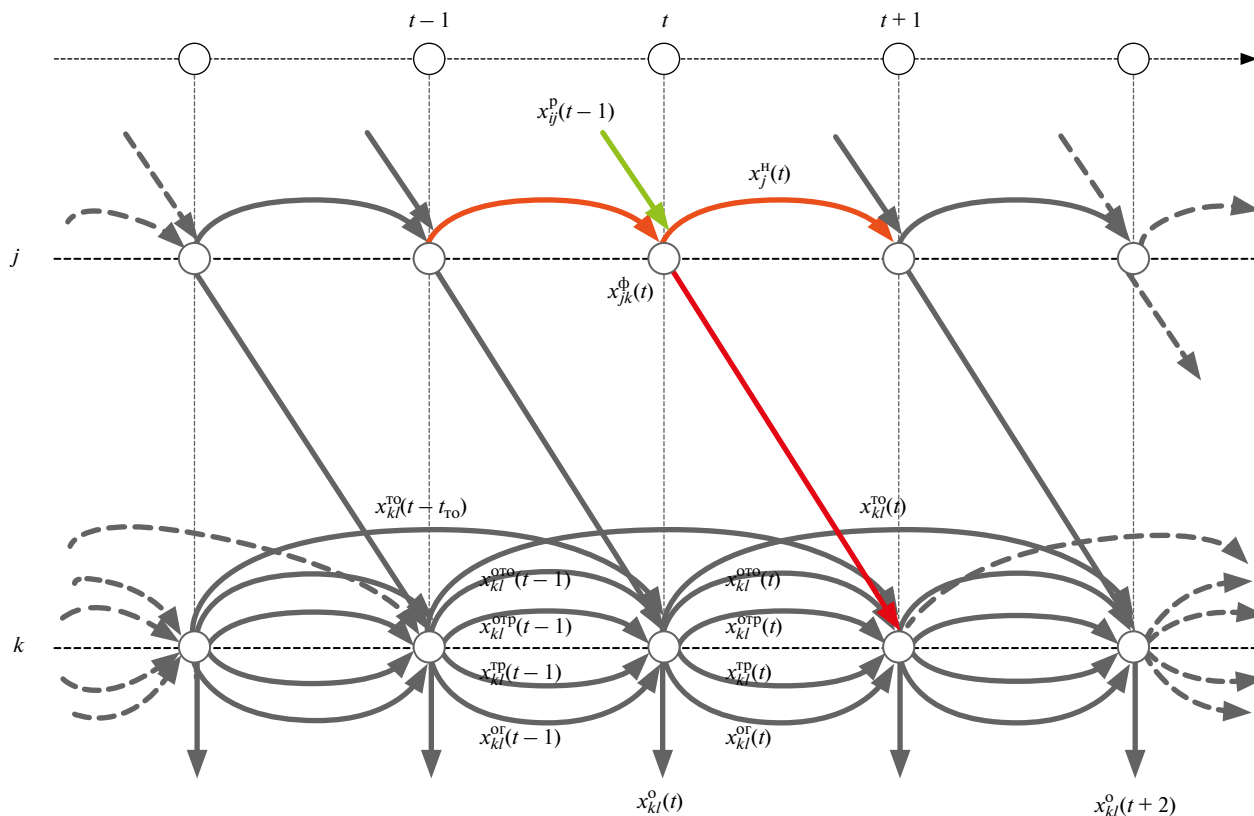


Рис. 1. Формирование и перестановка на путь отправления

$$\begin{aligned}
 F_a = & \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^H(t) + \sum_j \sum_k \sum_t c_j(t) x_{jk}^\Phi(t) + \\
 & + \sum_l \sum_k \sum_t c_k(t) x_{kl}^{OTO}(t) + \sum_l \sum_k \sum_t c_k(t) x_{kl}^{TO}(t) + \\
 & + \sum_l \sum_k \sum_t c_k(t) x_{kl}^{OTP}(t) + \sum_l \sum_k \sum_t c_k(t) x_{kl}^{TP}(t) + \\
 & + \sum_l \sum_k \sum_t c_k(t) x_{kl}^{OT}(t) \rightarrow \min.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Задача решается при ограничениях, основные из которых базируются на балансовых уравнениях узлов развернутой во времени сети. Важно учитывать следующие условия:

состав должен проходить все этапы обработки последовательно;

все этапы обработки после накопления состав должен проходить целиком;

количество ресурсов технического обслуживания (например, бригад осмотра) может быть ограниченным;

перестановка всего состава возможна только на один путь парка отправления;

имеются ограничения путевого развития станции (количество районов формирования, одновременно работающих локомотивов формирования и т.п.).

Опишем основные ограничения задачи в данной подсистеме станции.

Для каждого  $j$ -го назначения плана формирования: для первого такта

$$\sum_{j=1}^1 \left( x_j^H(t) - \sum_k x_{jk}^\Phi(t) \right) = 0; \quad (5)$$

для тактов  $t \in [2 \dots T-1]$

$$\sum_{j=1}^{T-1} \left( x_j^H(t-1) - x_j^H(t) + \sum_i x_{ij}^p(t-1) - \sum_k x_{jk}^\Phi(t) \right) = 0. \quad (6)$$

Для отображения формирования и перестановки составов с пути накопления на путь отправления согласно норме (длине) накопления на соответствующее направление введем в задачу ограничения

$$\sum_j \sum_t \sum_k \left( x_{jk}^\Phi(t) - L_l b_{jk}^\Phi(t) \right) = 0, \quad (7)$$

где  $L_l$  — норма (длина) накопления на  $l$ -е направление, в которое входит рассматриваемое  $j$ -е назначение.

Ограничим возможность одновременной перестановки составов нескольких назначений на один путь отправления

$$\sum_k \sum_t \sum_j b_{jk}^\Phi(t) \leq 1; \quad (8)$$

составов одного назначения на несколько путей отправления

$$\sum_j \sum_\tau \sum_k b_{jk}^\Phi(t) \leq 1. \quad (9)$$

Ограничение (8) необходимо в ситуациях, когда возможная вместимость одного или нескольких путей отправления позволяет разместить на пути более одного накопленного состава нескольких назначений для исключения одновременной перестановки разных назначений на один путь отправления.

Ограничение (9) необходимо, когда количество вагонов данного назначения на пути накопления в момент времени  $t$  в два или более раз превышает норму (длину) накопления или формирования, для исключения возможности одновременного формирования и перестановки нескольких составов (подач) одного назначения на несколько путей отправления.

Далее описаны ограничения, позволяющие учитывать основные взаимоисключающие ситуации с составом  $j$ -го назначения  $l$ -го направления на  $k$ -м пути парка отправления в момент времени  $t$ .

Для каждого  $l$ -го направления и каждого  $k$ -го пути отправления:

для первого такта

$$\sum_{t=1}^1 \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTO}}(t) + x_{kl}^{\text{TO}}(t)) = 0; \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^1 \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTP}}(t) + x_{kl}^{\text{TP}}(t)) = 0; \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^1 \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OF}}(t) + x_{kl}^{\text{O}}(t)) = 0; \quad (12)$$

для тактов  $t \in [2...t_{\text{TO}}^0]$ , где  $t_{\text{TO}}^0$  — продолжительность ТО по отправлению в тактах модели,

$$\sum_{t=2}^{t_{\text{TO}}^0} \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTO}}(t) + x_{kl}^{\text{TO}}(t) - x_{kl}^{\text{OTO}}(t-1) - \sum_{j \in N_l} x_{jk}^\Phi(t-1)) = 0; \quad (13)$$

$$\sum_{t=2}^{t_{\text{TO}}^0} \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTP}}(t) + x_{kl}^{\text{TP}}(t) - x_{kl}^{\text{OTP}}(t-1)) = 0; \quad (14)$$

$$\sum_{t=2}^{t_{\text{TO}}^0} \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OF}}(t) + x_{kl}^{\text{O}}(t) - x_{kl}^{\text{OF}}(t-1) - x_{kl}^{\text{TP}}(t-1)) = 0; \quad (15)$$

для тактов  $t \in [(t_{\text{TO}}^0 + 1)...T]$

$$\sum_{t=t_{\text{TO}}^0+1}^T \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTO}}(t) + x_{kl}^{\text{TO}}(t) - x_{kl}^{\text{OTO}}(t-1) - \sum_{j \in N_l} x_{jk}^\Phi(t-1)) = 0; \quad (16)$$

$$\sum_{t=t_{\text{TO}}^0+1}^T \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTP}}(t) + x_{kl}^{\text{TP}}(t) - x_{kl}^{\text{OTP}}(t-1) - x_{kl}^{\text{TO}}(t-t_{\text{TO}}^0)) = 0; \quad (17)$$

$$\sum_{t=t_{\text{TO}}^0+1}^T \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OF}}(t) + x_{kl}^{\text{O}}(t) - x_{kl}^{\text{OF}}(t-1) - x_{kl}^{\text{TP}}(t-1)) = 0. \quad (18)$$

Для отображения обработки состава на каждом этапе целиком вводим следующие ограничения:

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTO}}(t) - L_l b_{kl}^{\text{OTO}}(t)) = 0, \quad (19)$$

где  $L_l$  — норма (длина) накопления на  $l$ -е направление отправления;

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{TO}}(t) - L_l b_{kl}^{\text{TO}}(t)) = 0; \quad (20)$$

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTP}}(t) - L_l b_{kl}^{\text{OTP}}(t)) = 0; \quad (21)$$

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{TP}}(t) - L_l b_{kl}^{\text{TP}}(t)) = 0; \quad (22)$$

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OF}}(t) - L_l b_{kl}^{\text{OF}}(t)) = 0; \quad (23)$$

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{O}}(t) - L_l b_{kl}^{\text{O}}(t)) = 0. \quad (24)$$

Ограничим возможность выполнения на каждом  $k$ -м пути отправления в каждый момент времени только одной операцией:

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (b_{kl}^{\text{OTO}}(t) + b_{kl}^{\text{TO}}(t) + b_{kl}^{\text{OTP}}(t) + b_{kl}^{\text{TP}}(t) + b_{kl}^{\text{OF}}(t) + b_{kl}^{\text{O}}(t)) \leq 1; \quad (25)$$

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (b_{kl}^{\text{OTO}}(t) + \sum_l b_{kl}^{\text{TO}}(t) + \sum_l b_{kl}^{\text{OTP}}(t) + \sum_l b_{kl}^{\text{TP}}(t) + \sum_l b_{kl}^{\text{OF}}(t) + \sum_l b_{kl}^{\text{O}}(t)) \leq 1, \quad (26)$$

а также количество вагонов на  $k$ -м пути отправления в ожидании выполнения операций величиной нормы (длины) накопления для соответствующего направления:

$$\sum_\tau \sum_k \sum_l (x_{kl}^{\text{OTO}}(t) + x_{kl}^{\text{TO}}(t) + x_{kl}^{\text{OF}}(t)) \leq L_l. \quad (27)$$

Ограничим количество одновременно выполняемых операций технического обслуживания по отправлению в каждый момент  $t$  на всех путях отправления имеющимся количеством ресурсов (например, числом бригад осмотра):

$$\sum_{t=t_{\text{TO}}^0+1}^T \sum_k \sum_l b_{kl}^{\text{TO}}(t) + \sum_{\tau=1}^{t_{\text{TO}}^0-1} \sum_k \sum_l b_{kl}^{\text{TO}}(t-\tau) \leq K_{\text{O}}^{\text{TO}}, \quad (28)$$

где  $K_{\text{O}}^{\text{TO}}$  — количество ресурсов для выполнения технического обслуживания по отправлению.

Использование ниток графика по отправлению зададим в виде ограничения

$$\sum_\tau \sum_l \sum_k (b_{kl}^{\text{O}}(t) + x_{kl}^{\text{OF}}(t)) = G_l(t), \quad (29)$$

где  $G_l(t)$  — константа (0 или 1), отображающая нитку графика на  $l$ -е направление.

### ПОСТАНОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ УВЯЗКИ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД И СФОРМИРОВАННЫХ СОСТАВОВ

На периоде планирования  $T$  требуется увязать имеющееся в наряде количество бригад  $S$  с моментами готовности составов. Составы формируются на  $R$  направлений отправления,  $l \in [1 \dots R]$ , на каждое из которых могут быть готовы составы в количестве  $H^l$ . Каждая бригада может иметь обкатку или на все примыкающие направления к станции, или только на некоторые из них. В рамках принятого критерия необходимо увязать бригады с составами, а также определить свободные бригады и не обеспеченные бригадами составы. Критерии увязки бригад и составов в общем случае будут отражать способ или технологические особенности увязки (без «присидок» бригад, с допустимыми «присидками» и без простоев составов в ожидании бригад и т.п.), которые будут напрямую влиять на эффективность принятой технологии.

Постановка задачи приводится для способа увязки бригад и составов без «присидок» бригад.

Обозначим через  $S_a$   $a \in [1 \dots S]$ , бригады наряда с моментами явки  $t_1, t_2, \dots, t_a$  а через  $H_j^l, j \in [1 \dots N], l \in [1 \dots R]$ , составы с моментами готовности  $t_j^l$ . Для каждого момента явки  $t_a$  объем производства  $s_a(t)$  принимается равным единице.

Введем в задачу переменные:

$U_{aj}^l(t)$  — возможность увязки бригады  $S_a$  и состава  $H_j^l$  на интервале времени  $[(t_a - t_{\text{прост}}^{\max}), t_a]$ , где  $t_{\text{прост}}^{\max}$  — макси-

мальный простой состава в ожидании обеспечения локомотивной бригадой,

$$U_{aj}^l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если бригада увязана с составом;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_j^{\text{сп}}(t)$  — необходимость обеспечения бригадой сформированного состава  $j$ -го назначения,

$$b_j^{\text{сп}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав сформирован;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$Y_j^l(t)$  — обеспеченность бригадой сформированного состава в момент  $t_j^l$ ,

$$Y_j^l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав бригадой не обеспечен;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$Y_a(t)$  — увязка состава и бригады с моментом явки  $t_a$ ,

$$Y_a(t) = \begin{cases} 1, & \text{если увязка не выполнена;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

На рис. 2 представлена принципиальная схема сети задачи для станции с пятью направлениями. Цветовой заливкой выделены возможные периоды увязки бригады определенной явки и составов, готовых на данные периоды.

В качестве стоимостного коэффициента  $c_{aj}^l(t)$  в постановке принимаются затраты, связанные с простоем состава в ожидании локомотивной бригады. В целом стоимостный коэффициент

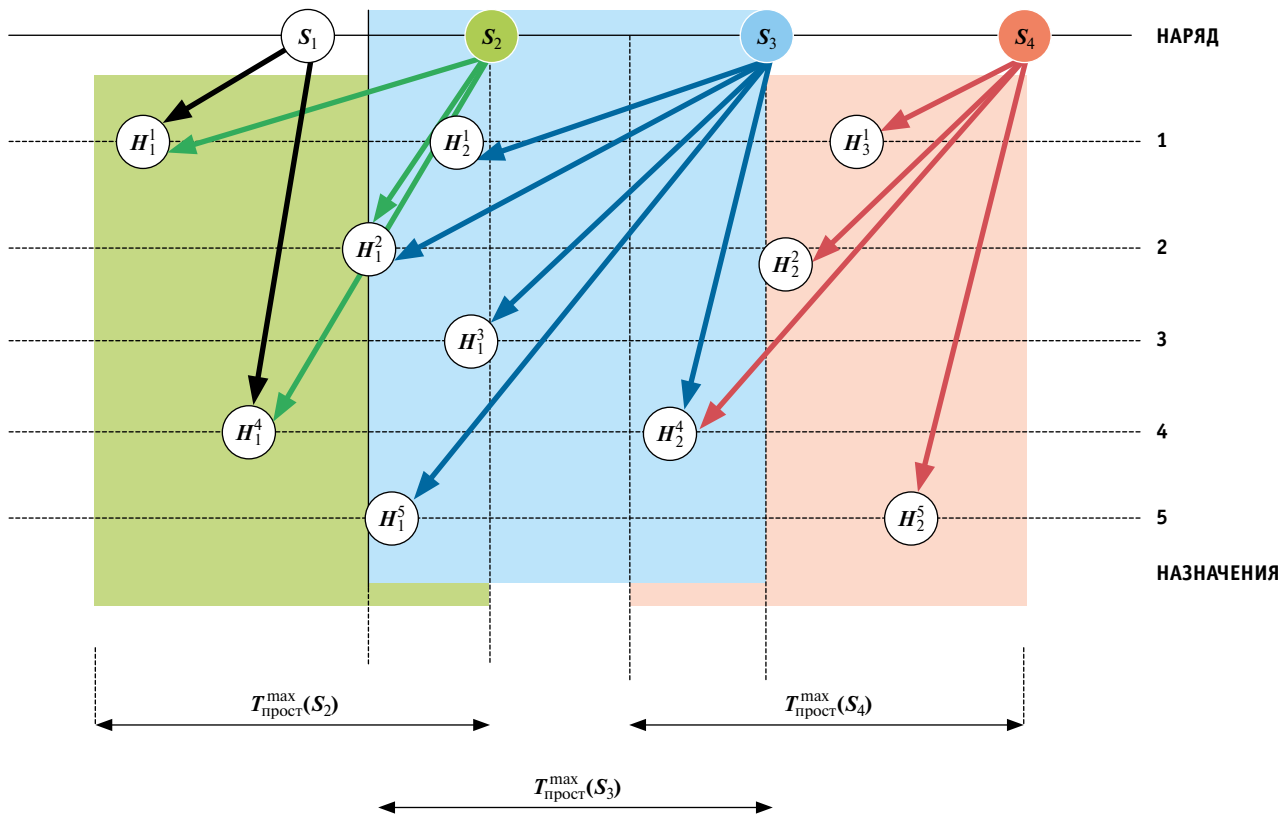


Рис. 2. Схема сети задачи



в данной задаче может выступать в качестве инструмента управления. Например, для составов, простой которых следует минимизировать по различным причинам (сроку доставки и т.п.), значение стоимостного коэффициента уменьшается. Увеличивая или уменьшая значение стоимостного коэффициента, мы можем отобразить ситуацию с учетом приоритетного направления увязки каждой бригады, задавая, например, стоимость увязки бригады на приоритетное направление меньше, чем на остальные направления обкатки.

Как правило, на периоде планирования  $T$  задача будет несбалансированной по объемам производства (количество явок бригад в наряде) и потребления (количество готовых составов по всем направлениям). Для устранения дисбаланса в каждый момент явки  $t_a$  введем балансовую переменную  $Y_a(t)$  со стоимостным коэффициентом  $c_a(t)$ , величина которого значительно превышает значение коэффициента  $c_{aj}^l(t)$ . В каждый момент готовности состава  $t_j^l$  вводим балансовую переменную  $Y_j^l(t)$  со стоимостным коэффициентом  $c_j^l(t)$ , величина которого также значительно превышает значение коэффициента  $c_{aj}^l(t)$ .

Фрагмент постановки задачи с принятыми обозначениями показан на рис. 3.

Цель задачи — разработка оптимального режима подсистемы «формирование — отправление», при котором затраты на простои вагонов в сортировочном парке и парке отправления минимальны:

$$F = F_a + F_b \rightarrow \min, \quad (30)$$

где  $F_a$  — затраты на простои вагонов в сортировочном парке и парке отправления;  $F_b$  — затраты на простои составов в ожидании локомотивных бригад,

$$F_b = \sum_a \sum_j \sum_l U_{aj}^l(t) c_{aj}^l(t) + \sum_a Y_a(t) c_a(t) + \sum_j \sum_l Y_j^l(t) c_j^l(t), \quad (31)$$

при ограничениях, накладываемых балансовыми уравнениями на узлы сети (явки бригад и моменты готовности составов) и типом переменных для каждого момента явки  $t_a$

$$\sum_j \sum_l (U_{aj}^l(t) + Y_a(t) - s_a(t)) = 0. \quad (32)$$

Для инициализации увязки бригады с готовностью составов введем в задачу ограничения:

$$\sum_t \sum_j \sum_k (b_j^{\text{сп}}(t) - b_{jk}^{\Phi}(t)) = 0, \quad (33)$$

где  $b_{jk}^{\Phi}(t)$  — выполнение формирования состава  $j$ -го назначения с перестановкой на  $k$ -й путь отправления;

$$\sum_t \sum_j \sum_k (b_j^{\text{сп}}(t) - U_{aj}^l(t) - Y_j^l(t)) = 0. \quad (34)$$

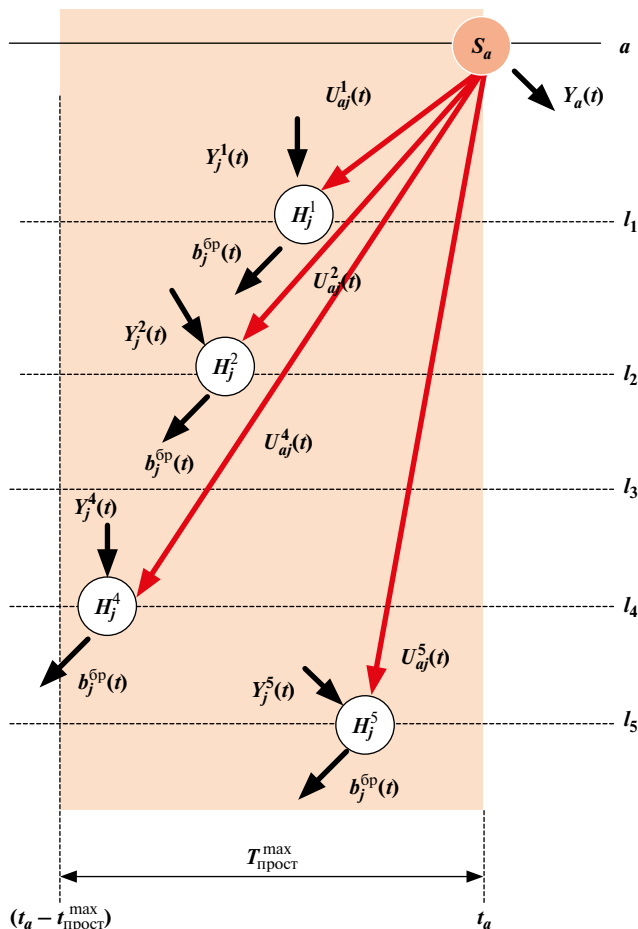


Рис. 3. Обозначения задачи

Таким образом, значения переменных  $Y_a(t)$  и  $Y_j^l(t)$ , отличные от нуля, укажут на свободные бригады и неувязанные составы.

Подобная постановка может быть использована для отображения различных принципов увязки локомотивных бригад и составов. При управлении интервалом времени, на котором формируются переменные  $U_{aj}^l(t)$ , и стоимостными коэффициентами  $c_{aj}^l(t)$  можно реализовать следующие технологические решения:

- локомотивные бригады без «просидок» отправляются только на приоритетное направление;
- приоритетное направление для локомотивных бригад без возможности «просидок» не учитывается;
- существует возможность «просидок» локомотивных бригад при обеспечении составов (как с учетом приоритетного направления, так и без него).

Дальнейшие исследования предполагают: построение компьютерной расчетной модели достаточно большой размерности; отладку модели по частям в соответствии с описанными в этой статье и в статье [1] моделями подсистем; отладку объединенной модели с использованием исходных данных по реальной станции; верификацию модели; оценку ее практической полезности.

## Литература

1. Модель основной технологической линии сортировочной станции / А. Э. Александров, А. Г. Галкин, В. Ю. Пермикин, Е. Н. Тимухина // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12. ISSN 1815-9400.
2. Муртаф Б. Современное линейное программирование. Москва : Мир, 1984. 224 с.
3. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. № 3. С. 521–531. ISSN 0424-7388.
4. Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 1. С. 211–212. ISSN 0002-3388.
5. Блюмин С. Л., Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками // Автоматика и телемеханика. 1984. № 25. С. 158–161. ISSN 0005-2310.
6. Александров А. Э., Пермикин В. Ю. Гибкая технология перевозок внутридорожных массовых грузов // Фундаментальные и прикладные исследования — транспорту. Екатеринбург : Изд-во УрГАПС, 1995. Ч. 1. С. 206–207.
7. Александров А. Э., Пермикин В. Ю. Адаптивная технология перевозок внутридорожных массовых грузов на базе метода динамического согласования // Развитие сырьевой базы промышленных предприятий Урала. Магнитогорск : Изд-во МГМА, 1995. С. 225–227.
8. Александров А. Э., Пермикин В. Ю., Фрейберг А. Ю. Расчет параметров блока «сетевой бункер» в системе «МОДУС» // Фундаментальные и прикладные исследования — транспорту — 96. Екатеринбург : Изд-во УрГАПС, 1996. Ч. 1. С. 78–79.
9. Александров А. Э., Шавзис С. С. Модель расчета оптимальной укрупненной структуры узла // Математическое программирование и приложения. 1999. № 8. С. 16–17.
10. Александров А. Э., Якушев Н. В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления // Управление большими системами. 2006. № 12–13. С. 5–14. ISSN 1819-2440.
11. Александров А. Э. Математическая модель в автоматизированной системе управления согласованной доставкой грузов // Транспорт: наука, техника, управление. 2006. № 11. С. 37–39. ISSN 0236-1914.
12. Козлов П. А., Владимирская И. П. Построение систем автоматизированного управления потоками вагонов разных собственников // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 6. С. 8–11. ISSN 2223-9731.
13. Козлов П. А., Владимирская И. П., Тушин Н. А. Модель оптимизации управления парками вагонов разных собственников // Вестник РГУПС. 2010. № 3 (39). С. 93–98. ISSN 0201-727X.
14. Козлов П. А., Владимирская И. П. Метод оптимизации структуры транспортной системы // Мир транспорта. 2009. Т. 7. № 2 (26). С. 84–87. ISSN 1992-3252.
15. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Организационные подходы и модели оптимизации // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 18–23. ISSN 1992-3252.
16. Колокольников В. С., Пермикин В. Ю. Активизация динамических резервов в транспортном узле за счет гибкого взаимодействия // Инновационный транспорт. 2013. № 2 (8). С. 67–70. ISSN 2311-164X.
17. Тимухина Е. Н., Окулов Н. Е. Оптимальный подвод грузов при наличии случайных факторов: материалы X Международной научно-практической конференции «Aktualni vymozenosti vedy — 2014». Прага: Education and Science, 2014. Т. 16. Технологии. С. 46–49.
18. Александров А. Э., Тимухина Е. Н., Ковалев И. А. Оптимизационная модель перевозочного процесса с использованием кольцевых маршрутов // Транспорт Урала. 2017. № 4 (55). С. 36–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-36-39. ISSN 1815-9400.

## References

1. Alexandrov A. E., Galkin A. G., Permikin V. Yu., Timukhina E. N. Model of marshalling station main processing line [Model' osnovnoy tekhnologicheskoy linii sortirovochnoy stantsii]. Transport of the Urals. 2018. No. 4 (59). Pp. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12. ISSN 1815-9400.
2. Murtagh B. Modern linear programming [Sovremennoe lineynoe programmirovaniye]. Moscow : World, 1984. 224 p.
3. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers [Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebitel'nykh]. Economics and Mathematical Methods. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424-7388.
4. Kozlov P. A., Milovidov S. P. The dynamic transportation problem with delays in the network statement [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami v setevoy postanovke]. Soviet Journal of Computer and Systems Sciences. 1982. No. 1. Pp. 211–212. ISSN 0002-3388.
5. Blyumin S. L., Kozlov P. A., Milovidov S. P. A dynamic transportation problem with delays [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami]. Automation and Remote Control. 1984. No. 5. Pp. 158–161. ISSN 0005-2310.
6. Aleksandrov A. E., Permikin V. Yu. Flexible technology for mass transportation [Gibkaya tekhnologiya perevozok vnutridorozhnykh massovykh грузов]. Fundamental and applied research for transport. Ekaterinburg : Publishing House of USART, 1995. Part 1. Pp. 206–207.
7. Aleksandrov A. E., Permikin V. Yu. Adaptive technology for mass transportation on basis of dynamic coordination method [Adaptivnaya tekhnologiya perevozok vnutridorozhnykh massovykh грузов na baze metoda dinamicheskogo soglasovaniya]. Development of raw materials base for industrial enterprises of the Urals. Magnitogorsk : Publishing House of NMSAMM, 1995. Pp. 225–227.
8. Aleksandrov A. E., Permikin V. Yu., Freyberg A. Yu. Calculation of «net bunker» parameters in system «MODUS» [Raschet parametrov bloka «setevoy bunker» v sisteme «MODUS»]. Fundamental and applied research for transport — 96. Ekaterinburg : Publishing House of USART, 1996. Part 1. Pp. 78–79.
9. Aleksandrov A. E., Shavzis S. S. Model for calculating the optimal aggregate structure of the node [Model' rascheta optimal'noy ukрупnennoy struktury uzla]. Mathematical programming and applications. 1999. No. 8. Pp. 16–17.
10. Aleksandrov A. E., Yakushev N. V. Stochastic formulation of the dynamic transportation problem with delays with the random variation in the time of delivery and time consumption [Stokhasticheskaya postanovka dinamicheskoy transportnoy zadachi s zaderzhkami s uchetom sluchaynogo razbrosa vremeni dostavki i vremeni potrebleniya]. Large-Scale Systems Control. 2006. No. 12–13. Pp. 5–14. ISSN 1819-2440.
11. Aleksandrov A. E. The mathematical model in the automated control system of the coordinated delivery of cargoes [Matematicheskaya model' v avtomatizirovannoy sisteme upravleniya soglasovannoy dostavkoy грузов]. Transport. Science, equipment, management. 2006. No. 11. Pp. 37–39. ISSN 0236-1914.
12. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Forming-up systems of automated management of different owner's car flows [Postroenie sistem avtomatizirovannogo upravleniya potokami vagonov raznykh sobstvennikov]. Vestnik VNIIZhT. 2009. No. 6. Pp. 8–11. ISSN 2223-9731.
13. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P., Tushin N. A. The model for control optimization of different freight cars owners [Model' optimizatsii upravleniya parkami vagonov raznykh sobstvennikov]. Vestnik RGPUS. 2010. No. 3 (39). Pp. 93–98. ISSN 0201-727X.
14. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. A method of optimization of structure of transport system [Metod optimizatsii struktury transportnoy sistemy]. World of Transport and Transportation. 2009. Vol. 7. No. 2 (26). Pp. 84–87. ISSN 1992-3252.
15. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Organizational approach and optimization models [Organizatsionnye podkhody i modeli optimizatsii]. World of Transport and Transportation. 2011. Vol. 9. No. 5 (38). Pp. 18–23. ISSN 1992-3252.
16. Kolokolnikov V. S., Permikin V. Yu. Activation of dynamic reserves in transport hub through flexible interaction [Aktivizatsiya dinamicheskikh rezervov v transportnom uzle za schet gibkogo vzaimodeystviya]. Innotrans. 2013. No. 2 (8). Pp. 67–70. ISSN 2311-164X.
17. Timukhina E. N., Okulov N. E. Optimal supply of cargo in the presence of random factors [Optimal'nyy podvod грузов pri nalichii sluchaynykh faktorov] : proceedings of the X International scientific-practical conference «Aktualni vymozenosti vedy — 2014». Prague : Publishing House «Education and Science». 2014. Vol. 16. Technology. Pp. 46–49.
18. Aleksandrov A. E., Kovalev I. A., Timukhina E. N. Optimization model of the transportation process with the use of unit trains [Optimizatsionnaya model' perevoznogo protsesssa s ispol'zovaniem kol'tsevykh marshrutov]. Transport of the Urals. 2017. No. 4 (55). Pp. 36–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-36-39. ISSN 1815-9400.

УДК 656.078:519.81

**Галина Адольфовна Тимофеева, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), профессор учебно-научного центра «Информационная безопасность» Института радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (ИРИТ-РТФ УрФУ), Екатеринбург, Россия,**

**Артем Дамирович Хазимуллин, аспирант кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ГРУЗОТРАНСПОРТЧИКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОГРАММ ЛОЯЛЬНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Galina Adolfovna Timofeeva, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Professor, Scientific and Educational Center «Information Security», Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (IRIT-RTF UrFU), Ekaterinburg, Russia,**

**Artem Damirovich Khazimullin, postgraduate student, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Probabilistic modeling of shipper behavior when assessing loyalty programs on railway transport

#### Аннотация

Для анализа стратегий ОАО «РЖД», направленных на развитие сервиса и программ лояльности с целью увеличения прибыли компании, предлагается использовать вероятностную модель поведения потребителей транспортных услуг. Выбор оптимальной стратегии холдинга рассматривается как игра со случайным вторым игроком, где в качестве первого игрока выступает железнодорожный перевозчик (ОАО «РЖД»), в качестве второго — множество грузоотправителей, каждый из которых принимает решение (увеличить или сохранить прежним объем перевозки грузов) с учетом стратегии перевозчика, собственных предпочтений, вида груза, а также наличия иных предложений на рынке транспортно-логистических услуг. Выбор грузоотправителей моделируется как логнормально распределенная случайная величина, параметры распределения которой определяются на основании интервальных оценок реакции клиентов. Результат применения стратегии рассчитывается методом имитационного моделирования с учетом распределения клиентов по видам груза и расстоянию перевозок.

**Ключевые слова:** выбор стратегии, грузоперевозки, вероятностное моделирование, стохастическое доминирование, квантильный критерий

#### Abstract

For the analyses of JSC «RZD» strategies aimed for the development of the service and loyalty programs in order to increase the company profit it is offered to use a probability model of the transport service consumer's behavior. The choice of the optimal strategy of the holding is viewed as a game with a random second player where the first player is the railway transporter (JSC «RZD»), the second one is the number of shippers. Each of them decides (whether to increase or keep the amount of freight transportation) taking into account the strategy of the transporter, own preferences, type of cargo, and also the presence of other offers in the market of transport-logistics service. The choice of the shippers is modelled as a lognormally distributed random value the distribution parameters of which are determined on the bases of interval valuations of the clients' reactions. The result of the strategy implementation is calculated with the method of imitation modelling considering clients disperse on types of freight and the distance of transportations.

**Keywords:** strategy choice, freight transportations, probability modeling, stochastic dominance, quantum criteria

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-34-40

**И**зучение стратегий перевозчика (ОАО «РЖД») по привлечению клиентов с учетом их дифференциации начато авторами в работе [1]. В настоящей статье для анализа стратегий используется предложенная ранее модель иерархической игры со случайным вторым игроком [2]. Математическая модель в форме игры со случайным вторым игроком применяется для описания выбора решений в случае, когда первый игрок — это лицо, принимающее решение, а в роли второго игрока выступает значительное число лиц, у каждого из которых свой критерий выбора. В предлагаемом исследовании в качестве первого игрока выступает ОАО «РЖД», а в качестве второго — множество клиентов. Решение второго игрока (случайно выбранного грузоотправителя) описывается как случайный вектор, распределение которого зависит и от решения перевозчика, и от типа груза.

Цель статьи — представить методику выбора стратегий холдинга ОАО «РЖД» по развитию программ лояльности и привлечению клиентов. Методика основывается на использовании разработанной авторами имитационной модели поведения второго игрока.

Будем анализировать стратегии холдинга по привлечению клиентов с точки зрения увеличения прибыли компании. Такое увеличение

возможно за счет развития программ лояльности для повышения объемов перевозок и привлечения новых клиентов, а также за счет расширения спектра транспортно-логистических услуг. Рассматриваются следующие стратегии холдинга: развитие собственных транспортно-логистических услуг ( $U_1$ );

использование единой скидки на все виды грузов ( $U_2$ ); применение многоуровневой системы поощрений в зависимости от дифференциации клиентов ( $U_3$ ).

По каждому отдельному ( $k$ -му) клиенту известны (существующие в настоящее время) объемы перевозок  $V_0(k)$  и доход холдинга  $D_0(k)$  от предоставленных услуг, который определяется как

$$D_0(k) = c(k)V_0(k),$$

где  $c(k)$  — железнодорожный тариф для данного вида груза.

Отметим следующее: 1) перевозимые грузы неоднородны — делятся на три класса [3] (табл. 1); 2) тарифы на перевозку существенно отличаются; 3) также различны объемы и расстояния перевозок.

Исходные данные представим в виде массива объемов, тарифов и средних расстояний перевозки для всех грузов каждой группы:

$$\{k, V_{0j}(k), c_j(k), s_j(k)\}, k = 1, \dots, N_j, j = 1, 2, 3,$$

где  $j$  — номер группы;  $k$  — номер клиента;  $V_{0j}(k)$  — объем перевозок  $k$ -го клиента  $j$ -й группы;  $s_j(k)$  — среднее расстояние перевозки этого клиента;  $N_j$  — количество клиентов в  $j$ -й группе.

Обозначим начальный объем перевозок  $j$ -й группой клиентов как  $\widehat{V}_{0j}$ , а доход от перевозок как  $\widehat{D}_{0j}$ :

$$\widehat{V}_{0j} = \sum_{k=1}^{N_j} V_{0j}(k); \widehat{D}_{0j} = \sum_{k=1}^{N_j} D_{0j}(k) = \sum_{k=1}^{N_j} c_j(k)V_{0j}(k).$$

Через  $\widehat{V}_0$  будем обозначать суммарный объем перевозок, а через  $\widehat{D}_0$  — исходный доход компании от предоставления услуг до введения стратегии по привлечению клиентов:

$$\widehat{V}_0 = \sum_{j=1}^3 \widehat{V}_{0j}(k); \widehat{D}_0 = \sum_{j=1}^3 \widehat{D}_{0j}(k).$$

Проанализируем, как реализация холдингом той или иной стратегии повлияет на объемы перевозок и доход от предоставления услуг для клиентов каждой группы.

После внедрения стратегии  $U_i$  объем перевозки грузов  $k$ -го клиента и доход холдинга изменятся — станут равными  $V_1(k, U_i)$  и  $D_1(k, U_i)$  соответственно.

Таким образом, объем перевозок  $k$ -го клиента и доход компании составят:

$$V_1(k, U_i) = (1 + Y_1(k, U_i))V_0(k); \quad (1)$$

$$D_1(k, U_i) = c_1(k, U_i)V_1(k, U_i) + Y_2(k, U_i)D_0(k), \quad (2)$$

Таблица 1

Распределение грузов, перевозимых железнодорожным транспортом, по классам [4]

Класс грузов	Доля класса грузов, %	
	в объеме перевозок	в доходе
Первый — низкодоходные грузы (сырьевые и другие массовые грузы, отправляемые в больших объемах для производственных целей)	63	23
Второй — среднедоходные грузы (нефтепродукты, лесоматериалы, товары первой необходимости)	25	54
Третий — высокодоходные грузы (готовая продукция, занимающая наименьший объем перевозок, но имеющая очень широкую номенклатуру)	12	23

где  $Y_1(k, U_i)$  — изменение объема перевозок (в долях) в ответ на стратегию  $U_i$ ;  $Y_2(k, U_i)$  — дополнительный объем использования услуг холдинга (в долях дохода от перевозки грузов данного клиента);  $c_1(k)$  — тариф на  $k$ -й груз с учетом выбранной стратегии (например, стратегии скидок).

При вычислении дохода по формуле (2) тариф  $c_1(k)$  зависит от выбранной стратегии, например, для стратегии  $U_1$  он сохраняется неизменным. Стратегия  $U_2$  предполагает единую скидку  $b$  с тарифа. При выборе стратегии  $U_3$  скидка зависит от объема перевозок и/или от расстояния  $S(k)$  либо предоставляется дифференцированно в зависимости от разных видов груза [5].

Таким образом, в общем случае тариф на перевозку составит

$$c_1(k, U_3) = c_1(k, U_i, V_1(k)) = (1 - b(k, S, V_1))c(k). \quad (3)$$

Для стратегии  $U_1$  затраты на развитие транспортно-логистических услуг можно рассматривать как параметр, принимающий значение в некотором диапазоне. Необходимо отметить, что эффект наступает только после реализации мероприятия (например, разработка и внедрение новой информационной системы по работе с клиентами, строительство нового складского комплекса или предоставление новой услуги). Для стратегий  $U_2$  и  $U_3$  размер скидки можно характеризовать непрерывным параметром.

В связи с тем что предоставление скидок на железнодорожный тариф требует разработки и согласования изменений в тарифном законодательстве, рассмотрено несколько базовых предложений о скидках на перевозку грузов. Таким образом, исследуются три основные стратегии холдинга, хотя объективно возможных стратегий значительно больше.

Решение об изменении объемов перевозки и/или использовании дополнительных услуг отдельно взятого клиента будем описывать вектором

$$Y(k, U_i) = \{Y_1(k, U_i), Y_2(k, U_i)\},$$

где  $Y_1(k, U_i)$  — изменение объема перевозки (в долях);  $Y_2(k, U_i)$  — дополнительный объем использования логистических услуг (в долях дохода от перевозки грузов данного клиента).

На каждую стратегию холдинга клиенты реагируют по-разному. Например, стратегия  $U_1$  позволяет получить дополнительный доход без обязательного увеличения объема перевозок, но с дополнительными затратами, стратегии  $U_2$  и  $U_3$  дают некоторое увеличение объемов перевозок, которое существенно зависит от типа груза, расстояния, размера скидки.

Для каждой группы грузов выполнен количественный анализ реакции клиентов, т.е. прогнозировался уровень увеличения (или сохранения без изменений) объема перевозки в случае предоставления скидок различного уровня, а также оценивалось использование дополнительных услуг (стратегия  $U_1$ ).

Анализ проведен для  $M = 6$  компаний каждой группы отдельно по всем трем стратегиям. В каждой группе выбирали трех наиболее крупных по объемам перевозок клиентов и трех случайно выбранных из оставшихся клиентов этой группы. Анализ выполнялся среди клиентов Свердловской железной дороги.

Прогноз основывался:

на опросе выбранных клиентов;

экспертных оценках;

результатах опроса потребителей транспортных услуг [6];

исследованиях эластичности объемов при изменении тарифов [7, 8].

Работа с экспертами и клиентами показала, что прогнозные оценки изменения объемов потребления услуг в зависимости от изменения стоимости железнодорожной перевозки (оказания дополнительных транспортно-логистических услуг) представляются, как правило, в форме интервала значений. В результате обработки данных опроса клиентов и экспертных оценок получены интервальные оценки для ожидаемых изменений объемов перевозок и/или объемов использования логистических услуг в форме интервалов  $[x_{ij} - \Delta_{ij}; x_{ij} + \Delta_{ij}]$  для каждой группы ( $j = 1, 2, 3$ ) и каждой стратегии  $U_i$  отдельно ( $i = 1, 2, 3$ ).

При моделировании изменения объемов перевозок и/или логистических услуг для клиентов  $j$ -й группы ( $j = 1, 2, 3$ ) в результате внедрения стратегии  $U_i$  использовали логнормальное распределение, поскольку оно в наибольшей степени определяет мультипликативный эффект. Таким образом, увеличение объема перевозки для случайно выбранного клиента  $j$ -й группы описывалось как случайная величина  $\xi_j(U_i)$ , имеющая логнормальное распределение с параметрами  $a_{ij}, s_{ij}$ . Результат выбора каждого отдельного клиента предполагался независимым от остальных.

Параметры логнормального распределения  $a_{ij}, s_{ij}$  выбирали таким образом, чтобы они соответствовали вероятности 0,95:

$$P\{\xi_j(U_i) \in [x_{ij} - \Delta_{ij}; x_{ij} + \Delta_{ij}]\} = 0,95. \quad (4)$$

Для нахождения параметров логнормального распределения из условия (4) удобнее всего использовать свойства этого распределения и перейти к логарифмам:

$$P\{\ln(\xi_j(U_i)) \in [l_{ij}^-; l_{ij}^+]\} = 0,95, \quad (5)$$

где  $l_{ij}^- = \ln(x_{ij} - \Delta_{ij})$ ;  $l_{ij}^+ = \ln(x_{ij} + \Delta_{ij})$ .

Так как  $\eta = \ln(\xi_j(U_i))$  имеет нормальное распределение с параметрами  $a_{ij}, s_{ij}$ , эти параметры можно найти из соотношений:

$$\begin{cases} a_{ij} - \tau_{0,95}s_{ij} = l_{ij}^- \\ a_{ij} + \tau_{0,95}s_{ij} = l_{ij}^+ \end{cases},$$

где  $\tau_{0,95} = 1,96$  — двусторонняя критическая точка стандартного нормального распределения, соответствующая вероятности 0,95.

В результате получаем

$$a_{ij} = 0,5(l_{ij}^- + l_{ij}^+), \quad s_{ij} = \frac{l_{ij}^+ - l_{ij}^-}{3,92}. \quad (6)$$

При использовании предложенной имитационной модели выигрыш холдинга определяется суммой значительного числа случайных величин, которые характеризуют поведение клиентов.

Для каждой стратегии  $U_i$  перевозчика получали прогноз распределения дохода компании  $D(U_i)$  от реализации стратегии и находили его параметры:

математическое ожидание  $E(D(U_i))$ ;

среднее квадратичное отклонение  $\sigma(D(U_i))$ .

Все расчеты осуществлялись в процентах по отношению к текущему доходу компании  $\hat{D}_0$ , т.е. получалось гистограммное описание случайной величины  $\eta_i$ , представляющей собой изменение дохода компании при реализации  $i$ -й стратегии:

$$\eta_i = \frac{D(U_i)}{\hat{D}_0}, \quad (7)$$

а также вычислялись числовые характеристики ее распределения:

$$m_i = E(\eta_i) = \frac{E(D(U_i))}{\hat{D}_0}; \quad \sigma_i = \sigma(\eta_i) = \frac{\sigma(D(U_i))}{\hat{D}_0}. \quad (8)$$

Для первой стратегии прогнозировалась реакция потребителей  $Y_2(U_1)$  на развитие спектра и качества логистических услуг холдинга, где  $Y_2(U_1)$  — увеличение использования услуг в денежном выражении. В соответствии с вышеизложенной методикой это увеличение моделируется как случайные величины  $\xi_j(k; U_1)$ , которые предполагаются независимыми и одинаково логнормально распределенными для различных  $k$ , т.е. для клиентов из одной группы, параметры распределения  $\{a_{1j}, s_{1j}\}$  зависят от номера группы  $j$ . Доход компании при выборе первой стратегии определяется как

$$D(U_1) = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{N_j} D_0(k)(1 + \xi_j(k; U_1)) - u_1, \quad (9)$$

где  $u_1$  — объем инвестиций в развитие транспортно-логистических услуг.

Так как доход компании состоит из значительного числа слагаемых, его распределение близко к нормальному и харак-

теризуется двумя параметрами — математическим ожиданием и дисперсией. Параметры нормального распределения ожидаемой прибыли можно найти по известным формулам с учетом независимости случайных величин. Для первой стратегии ожидаемое значение прибыли

$$E(D(U_1)) = \sum_{j=1}^3 (1 + e_j) \widehat{D}_{0j} - u_1, \quad (10)$$

где  $e_j$  — среднее ожидаемое значение увеличения использования услуг для  $j$ -й группы клиентов холдинга, т.е.

$$e_j = E(\xi_j(k; U_1)).$$

Для учета риска найдем также прогнозное значение разброса (т.е. среднее квадратичное отклонение) прибыли:

$$\sigma(D(U_1)) = \sum_{j=1}^3 \left( \sigma_j^2 \sum_{k=1}^{N_j} D_0^2(k) \right), \quad (11)$$

где  $\sigma_j$  — среднее квадратичное отклонение случайной величины  $\xi_j(k; U_1)$ .

Рассмотрим подробнее прибыль компании от реализации стратегии  $U_2$  по предоставлению скидок. Для этой стратегии зависимость дохода холдинга от увеличения объема перевозки случайно выбранным клиентом нелинейная, поэтому параметры распределения прибыли получены методом имитационного моделирования.

Доход компании в данном случае определяется как

$$\begin{aligned} D(U_2) &= \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{N_j} (1 - b(k)) c(k) V_{1j}(k) = \\ &= \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{N_j} (1 - b(k)) (1 + \xi_j(k; U_2)) D_{0j}(k). \end{aligned}$$

Предоставление фиксированной скидки на все виды грузов можно записать в виде

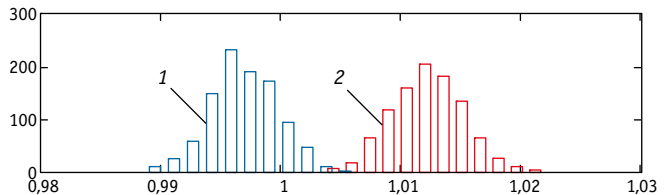
$$b(k, V) = b, \quad c_1(k, U_2) = (1 - b)c(k).$$

Для расчетов выбрана и проанализирована фиксированная скидка  $b = 0,015 = 1,5\%$  на все виды перевозок. Изменение объемов для каждой группы клиентов получено на основе описанного выше алгоритма имитационного моделирования. По результатам расчетов установлено, что постоянная скидка является невыгодной, так как эластичность объемов перевозок для многих видов грузов ниже единицы [7, 8].

Моделирование поведения значительного числа клиентов показало, что случайная величина, получаемая при суммировании, имеет приближенно нормальное распределение (рис. 1). Изменение дохода описывается как случайная величина с нормальным распределением  $N(0,997, 0.0028)$ .

Поскольку дифференциация скидок на различные грузы (например, на грузы третьей группы скидка выше, на другие

грузы — ниже) является дискриминационной, то предоставление скидки рассматривалось в зависимости от расстояния перевозки. Холдинг «РЖД» планирует поощрять собственников груза, которые выбирают железнодорожный транспорт при перевозках на малые расстояния, так как в этом сегменте высока конкуренция с автомобильным транспортом и перевозятся в основном грузы третьего класса.



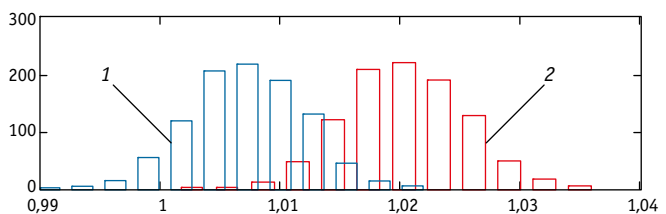
**Рис. 1. Гистограммы распределения объемов перевозки и доходов холдинга, полученные с помощью имитационного моделирования поведения грузоотправителей в случае предоставления единой скидки в 1,5 %:**  
1 — модельные значения изменения дохода компании (в долях),  
2 — изменение объемов перевозки (в долях);  
горизонтальная ось — коэффициент изменения показателя (объема и дохода) по сравнению с исходным значением;  
вертикальная ось — количество клиентов в каждом интервале

Функция скидок с учетом расстояния задана как

$$b(k, S) = \begin{cases} a, & \text{если } S \leq 1500 \\ 0,5a, & \text{если } 1500 < S \leq 4000 \\ 0,2a, & \text{если } S > 4000. \end{cases} \quad (12)$$

Для расчетов брали  $a = 0,025$ .

Результаты имитационного моделирования поведения клиентов различных групп с учетом распределения объемов перевозок для этого вида скидок представлены на рис. 2.



**Рис. 2. Гистограммы распределения объемов перевозки и доходов холдинга, полученные с помощью имитационного моделирования поведения грузоотправителей в случае предоставления скидки в зависимости от расстояния:**  
1 — изменение дохода компании;  
2 — изменение объемов перевозки

Для анализа многоуровневых видов скидок, например скидок на последующие объемы перевозок при выполнении определенных условий, статистические моменты распределения прибыли не находятся аналитически, а для получения распределения прибыли холдинга можно использовать мультиагентное моделирование.

В результате использования вероятностного прогноза поведения клиентов холдинга и имитационного моделирования результат внедрения каждой стратегии описывается нормально

Таблица 2

распределенной случайной величиной  $\eta_i = \eta(U_i)$ , параметры распределения которой  $\{m_i, \sigma_i\}$  зависят от выбранной стратегии [формулы (8)–(9)].

При сравнении случайных величин использованы следующие определения стохастического доминирования первого и второго порядков [9–11].

**Определение 1.** Случайная величина  $\xi_1$  доминирует над  $\xi_2$ , что обозначается как  $\xi_1 \geq \xi_2$ , если

$$F_1(x) \leq F_2(x) \text{ для всех } x \in (-\infty; \infty), \quad (13)$$

где  $F_i(x)$  — функция распределения случайной величины  $\xi_i$ .

Если неравенство (13) выполняется как строгое на множестве ненулевой меры, то  $\xi_1$  строго доминирует над  $\xi_2$ , т.е.  $\xi_1 > \xi_2$ .

Отметим, что выполнение неравенства  $F_1(x) \leq F_2(x)$  эквивалентно условию

$$P\{\xi_1 \geq x\} > P\{\xi_2 \geq x\}.$$

Для нормально распределенных случайных величин  $\xi_1 \sim N(a_1, s_1)$  и  $\xi_2 \sim N(a_2, s_2)$  доминирование  $\xi_1 > \xi_2$  первого порядка эквивалентно соотношению [10]

$$a_1 > a_2, s_1 = s_2,$$

которое, как правило, не выполняется для сравниваемых стратегий.

**Определение 2.** Стохастическое доминирование второго порядка возникает [11], если

$$\tilde{F}_1(x) \leq \tilde{F}_2(x) \text{ для всех } x \in (-\infty; \infty), \quad (14)$$

$$\text{где } \tilde{F}_1(x) = \int_{-\infty}^x F_1(x) dx.$$

Доминирование второго порядка эквивалентно выполнению условия  $P\{u(\xi_1) \geq x\} \geq P\{u(\xi_2) \geq x\}$  для всех  $x \in (-\infty; \infty)$  при любой неубывающей вогнутой функции полезности  $u(x)$ . Поэтому такой подход к сравнению случайных величин используется в теории риска при анализе инвестиционных проектов [12].

Для нормально распределенных случайных величин доминирование второго порядка  $\xi_1 \geq \xi_2$  эквивалентно соотношению

$$a_1 \geq a_2, s_1 \leq s_2.$$

Если одно из неравенств строгое, то имеет место строгое предпочтение  $\xi_1 > \xi_2$ .

Сравним результаты имитационного моделирования, полученные при оценке реакции клиентов на анализируемые стратегии холдинга (табл. 2).

С точки зрения теории риска (доминирования второго порядка) все три предложенные стратегии несравнимы, т.е. среди них нет доминирующих, так как стратегии с большим ожидаемым средним доходом имеют больший разброс (риск):

$$m_1 \geq m_3 \geq m_2, s_1 \geq s_3 \geq s_2.$$

Результаты имитационного моделирования

Стратегия	Изменение дохода компании $\eta_i$
$U_1$	$N(1,015; 0,0081)$
$U_2$	$N(0,997; 0,0028)$
$U_3$	$N(1,007; 0,0048)$

Таким образом, с прикладной точки зрения выбор стратегии на основе стохастического доминирования неприменим к анализируемым стратегиям.

Рассмотрим другие критерии выбора стратегии, такие как квантильный и вероятностный.

Критерий максимума прибыли, получаемой с заданной вероятностью  $\beta > 0,5$ , т.е. максимум 95 % квантили распределения, определяется следующим образом:

$$D_\beta(U_i) \rightarrow \max_i, P\{D(U_i) \geq D_\beta(U_i)\} \geq \beta. \quad (15)$$

Выберем вероятность  $\beta = 0,9$ . Так как увеличение дохода моделируется с помощью нормального распределения, то  $D_\beta(U_i)$  вычисляется по формуле

$$D_\beta(U_i) = m_i - \tau_\beta \sigma_i = m_i - 1,28\sigma_i.$$

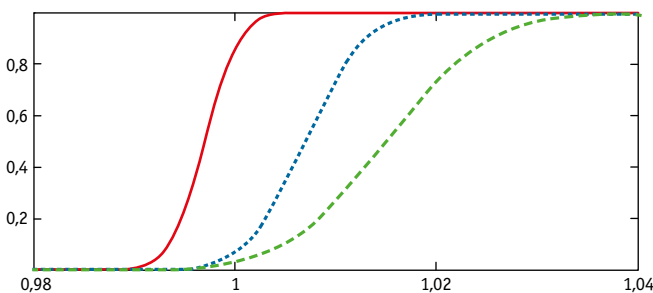
Получим  $D_{0,9}(U_1) = 1,004$ ;  $D_{0,9}(U_2) = 0,993$ ;  $D_{0,9}(U_3) = 1,000$ .

Найдем также решение по критерию минимума вероятности получить убытки (т.е. уменьшить доход):

$$P(U_i) = P\{D(U_i) < D_0\} = P\{\eta(U_i) < 1\} \rightarrow \min. \quad (16)$$

Учитывая нормальное распределение случайных величин  $\eta(U_i)$ , получим следующие значения вероятности убытков:  $P(U_1) = 0,03$ ;  $P(U_2) = 0,85$ ;  $P(U_3) = 0,072$ .

Таким образом, хотя с точки зрения теории рисков результаты моделирования  $\eta_i = \eta(U_i) \sim N\{m_i, \sigma_i\}$  несравнимы, но, согласно квантильному и вероятностному критериям, стратегия  $U_1$  является наиболее оптимальной из рассмотренных, что подтверждают графики функций распределения (рис. 3).



**Рис. 3.** Функции распределения  $F_i(x)$  для анализируемых стратегий: зеленый — первая стратегия; красный — вторая стратегия (постоянная скидка); синий — третья стратегия (скидка в зависимости от расстояния)

Как видно из рис. 3,  $F_2(x) > F_3(x) > F_1(x)$  для всех  $x \geq 1$ , а значит:

$$P\{\eta_2 \geq x\} < P\{\eta_3 \geq x\} < P\{\eta_1 \geq x\} \text{ для всех } x \geq 1.$$

Таким образом, в статье рассмотрены стратегии железнодорожного перевозчика по работе с грузовладельцами, направленные на увеличение объемов перевозки, получаемой прибыли и повышение лояльности клиентов. Реакция грузовладельцев на изменение стратегий перевозчика моделируется как случайная величина, параметры распределения которой зависят от класса отгружаемого груза и конкретной стратегии перевозчика.

Результаты исследования показывают, что наиболее предпочтительно использовать стратегию  $U_1$  — развитие допол-

нительных транспортно-логистических услуг. Хотя эта стратегия не обеспечивает увеличение объемов перевозок, тем не менее она позволяет повысить и доходы холдинга (за счет предоставления дополнительных услуг), и лояльность грузоотправителей (за счет улучшения транспортного сервиса). Стратегии  $U_2$  и  $U_3$  увеличивают объем перевозки, однако велика вероятность того, что они могут стать убыточными. Это обусловлено тем, что грузы разного класса имеют разную рентабельность железнодорожных перевозок и разное распределение в общей доле погрузки. Таким образом, учитывая риски, связанные с существующим в общей погрузке распределением грузов по классам, и сложности при согласовании размеров и условий скидок, обусловленные действующей тарифной политикой, стратегии  $U_2$  и  $U_3$  к реализации не рекомендуются.

## Литература

1. Тимофеева Г. А., Хазимуллин А. Д. Анализ стратегий по привлечению клиентов транспортно-логистических услуг холдинга «РЖД» с учетом дифференциации клиентов // Вестник УрГУПС. 2023. № 1 (57). С. 64–72. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-1-64-72. ISSN 2079-0392.
2. Тимофеева Г. А., Завалищин Д. С. Игра со случайным вторым игроком и ее приложение к задаче о выборе цены проезда // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2021. Т. 57. С. 170–180. DOI: 10.35634/2226-3594-2021-57-08. ISSN 2226-3594.
3. Об утверждении Приказа № 10–01 «Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами: Постановление ФЭК РФ от 17.06.2003 г. № 47-т/5. URL: <https://base.garant.ru/12131790/?ysclid=lef7u7e1gc124415679> (дата обращения: 10.10.2023).
4. Российские железные дороги. Годовой отчет 2021. URL: [https://ar2021.rzd.ru/download/full-reports/ar\\_ru\\_annual-report\\_spreads\\_rzd\\_2021.pdf](https://ar2021.rzd.ru/download/full-reports/ar_ru_annual-report_spreads_rzd_2021.pdf) (дата обращения: 10.12.2022).
5. Ишеева И. А., Кузнецова О. А., Дворникова Ю. В. Современные подходы к стимулированию спроса на грузовые перевозки // Наука и образование транспорту. 2017. № 1. С. 178–181.
6. Оценка качества услуг грузовых железнодорожных перевозок: отчет ВЦИОМ по результатам опроса пользователей. Москва, 2022.
7. Jourquin B., Beuthe M. Cost, transit time and speed elasticity calculations for the European continental freight transport // Transport Policy. 2019. Vol. 83. Pp. 1–12.
8. Соколов Ю. И., Лавров И. М. Экономическое влияние качества на изменение объема грузовых перевозок на рынке железнодорожного транспорта // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 41–43. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_2\_41. ISSN 2072-8689.

## References

1. Timofeeva G. A., Khazimullin A. D. Analysis of strategies to attract customers of transport and logistics services of «Russian railways» holding, taking into account customer differentiation [Analiz strategiy po privlecheniyu klientov transportno-logisticheskikh uslug kholdinga «RZhD» s uchetom differentsiatsii klientov]. Herald of USURT. 2023. No. 1 (57). Pp. 64–72. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-1-64-72. ISSN 2079-0392.
2. Timofeeva G. A., Zavalishchin D. S. Game with a random second player and its application to the problem of optimal fare choice [Igra so sluchaynym vtorym igrom i ee prilozhenie k zadache o vybore tseny proezda]. Proceedings of the Institute of Mathematics and Informatics at Udmurt State University. 2021. Vol. 57. Pp. 170–180. DOI: 10.35634/2226-3594-2021-57-08. ISSN 2226-3594.
3. On the approval of the Price List No. 10-01 «Tariffs for cargo transportation and infrastructure services performed by Russian railways» [Ob utverzhdenii Preyskuranta No. 10-01 «Tarify na perevozki грузов i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami»]. The Order of the FEC of the Russian Federation dated 17.06.2003 No. 47-t/5. URL: <https://base.garant.ru/12131790/?ysclid=lef7u7e1gc124415679> (access date: 10.10.2023).
4. Russian Railways. Annual Report 2021 [Rossiyskie zheleznye dorogi. Godovoy otchet 2021]. URL: [https://ar2021.rzd.ru/download/full-reports/ar\\_ru\\_annual-report\\_spreads\\_rzd\\_2021.pdf](https://ar2021.rzd.ru/download/full-reports/ar_ru_annual-report_spreads_rzd_2021.pdf) (access date: 10.12.2022).
5. Isheeva I. A., Kuznetsova O. A., Dvornikova Yu. V. Up-to-date approaches for the stimulation of the demands for freight transportations [Sovremennyye podkhody k stimulirovaniyu sprosa na gruzovyye perevozki]. Science and education for transport. 2017. No. 1. Pp. 178–181.
6. Assessment of the quality of freight railway transportation services [Otsenka kachestva uslug gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozok]. VCIOM (Russian Public Opinion Research Center) report based on the results of a user survey. Moscow, 2022.
7. Jourquin B., Beuthe M. Cost, transit time and speed elasticity calculations for the European continental freight transport. Transport Policy. 2019. Vol. 83. Pp. 1–12.
8. Sokolov Yu. I., Lavrov I. M. Economic impact of quality on the change in the volume of freight traffic in the railway transport market [Ekonomicheskoe vliyaniye kachestva na izmeneniye



9. Лепский А. Е. Стохастическое и нечеткое упорядочивание методом минимальных преобразований // Автоматика и телемеханика. 2017. № 1. С. 59–79. ISSN 0005-2310.
  10. Arcones M. A., Kvam P. H., Samaniego F. J. Nonparametric Estimation of a Distribution Subject to a Stochastic Precedence Constraint // J. Amer. Stat. Assoc. 2002. Vol. 97. No. 457. Pp. 170–182.
  11. Арефьева И. Ю. Стохастическое доминирование в условиях рисковости разных степеней // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2009. № 4. С. 25–32. ISSN 1811–9905.
  12. Ватник П. А. Теория риска. Санкт-Петербург : СПбГИЭУ, 2009. 156 с.
9. об’єкта вантажних перевезок на ринку залізничного транспорту]. Transport business of Russia. 2022. No. 2. Pp. 41–43. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_2\_41. ISSN 2072-8689.
  9. Lepskiy A. E. Stochastic and fuzzy ordering with the method of minimal transformations [Stokhasticheskoe i nechetkoe uporyadochivanie metodom minimal’nykh preobrazovaniy]. Automation and Remote Control. 2017. No. 1. Pp. 59–79. ISSN 0005-2310.
  10. Arcones M. A., Kvam P. H., Samaniego F. J. Nonparametric Estimation of a Distribution Subject to a Stochastic Precedence Constraint. J. Amer. Stat. Assoc. 2002. Vol. 97. No. 457. Pp. 170–182.
  11. Arefeva I. Yu. Stochastic dominance in conditions of different degree of risk [Stokhasticheskoe dominirovanie v usloviyakh riskovosti raznykh stepeney]. Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. 2009. No. 4. Pp. 25–32. ISSN 1811-9905.
  12. Vatnik P. A. Theory of risk [Teoriya riska]. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Economics, 2009. 156 p.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 656.078

**Александр Валериевич Мартыненко**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), Екатеринбург, Россия,

**Елена Геннадьевна Филиппова**, старший преподаватель кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРОДСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МАРШРУТА НА ТРАНСПОРТНУЮ ДОСТУПНОСТЬ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

**Alexander Valerievich Martynenko**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Senior Researcher, Productive Forces Development and Placement Centre, Institute of Economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences (IE UB RAS), Ekaterinburg, Russia,

**Elena Gennadyevna Filippova**, Senior Lecturer, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Modelling of the influence of the urban circle railway route on the transport accessibility depending on the characteristics of the street and road network

#### Аннотация

Во многих крупных городах мира активно используется и развивается городской железнодорожный транспорт. Этот вид общественного транспорта обладает целым рядом преимуществ — высокой скоростью, экологичностью, безопасностью, комфортабельностью и т. п., которые обеспечивают высокий уровень спроса и тем самым способствуют снижению загруженности улично-дорожной сети (УДС). К тому же перечисленные эффекты значительно усиливаются для кольцевого маршрута. При этом очевидно, что эффективность подобных маршрутов зависит от большого количества факторов, среди которых фундаментальную роль играют размер УДС и средняя скорость движения общественного транспорта.

В статье рассмотрена модель упрощенной городской системы общественного транспорта для прямоугольной УДС с кольцевым железнодорожным маршрутом. При помощи этой модели проанализировано влияние размеров УДС на эффективность маршрута, в частности на улучшение транспортной доступности.

На основе сравнения эффективности кольцевых маршрутов для двух смоделированных УДС разного размера получены показатели транспортной доступности и установлено, что для большей сети эффективность кольцевого железнодорожного маршрута значительно выше.

**Ключевые слова:** улично-дорожная сеть, моделирование, транспортная сеть, кольцевая железнодорожная линия, транспортный район, центрост

#### Abstract

Most of the world largest cities actively use and develop the urban railway transport. This means of public transport has a range of advantages — high speed, ecology, safety, comfort, etc., which provides a high level of demands, and therefore contributes the decrease of the street and road network intensiveness (SRN). Moreover, the above mentioned effects are strengthened greatly for a circle route. At the same time, it is obvious, that the effectiveness of such routes depends upon a great number of factors where the length of the SRN and the average speed of the public transport have a fundamental role.

The article describes the model of a simplified system of the urban public transport for a rectangular SRN with a circle railway route. This model helped analyze the influence of the SRN size on the route effectiveness, particularly on the improvement of the transport accessibility.

On the bases of the comparison of the effectiveness of the circle routes for two different size modelled SRN the indicators of the transport accessibility are received and it is imposed that for the longer network the effectiveness of the circle railway route is much higher.

**Keywords:** street and road network, modelling, transport network, circle railway line, transport district, centroid

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-41-46

41

Октябрь–Декабрь

## ВВЕДЕНИЕ

Городской железнодорожный транспорт активно используется и развивается во многих странах, позволяя эффективно соединять отдаленные районы и муниципалитеты агломерации в единый транспортный каркас. Например, в Германии кольцевая железная дорога Berlin Ringbahn эксплуатируется с конца XIX в., ежедневный пассажиропоток составляет около 400 тыс. чел., кроме того, кольцевой маршрут широко используется и для грузовых перевозок [1]. А кольцевая линия «Яманотэ» в Токио была открыта в 1930-е гг. и на сегодняшний день является самой загруженной в мире: ежедневный пассажиропоток составляет 3,8 млн пассажиров [2].

В России кольцевой железнодорожный маршрут был введен в эксплуатацию в 2016 г. в Москве под официальным названием «Московское центральное кольцо» (МЦК). МЦК имеет протяженность 54 км и включает 31 станцию, а ежедневный пассажиропоток составляет около 580 тыс. человек [3, 4].

Эти и другие успешные примеры становятся стимулом для развития городских железнодорожных линий в крупных городах России. Например, в Тюмени планируется создание двух кольцевых железнодорожных маршрутов «Заречный» и «Восточный», а в Казани — внутригородской кольцевой железной дороги [5–7]. Также в настоящее время правительство Свердловской области совместно с мэрией Екатеринбурга и ОАО «РЖД» ведут проектную работу «Екатеринбургское центральное пассажирское кольцо» [8]. Основная концепция проекта заключается не только в транспортной интеграции отдельных районов города (таких как аэропорт Кольцово, микрорайоны Солнечный, Академический, Широкая Речка, ВИЗ), но и в соединении Екатеринбурга с муниципальными образованиями его агломерации (Первоуральском, Среднеуральском, Березовским, Верхней Пышмой, Сысертью, Арамилем, Ревдой) [9]. Логистическая роль Екатеринбургского центрального пассажирского кольца предусматривает 8 перспективных направлений, генерация нового пассажиропотока с периферии, а также существенное переключение пассажиропотока с других видов транспорта, что в конечном счете должно способствовать снижению транспортной нагрузки на улично-дорожную сеть (УДС) города. По предварительным прогнозам экспертов запуск кольцевого железнодорожного маршрута позволит разгрузить общественный транспорт Екатеринбурга на 5–20 % и сократить пробок в центральной части города до 5–7 баллов [10].

Очевидно, что эффективность железнодорожного городского транспорта зависит от многих факторов: размеров города, численности и плотности его населения, скорости железнодорожного и других видов транспорта (что, в свою очередь, зависит от уровня развития УДС и количества транспортных средств), используемых технологий автоматизации движения поездов, оплаты за проезд и т.д. Однако фундаментальную роль будут играть размеры города и скорость движения разных видов общественного транспорта. Что касается крупных мегаполисов, таких как Токио или Москва, имеющих высокую загруженность УДС, в них городской железнодорожный транспорт особенно эффективен и востребован, поскольку обеспечивает существенное сокращение временных затрат значительной доли внутригородских транспортных корреспонденций. Для

менее крупных городов эффективность этого вида транспорта будет ниже. Соответственно возникает необходимость в изучении того, как основные характеристики транспортной системы влияют на эффективность городского железнодорожного транспорта.

В настоящей статье рассматривается предложенная авторами модель городской УДС с кольцевым железнодорожным маршрутом. С помощью этой модели исследуется влияние основных параметров УДС (таких как размер, средняя скорость движения общественного транспорта, временные затраты на пересадку и т.п.) на изменение транспортной доступности при введении кольцевого железнодорожного маршрута.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассмотрим упрощенную модель транспортной сети в виде прямоугольной сетки  $n \times n$ , расстояния между соседними узловыми точками которой обозначим через  $d$ . Будем считать, что общественный транспорт (например, автобусы) курсирует по вертикальным и горизонтальным линиям УДС, причем пересадка с маршрута на маршрут возможна в любой узловой точке транспортной сети. Для моделирования пересадки в каждой узловой точке добавим четыре ребра, вес которых равен затратам времени пассажира на пересадку между разными маршрутами общественного транспорта. Каждый из  $n^2$  получившихся квадратов прямоугольной сети будем рассматривать как транспортный район — элементарную единицу пространственной структуры области моделирования. Геометрический центр транспортного района назовем центроидом. К исследуемой УДС добавим кольцевую железнодорожную линию с центром  $\left(\frac{d \cdot n}{2}; \frac{d \cdot n}{2}\right)$  и радиусом  $d \cdot k$ , по которой будут курсировать городские электрички. В точках пересечения кольцевой линии с исходной УДС также добавим ребра, вес которых равен затратам времени пассажира на пересадку между прямолинейными и кольцевым маршрутами. Кроме того, добавим ребра, соединяющие центроиды с вершинами сети. Вес таких ребер — среднее время, необходимое пешеходу, чтобы дойти от дома до ближайшей остановки общественного транспорта.

Визуализацию модели УДС с кольцевым маршрутом для случая  $n = 6$  и  $k = 2$  иллюстрирует рис. 1, на котором зеленым цветом выделена исходная прямолинейная УДС, синим — ребра, вес которых соответствует времени пересадки, серым — ребра, соединяющие центроиды с вершинами сети, красным — кольцевая линия.

Для моделирования функционирования транспортной системы, изображенной на рис. 1, будем использовать следующие параметры:

- расстояние между узловыми точками сети  $d$ , км;
- количество магистралей по каждому направлению  $n$ ;
- радиус кольца  $d \cdot k$ , км;
- время пересадки с одного автобуса на другой  $\tau_A$ , ч;
- время, необходимое пешеходу, чтобы дойти от центроида до ближайшей остановки транспорта,  $\tau_p$ , ч;
- скорость автобуса  $V_A$ , км/ч;
- время пересадки с автобуса на поезд и наоборот  $\tau_T$ , ч;
- скорость поезда кольцевой магистрали  $V_T$ , км/ч.

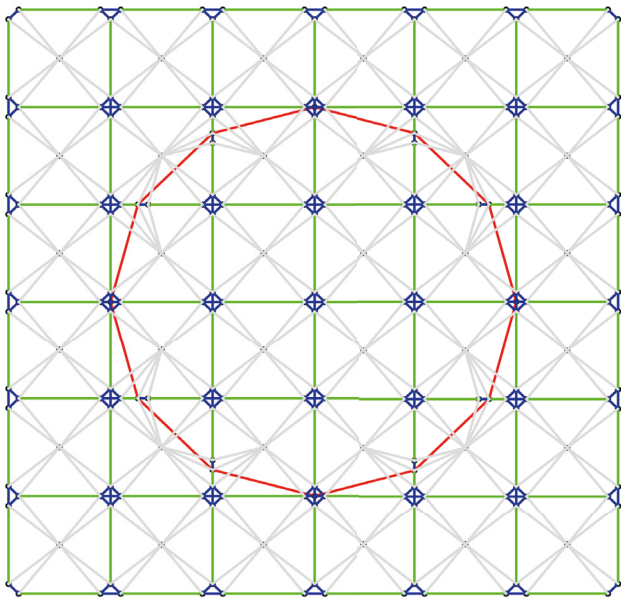


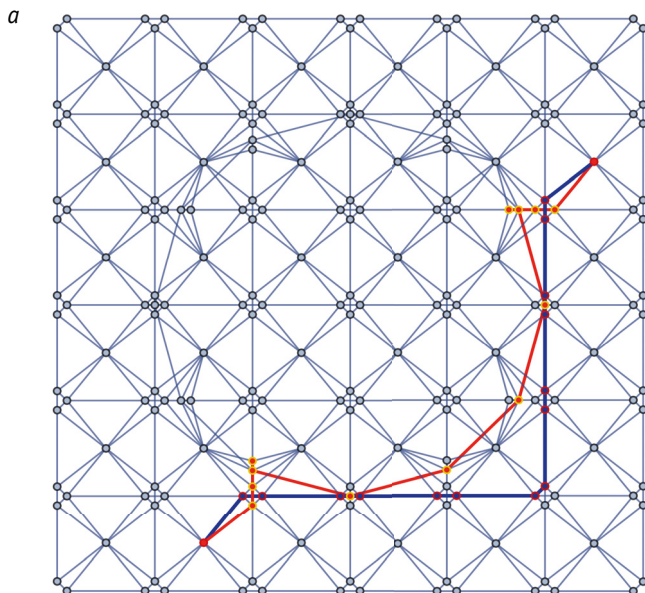
Рис. 1. Визуализация модели УДС с кольцевой линией

На основании введенных параметров и предположения, что пассажиры выбирают наименее продолжительные маршруты, для каждой пары транспортных районов  $i$  и  $j$  можно рассчитать затраты времени на перемещение между ними по УДС без использования и с возможностью использования кольцевого железнодорожного маршрута. Первую из этих величин обозначим как

$$T_{old}(d, n, k, \tau_A, \tau_f, V_A, i, j), \quad (1)$$

а вторую как

$$T_{new}(d, n, k, \tau_A, \tau_f, V_A, \tau_T, V_T, i, j). \quad (2)$$



Чтобы оценить эффективность кольцевого железнодорожного маршрута, необходимо получить все корреспонденции, для которых такой маршрут сокращает временные затраты. С этой целью, рассмотрев всевозможные пары  $(i, j)$  вершин центров и для каждой пары вычислив время, затраченное на передвижение из вершины  $i$  в вершину  $j$ , получим матрицу временных затрат. В качестве характеристики улучшения примем коэффициент улучшения, который определяется как

$$k_{улуч} = \frac{T_{new}(d, n, k, \tau_A, \tau_f, V_A, \tau_T, V_T)}{T_{old}(d, n, k, \tau_A, \tau_f, V_A)}. \quad (3)$$

Затем возьмем только те пары вершин, для которых выполняется отношение  $k_{улуч} < 1$ . Тем самым получим все корреспонденции, для которых кольцевой железнодорожный маршрут снижает временные затраты. Такие корреспонденции назовем улучшенными.

На рис. 2 показан пример рассмотренной модели для значений параметров, представленных в табл. 1. Поясним, что на рис. 2а синим цветом обозначен кратчайший маршрут между двумя заданными вершинами автобусного сообщения, красным цветом — кратчайший маршрут с использованием кольцевой магистрали. На рис. 2б выделены 34 улучшенные корреспонденции, для которых  $k_{улуч} < 0,85$  и сокращение временных затрат на передвижение составляет в среднем 20 %. Соответствующие пары соединены линиями зеленого цвета.

Таблица 1

Значения параметров моделирования

Параметр	$d$	$n$	$d \cdot k$ , км	$\tau_A$ , ч	$\tau_f$ , ч	$V_A$ , км/ч	$\tau_T$ , ч	$V_T$ , км/ч
Значение	2	6	4	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	16	$\frac{1}{6}$	40

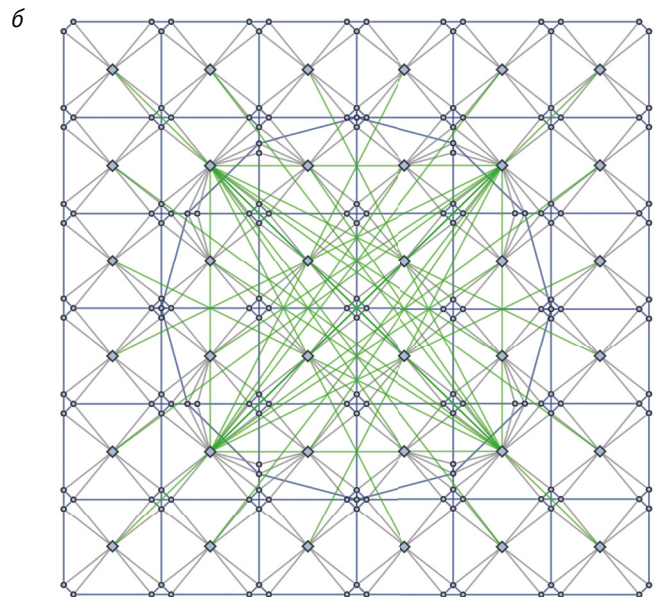


Рис. 2. Визуализация улучшения городской УДС

Таблица 2

Значения параметров для моделирования УДС Е и УДС М

Параметр	$d$	$n$	$d \cdot k$ , км	$\tau_{\Delta}$ , ч	$\tau_{\rho}$ , ч	$V_{\Delta}$ , км/ч	$\tau_T$ , ч	$V_T$ , км/ч
УДС Е	2	8	6	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	24	$\frac{1}{6}$	40
УДС М	2	20	12	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	16	$\frac{1}{6}$	50

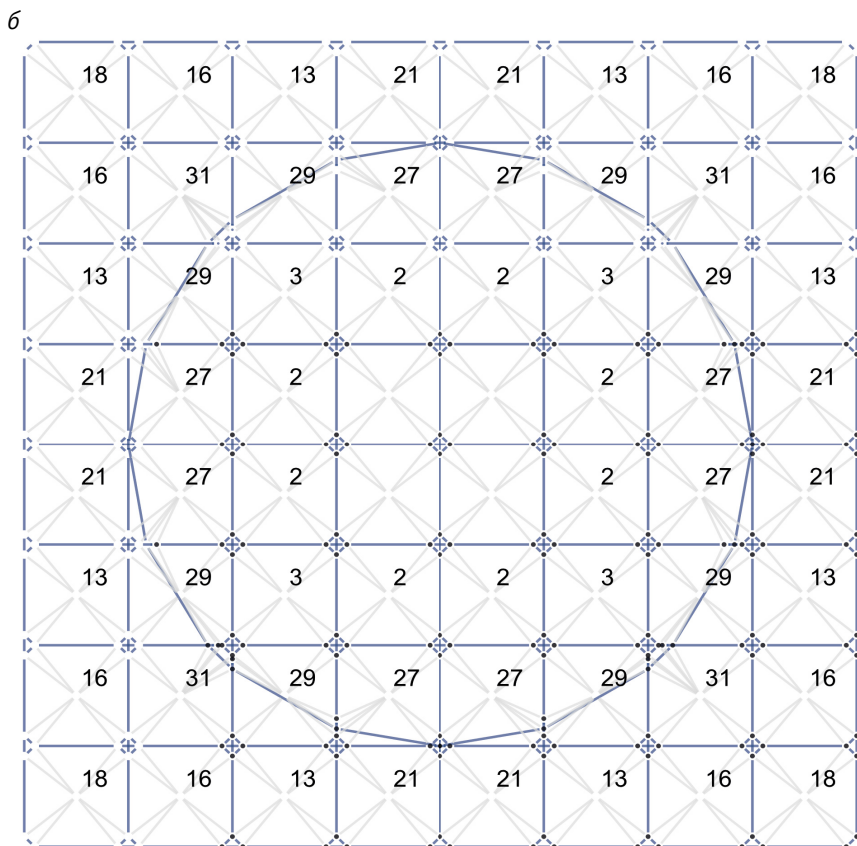
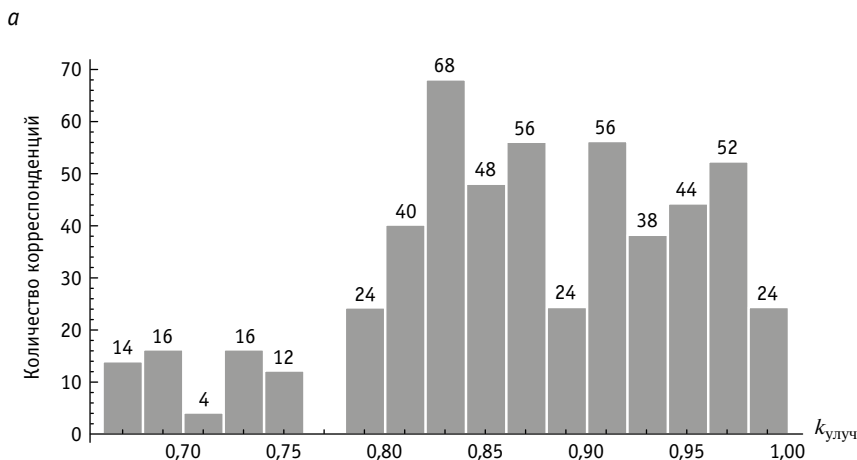


Рис. 3. Результаты моделирования всех улучшенных корреспонденций для среднего города

### СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВОГО МАРШРУТА ДЛЯ ГОРОДОВ РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ

Изучим изменение характеристик улучшения сети в зависимости от ее параметров. Для этого сравним два города разных размеров. В рамках рассматриваемой модели принципиальные различия между такими городами сводятся к разнице размеров УДС и скорости движения общественного транспорта. Значения параметров, при которых выполнено моделирование, приведены в табл. 2 (поскольку эти значения примерно соответствуют значениям УДС Москвы и Екатеринбурга, улично-дорожная сети двух сравниваемых городов обозначены как УДС М и УДС Е).

Рассмотрим все улучшенные корреспонденции, т.е. такие, для которых  $k_{улуч} < 1$ . Для УДС Е из 2016 корреспонденций улучшенными являются 536 пар вершин. Частотное распределение  $k_{улуч}$  показано на рис. 3а (по горизонтальной оси отложены значения  $k_{улуч}$ , по вертикальной — число корреспонденций, у которых временные затраты на перемещение сократились). Количество улучшенных корреспонденций, соединяющих каждый центроид с другими центроидами, представлено на рис. 3б.

Аналогичное моделирование выполнено для УДС М размера 20×20, получены все корреспонденции, в которых кольцевой железнодорожный маршрут сокращает временные затраты на передвижение. Частотное распределение  $k_{улуч}$  для этого случая представлено на рис. 4а, количество улучшений по каждой вершине центроида — на рис. 4б.

Отметим, что для УДС М доля улучшенных корреспонденций составляет 61 %, средняя экономия в пути — 26 %, а для УДС Е — соответственно 27 и 14 %. Кроме того, сравнение гистограмм показывает, что для УДС М характерно большое количество улучшенных корреспонденций при  $k_{улуч} \leq 0,6$ . Например, при  $k_{улуч} = 0,6$  улучшения получены для 4968 корреспонденций, при  $k_{улуч} = 0,5$  количество таких корреспонденций 598, причем их среднее время в пути сократилось на 53,6 %. Что касается УДС Е, здесь нет ни одной улучшенной корреспонденции с  $k_{улуч} \leq 0,65$ .

Из сравнительного анализа (см. рис. 3б и 4б) следует, что наибольшее число улучшенных корреспонденций

имеют вершины центроидов, расположенные вблизи кольца. Кроме того, 8 вершин, удаленных от центра УДС Е на расстоянии  $\frac{2 \cdot d \cdot k}{3}$ , имеют всего по две улучшенных корреспонденций, в то время как на УДС М 8 вершин, удаленных от центра на расстояние  $\frac{d \cdot k}{2}$ , имеют по 14 улучшенных, и еще для 8 вершин число улучшенных корреспонденций равно 41. Также из рис. 3б и 4б видно, что у достаточно многих центроидов УДС М число улучшенных корреспонденций превышает 50 % от общего их количества (а у некоторых центроидов достигает 75 %), в то время как у всех центроидов УДС Е эти показатели значительно ниже (количество улучшенных корреспонденций не более 50 %).

Проведенный сравнительный анализ показал, что размер города существенно влияет на эффективность кольцевого городского железнодорожного маршрута: чем больше город, тем выше положительный эффект. Прежде всего это связано с тем, что в крупных городах больше длинных корреспонденций, для которых пешеходная часть маршрута и пересадки составляют незначительную часть общих временных затрат. Следовательно, для них эффект от замены «медленной» части маршрута, использующей стандартный общественный транспорт, на «быстрый» кольцевой будет иметь максимальный эффект. Также чем больше город, тем выше загрузка УДС, а следовательно, тем ниже скорость общественного транспорта, что дает преимущество железнодорожному маршруту. Наконец, у крупного города больше финансовых и технологических возможностей для обеспечения высокой скорости движения железнодорожного транспорта, что также повышает конкурентоспособность последнего. Совокупность всех перечисленных факторов обеспечивает нелинейную (превосходящую линейную) зависимость эффективности городского кольцевого железнодорожного

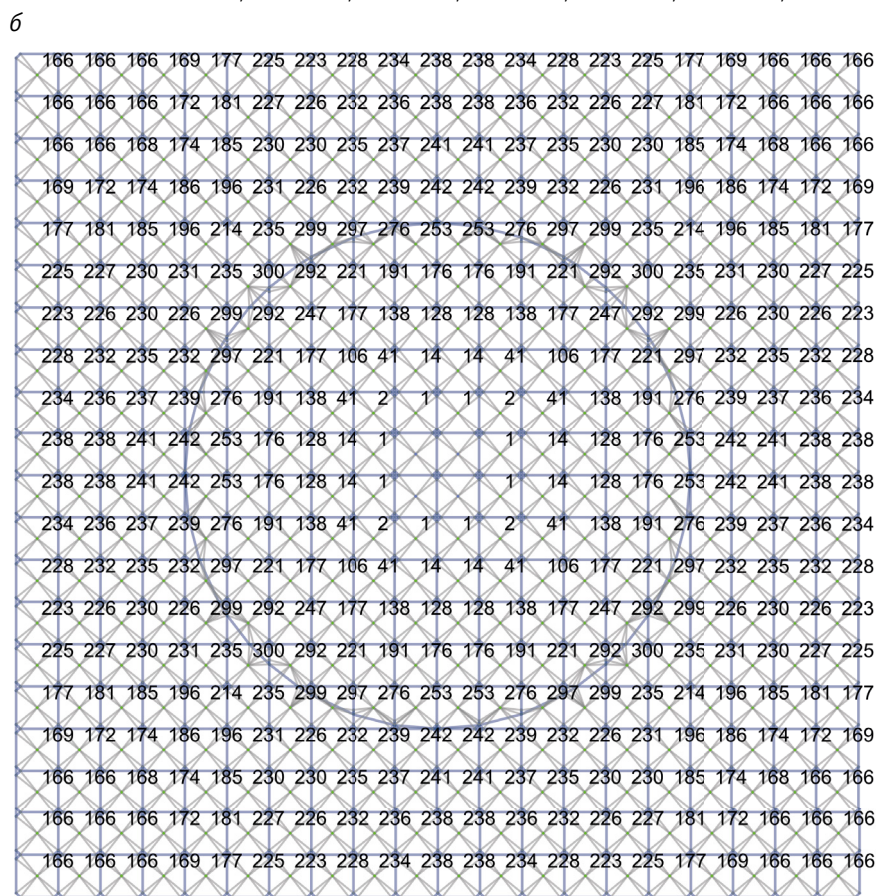
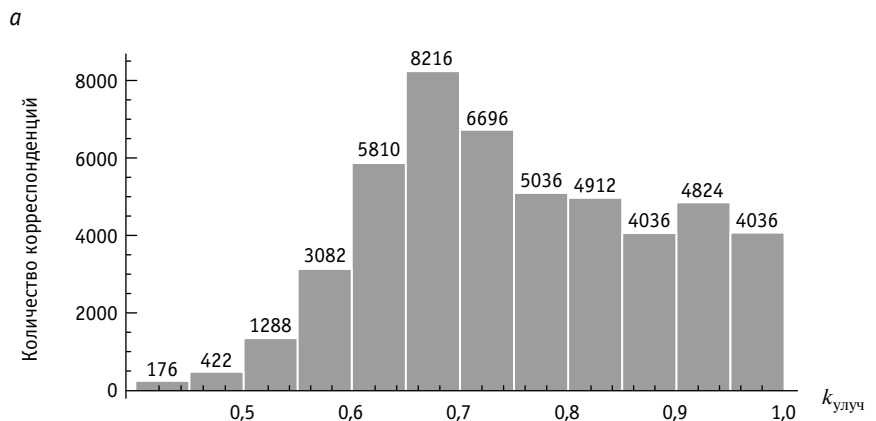


Рис. 4. Результаты моделирования всех улучшенных корреспонденций для крупного города

маршрута от размеров города и его активное развитие в крупных мегаполисах. В то же время и в городах меньшего размера кольцевой железнодорожный

маршрут может улучшить транспортную связь и стать достаточно эффективным, особенно при возможности высокой скорости движения.

## Литература

1. Бутко С. О. Окружные железные дороги европейских столиц. Функциональное использование // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 1. С. 68–73. ISSN 2077-9038.
2. Авдаков И. Ю. История становления и развития городского железнодорожного транспорта Японии (1945–2005 гг.). Часть II // Ежегодник Японии. 2009. № 38. С. 130–140. ISSN 2687-1432.
3. Власов Д. Н., Бахирев И. А. Московское центральное кольцо как катализатор изменения мобильности жителей // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 1. С. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-1-53-58>. ISSN 2077-9038.
4. Транспортная модель Московского региона / А. Э. Воробьев, А. Ю. Титов, В. А. Гаврилин, А. Ю. Меньшутин, И. А. Бахирев // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сер. : Механика, управление и информатика. Москва, 2015. С. 49–62.
5. О внесении изменений в распоряжение Главного управления строительства Тюменской области от 25.08.2022 г. № 94-р: распоряжение Главного управления строительства Тюменской области от 06.09.2023 г. № 110-р. URL: [https://admtymen.ru/ogv\\_ru/finance/town\\_planning/more.htm?id=12035508@cmsArticle](https://admtymen.ru/ogv_ru/finance/town_planning/more.htm?id=12035508@cmsArticle) (дата обращения: 12.09.2023).
6. Генеральный план городского округа Казань. Положение о территориальном планировании. URL: <https://kzn.ru/meriya/ispolnitelnyy-komitety/ upravlenie-arkhitektury-i-gradostroitelstva-ispolnitelnogo-komiteta-g-kazani/gradostroitelstvo/?lang=ru> (дата обращения: 21.09.2023).
7. Генплан Казани (до 2040 года). URL: <https://genplanmos.ru/project/genplan-kazani-do-2040-goda/> (дата обращения: 09.09.2023).
8. Проект о внесении изменений в Генеральный план развития городского округа — муниципального образования «город Екатеринбург» на период до 2025 года. URL: <https://ekaterinburg.rf/dlyaraboty/giz/gradostroitelstvo/dokumentatsiya/gp> (дата обращения: 02.09.2023).
9. Ямщикова В. Губернатор рассказал, как наземное метро свяжет Екатеринбург с соседними городами. URL: <https://66.ru/news/society/248597/> (дата обращения: 13.09.2023).
10. Марьяненко Р. Каким будет наземное метро Екатеринбурга: рассказываем о проекте в картинках и схемах. URL: <https://www.e1.ru/text/transport/2021/03/22/69820274/> (дата обращения 08.09.2023).

## References

1. Butko S. O. Circle railways of the European Capitals. Functional use [Okruzhnye zheleznye dorogi evropeyskikh stolits. Funktsional'noe ispol'zovanie]. Academia. Architecture and Construction. 2009. No. 1. Pp. 68–73. ISSN 2077-9038.
2. Avdakov I. Y. History of establishment and development of city railway transport in Japan (1945–2005), part II [Istoriya stanovleniya i razvitiya gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta Yaponii (1945–2005 gg.). Chast' II. Yearbook Japan. 2009. No. 38. Pp. 130–140. ISSN 2687-1432.
3. Vlasov D. N., Bakhirev I. A. The Moscow Central Circle as a Catalyst for Change of Residential Mobility [Moskovskoe tsentral'noe kol'tso kak katalizator izmeneniya mobil'nosti zhiteley]. Academia. Architecture and Construction. 2018. No. 1. Pp. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-1-53-58>. ISSN 2077-9038.
4. Vorobyov A. E., Titov A. Yu., Gavrilin V. A., Men'shutin A. Yu., Bakhirev I. A. Moscow region transport model [Transportnaya model' Moskovskogo regiona]. Computational technologies in natural sciences. Supercomputer modeling methods. Ser. Mechanics, Management and Informatics. Moscow, 2015. Pp. 49–62.
5. About the changes in the Decree of the Directorate of Building of Tyumen region from 25.08.2022. No. 94-r [O vnesenii izmeneniy v rasporyazhenie Glavnogo upravleniya stroitel'stva Tyumenskoy oblasti ot 25.08.2022 g. № 94-r]. The Decree of the Directorate of Building of Tyumen region dated 06.09.2023 No. 110-r. URL: [https://admtymen.ru/ogv\\_ru/finance/town\\_planning/more.htm?id=12035508@cmsArticle](https://admtymen.ru/ogv_ru/finance/town_planning/more.htm?id=12035508@cmsArticle) (access date: 12.09.2023).
6. General plan of Kazan urban district. Regulations of the territorial planning [General'nyy plan gorodskogo okruga Kazan'. Polozhenie o territorial'nom planirovanii]. URL: <https://kzn.ru/meriya/ispolnitelnyy-komitety/ upravlenie-arkhitektury-i-gradostroitelstva-ispolnitelnogo-komiteta-g-kazani/gradostroitelstvo/?lang=ru> (access date: 21.09.2023).
7. General plan of Kazan (till 2040) [Genplan Kazani (do 2040 goda)]. URL: <https://genplanmos.ru/project/genplan-kazani-do-2040-goda/> (access date: 09.09.2023).
8. Project of changes to the General plan of the urban district development — municipal education «Ekaterinburg City» till 2025 [Proekt o vnesenii izmeneniy v General'nyy plan razvitiya gorodskogo okruga — munitsipal'nogo obrazovaniya «gorod Ekaterinburg» na period do 2025 goda].
9. Yamshhikova V. The governor told how the ground metro of Ekaterinburg will connect Ekaterinburg with other towns [Gubernator rasskazal, kak nazemnoe metro svyazhet Ekaterinburg s sosednimi gorodami]. URL: <https://66.ru/news/society/248597/> (access date: 13.09.2023).
10. Mar'yanenko R. What will Ekaterinburg ground metro be: the project in pictures and schemes [Kakim budet nazemnoe metro Ekaterinburga: rasskazyvaem o proekte v kartinkakh i skhemakh]. URL: <https://www.e1.ru/text/transport/2021/03/22/69820274/> (access date 08.09.2023).

Объем статьи 0,72 авторских листа

УДК 629.4.015:625.1.03

**Сергей Викторович Кротов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия,**

**Дмитрий Павлович Кононов, доктор технических наук, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,**

**Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## АППРОКСИМАЦИЯ КРИВОЙ ИЗНОСА ПРОФИЛЯ ОБОДА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА, ПРИМЫКАЮЩЕГО К ГРЕБНЮ

**Sergey Viktorovich Krotov, PhD in Engineering, Associate Professor, Structural Mechanics Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia,**

**Dmitriy Pavlovich Kononov, DSc in Engineering, Professor, Mechanical Handling and Road Building Machines Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,**

**Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Approximation of the wear curve of the rim profile of a railway wheel adjoined to the ridge

#### Аннотация

Рассмотрена уточненная модель износа отдельного участка профиля поверхности катания на основе данных, полученных при вычислении кривизны и радиуса изношенного профиля, а также углов наклона касательной к нему при различном прокате. С этой целью используются математические зависимости износа, степенные зависимости для описания кривых износа поверхности колеса при различном расположении точек отсчета. Оценены погрешности расчетов, скорректированы вычисляемые параметры, такие как износ в различных точках. Для дальнейших исследований теоретического характера использованы аналитические выражения, по которым построены графические зависимости. Расчеты выполнены на основе метода конечных разностей, дана оценка погрешности вычислений. Кроме того, используется табличный метод представления значительного количества данных. Результаты исследований будут полезны для понимания сложности процессов и количественной оценки взаимодействия колеса и рельса в контакте.

**Ключевые слова:** износ, профиль катания, метод конечных разностей, синусоида, аппроксимация, аналитическое уравнение

#### Abstract

The article views a specified model of the wear of a separate rolling surface part of a profile based on the data achieved under the calculation of the curve and the radius of the worn profile and also the angles of inclination of a tangent under several rollings. To achieve the goal mathematical dependencies of the wear are used, as well as power-law dependences to describe the wear curves of a wheel surface under different positions of the reference points. The calculations errors are evaluated, the calculating parameters are corrected, such as the wear in different points. For further theoretical researches analytical expressions are used on which graphical dependences are constructed. The calculations are made on the bases of the method of the finite differences, the valuation of the errors of calculations is given. Moreover, a table method of the presentation of a huge number of data is used. The results of the research will be useful for understanding the complicity of the processes and the quantitative evaluation of the interaction of a wheel and a rail in contact.

**Keywords:** wear, tread contour, finite-difference method, sinusoid, approximation, analytical equation

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-47-53

**Т**ехнический прогресс на железнодорожном транспорте неразрывно связан с ростом скоростей, повышением осевых нагрузок, внедрением более совершенных конструкций верхнего строения пути, применением новых композиционных материалов. Это приводит к значительным изменениям в условиях эксплуатации вагонного и локомотивного парка, прежде всего ходовых частей подвижного состава, эксплуатационная надежность и прочность которых должны обеспечивать безопасность движения на железных дорогах.

Эффективность работы на железнодорожном транспорте в значительной степени зависит от надежной и безотказной работы колес — одного из основных элементов подвижного состава. Особую актуальность в настоящее время приобретают вопросы контакта колеса с рельсом.

Уточненные значения износа в различных точках касания колеса и рельса в контакте приведены, например, в работах [1–4] и использованы, в частности, для вычисления тангенсов углов наклона касательных к кривой профиля в этих точках и радиусов кривизны в них [5–8].

Расчеты выполнены по формулам метода конечных разностей. Установлено, что профиль поверхности катания колеса имеет сложное очертание с резко изменяющейся величиной и знаком радиуса [9].

Некоторые данные получены по формулам математического анализа и называются соответственно первой и второй центральными разностями [10–14].



Выражения для конечных разностей используются для получения радиуса кривизны изношенного профиля [1].

На участках, где профильная линия в результате износа представляет собой пологую кривую, первая производная достаточно точно вычисляется и незначительно зависит от расстояния между узловыми точками.

Однако определять вторую производную по используемым соотношениям [1, 2] можно для весьма пологих кривых при отсутствии внутри шага точек перегиба и вершин кривой износа.

Используя зависимости из [1, 2], уравнения для описания кривых износа  $z_i = ay_i^2 + by_i + c$ ,  $\Delta_1 z = a + by + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{a}y + \varphi\right)$  и находя постоянные

$$10^2 \cdot z_{\text{доб}}^{\text{изн}} = -0,1192 \cdot y^2 - 2,190 \cdot y + 47,870,$$

$$\Delta_2 z = -0,000968 \cdot y^2 - 0,01068 \cdot y + 0,1952$$

по графикам [1, 2], суммируем все уравнения вместе и, учитывая, что полная величина износа  $z = 2 + z_0''$ , окончательно получаем следующее расчетное уравнение:

$$z = 2,00 + (48,1852 - 2,15668y - 0,120168y^2 + 2,45 \cdot \sin(0,2327y + 0,745)) \cdot 10^{-2}. \quad (1)$$

Используя это уравнение, находим

$$\text{tg}\beta = z' = (-2,15668 - 0,2403y + 0,57012 \cdot \cos(0,2327y + 0,745)) \cdot 10^{-2}. \quad (2)$$

Вычисленные по уравнению (2) значения  $z'$  приведены в столбце 8 табл. 1. Влияние первой производной на величину  $r$  мало. Поэтому радиус кривизны изношенного профиля колеса будем определять по формуле

$$\frac{1}{r} = z'' = (-0,24034 - 0,13267 \times \sin(0,2327y + 0,745)) \cdot 10^{-2}. \quad (3)$$

Значения  $r$  (мм) приведены в столбце 2 табл. 1 и представлены в виде кривой на рис. 2. Значения  $r$ , вычисленные методом конечных разностей при шаге, равном  $\Delta y = 2,5; 5; 7,5; 10$ , приведены в табл. 1. Сравнивая их со значениями  $r$ , вычисленными по (7) из [1], устанавливаем, что наибольшие колебания в сторону завышения и занижения величины  $r$  будут при шаге 2,5 мм, так как при малом шаге на  $r$  влияют локальные неровности кривой износа и ошибки измерения. При шаге 10 мм сглажены пиковые значения  $r$ , поскольку не учитываются име-

Таблица 1

Величина радиусов кривизны профиля и углов наклона касательных к нему (знак минус у  $r$  опущен)

№ точки на профиле	$r$ , мм, по (3)	$r = \frac{(\Delta y)^2}{z_{i-1} - 2z_i + z_{i+1}}$ при $y$ , мм				$\frac{r_{(12)} - r_{(\Delta y=5)}}{r_{(12)}} \cdot 100\% \quad (3)$	$(\text{tg}\beta = z') \cdot 10^2$		Разница между $z'$ , %
		2,5	5,0	7,5	10		по (2)	$\frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2\Delta y}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	405	-	-	-	-	-	5,623	-	-
3'	314	521	-	-	-	-	4,914	4,880	-0,69
3''	274	240	284	-	-	-3,65	4,053	4,120	+1,65
3'''	270	260	266	290	-	+1,48	3,126	3,120	-0,19
4	301	312	304	312	336	-1,00	2,240	2,240	0,00
4'	378	347	379	385	386	-0,26	1,489	1,480	-0,60
4''	530	625	543	498	481	-2,45	0,922	0,920	-0,26
4'''	767	781	758	646	595	+1,17	0,529	0,560	+5,86
5	929	893	806	760	667	+13,24	0,240	0,260	+8,20
5'	770	521	833	654	588	-8,18	-0,046	-0,120	+61,5
5''	536	1250	625	528	515	-14,24	-0,434	-0,460	+5,63
5'''	382	347	385	383	397	-0,78	-0,993	-0,920	-7,40
6	303	260	312	339	333	-2,97	-1,738	-1,760	+1627
6'	271	272	291	293	319	-7,38	-2,620	-2,700	+3,00
6''	274	391	312	323	329	-12,18	-3,547	-3,480	-1,90
6'''	312	250	329	352	347	-5,17	-4,413	-4,300	-2,56

ющиеся изменения в характере кривой на длине шага. Оптимальным следует признать шаг 5 мм, при котором в подавляющем большинстве точек точность вполне удовлетворительная (столбец 7 табл. 1). Значения  $r$ , вычисленные методом конечных разностей при шаге 5 мм, нанесены на рис. 1 точками внутри треугольников.

Значения первой производной  $z' = \operatorname{tg} \beta$ , найденные в [1] методом конечных разностей, приведены в столбце 9 табл. 1. Ранее уже отмечалось, что на величину  $z'$  влияние размера шага  $\Delta y$  невелико. Вычисления при  $2\Delta y = 5,0$  мм хорошо согласуются со значениями  $z'$  по аналитической формуле (2): в подавляющем большинстве точек расхождение составляет около 3 %; в двух точках — около 8 %, и только в точке 5, вблизи которой производная меняет знак и мала по величине, разница около 60 %.

Кривая износа возле точки 8 очень резко увеличивает кривизну. Поэтому все попытки описать эту кривую с помощью функций вида  $z = a1^{by} + c$ ,  $z = ay^b + c$ ,  $z = ay^4 + by^3 + cy^2 + D$  как каждой отдельно, так и их комбинаций оказались неудовлетворительными. И, только используя

$$z = \frac{1}{ay^2 + by + c} \quad (4)$$

в комбинации с тригонометрическими функциями, удалось получить положительный результат.

Введем обозначение  $\zeta = \frac{1}{z}$ , которое преобразует (4) к виду

$$\zeta = ay^2 + by + c. \quad (5)$$

Поскольку заданная дискретно функция  $z_{\text{доб}}^{\text{изм}} = z^{\text{изм}} - 2$  [1] меняет знак в пределах исследуемого интервала изменения координаты (с началом в точке 6), то ее нельзя непосредственно аппроксимировать уравнением (4).

Для оперирования меньшими числами необходимо принять для аппроксимации функцию  $z = 0,7 - z_{\text{д}}^{\text{н}}$  значения которой приведены в столбце 3 табл. 2. На величину производных и, следовательно, на  $r$  этот выбор никак не повлияет. Поскольку значения  $z_{\text{д}}^{\text{н}}$  были получены в ходе экспериментов [1],

то значения  $\zeta = \frac{1}{0,7 - z_{\text{д}}^{\text{н}}}$  названы опытными и приведены в столбце 4 табл. 2.

Разность двух значений функции  $\zeta$  в точках  $y = y_i$  и  $y_{i+1} = y_{i+h}$  обозначим через  $x$ , тогда

$$x = \zeta_{i+1} - \zeta_i = E \cdot y + D = (2ah)y + (ah + b)h. \quad (6)$$

Вычислив значения  $x$  (столбец 5 табл. 2) и нанеся их на график функции от  $y$  (рис. 2), видим, что они даже приблизительно не укладываются на прямую. Однако этот же график показывает, что функцию  $x = \zeta_{i+1} - \zeta_i$  можно представить в виде суммы двух функций прямой линии и синусоиды. Вся трудность заключается в том, что  $x = f(\zeta)$  задана дискретно, и, чтобы через  $x$  вычислить  $\zeta_{i+1}$ , необходимо иметь значение  $\zeta_i$  в начальной точке ( $\zeta_0$ ). Перейдем от дискретной функции к аналитической, непрерывной.

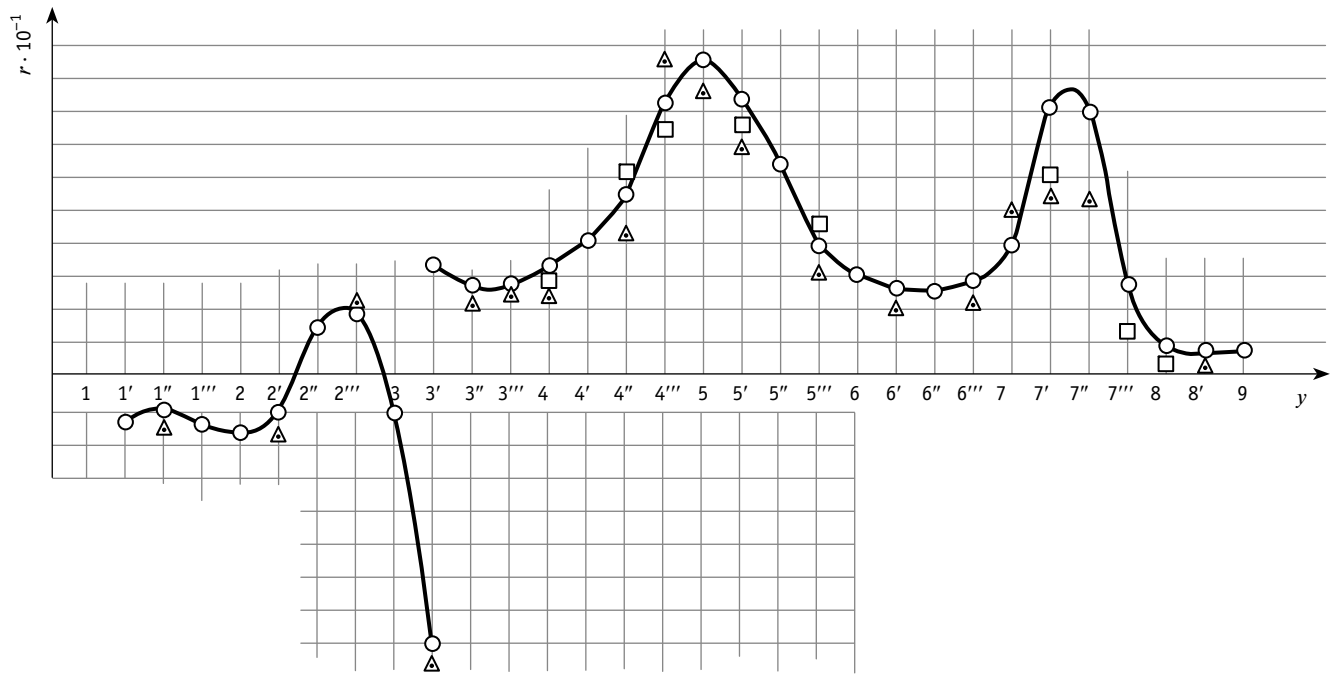


Рис. 1. Изменение радиуса  $r \cdot 10^{-1}$ , мм, вдоль профиля колеса с прокатом  $n = 2,5$  мм:  
 Δ — значения  $r$ , вычисленные методом конечных разностей при шаге  $\Delta y = 2,5$  мм;  
 □ — значения  $r$ , вычисленные методом конечных разностей при шаге  $\Delta y = 5$  мм;  
 ○ — значения  $r$ , вычисленные по аналитическим уравнениям

Таблица 2

Опытные и расчетные величины функции  $\zeta = 1/z$ ,  
 аппроксимирующей кривую износа на участке 6''–9 профиля колеса с  $\Pi = 2,5$  мм

№ точки	y, мм	$z = 0,7 - z_{\text{доп}}^{\text{изн}}$	$\zeta^{\text{оп}}$	$x = \zeta_{i+1} - \zeta_i$	$x_{\text{пр}} = 0,03457 \cdot y - 0,87643$	$x_{\text{син}} = x - x_{\text{пр}}$	$\zeta$ по (6)	$\Delta_1 \zeta = \zeta^{\text{оп}} - \zeta$ (6)	$\zeta_{\text{пр}}$ (8)	$\Delta_2 \zeta = \zeta^{\text{оп}} - \zeta$ (6)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	0	0,200	5,000	-1,0630	-0,8764	-0,1866	4,6653	0,3347	4,7833	0,2167
6'	2,5	0,254	3,9370	-0,9519	-0,7900	-0,1619	3,8320	0,1050	3,9429	-0,0059
6''	5,0	0,335	2,9851	-0,6595	-0,7036	0,0441	2,8804	0,1047	2,9708	0,0143
6'''	7,5	0,430	2,3256	-0,5074	-0,6172	0,1098	2,2553	0,0703	2,3143	0,0113
7	10	0,550	1,8182	-0,3476	-0,5307	0,1831	1,8048	0,0134	1,8253	-0,0071
7'	12,5	0,680	1,4706	-0,2555	-0,4443	0,1888	1,4973	-0,0267	1,4769	-0,0063
7''	15	0,823	1,2151	-0,1978	-0,3779	0,1601	1,2872	-0,0721	1,2282	-0,0131
7'''	17,5	0,983	1,0173	-0,1582	-0,2715	0,1133	1,1255	-0,1082	1,0351	-0,0178
8	20	1,164	0,8591	-0,1632	-0,1850	0,0218	0,936	-0,1145	0,8627	-0,0036
8'	22,5	1,437	0,6959	-0,1572	-0,0968	-0,0586	0,8119	-0,1160	0,6939	0,0020
9	25	1,858	0,5382	-0,1280	-0,0122	-0,1158	0,6454	-0,1072	0,5345	0,0037
9'	27,5	2,438	0,4102	-0,1169	-0,0742	-0,1911	0,5025	-0,0923	0,4121	-0,0019
10	30	3,410	0,2933	-	-	-	0,4274	-0,1341	0,3683	-0,0750

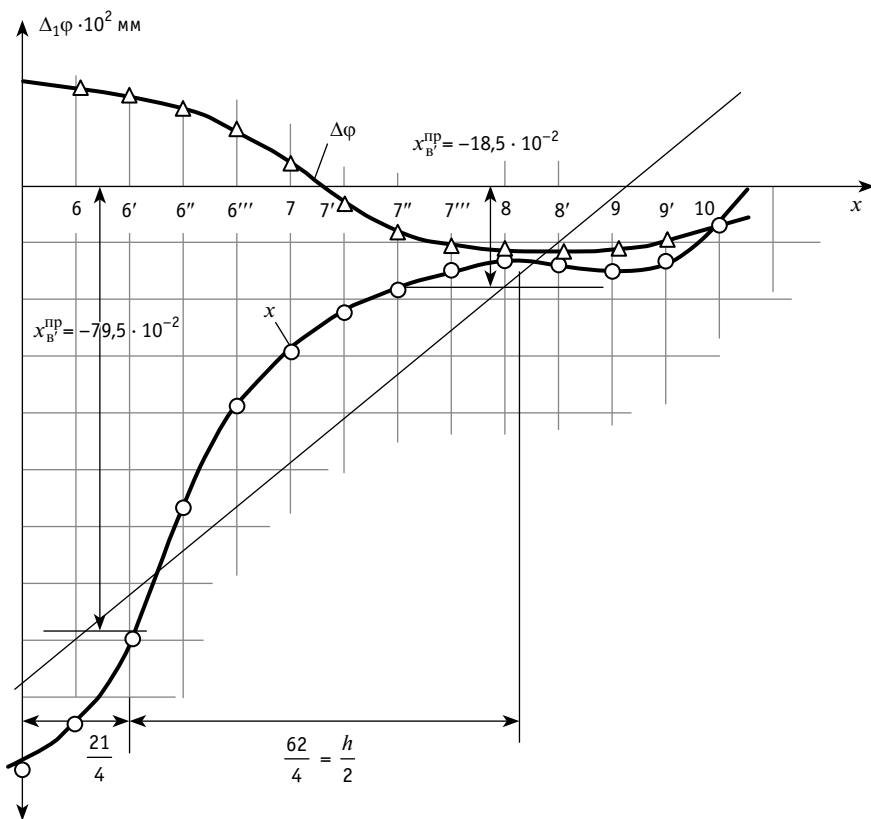


Рис. 2. Представление  $x$  суммой ординат  $x_{\text{пр}}$  и  $x_{\text{син}}$   
 (данные для аппроксимации:  $x = \frac{1}{z_{i+1}} - \frac{1}{z_i}$ )

Если расстояние  $h$  между точками  $i + 1$  и  $i$  уменьшать, то при  $h \rightarrow dy$  получается, что  $\zeta_{i+1} - \zeta_i = d\zeta$ . С другой стороны,  $x = \text{tg} \alpha \cdot h = \zeta' \cdot h = \frac{d\zeta}{dy} h$ , откуда  $d\zeta = \frac{x}{h} dy$ . Тогда

$$\zeta = \zeta_0 + \int_0^y \frac{x}{h} dy. \quad (7)$$

Для этой части  $x$ , которая линейно связана с  $y$ , т.е. для  $x = E \cdot y + D$ , выполняя интегрирование и учитывая обозначения, введенные в (6), найдем

$$\begin{aligned} \zeta_{\text{пр}} &= \zeta_0 + \frac{E \cdot y^2}{2h} + \frac{Dy}{h} = \\ &= \zeta_0 + ay + (ah + b)y. \end{aligned} \quad (8)$$

Постоянные  $E$  и  $D$ , а по ним  $a = \frac{E}{2h}$  и  $b = ah + b = \frac{D}{h}$  найдем из условия прохождения прямой  $x$  через любые две точки рис. 2. В результате будем иметь (при  $h = 2,5$  мм)  $E = 0,03457$ ;  $D = -0,87643$ ;  $a = 0,006914$ ;  $b = -0,3506$ . По формуле (6)

$$x_{\text{пр}} = 0,03467 \cdot y - 0,87643 \quad (9)$$



вычисляем для всех точек значения  $x_{гр}$  и заносим в столбец 6 табл. 2. Разницу между значениями  $x = \zeta_{i+1} - \zeta_i$  (столбец 5 табл. 2) и  $x_{гр}$  заносим в столбец 7 табл. 2. Подставляя это значение  $x_{sin}$  в формулу (9) и выполняя интегрирование, определяем вторую составляющую функции  $\zeta$ , а именно

$$\zeta_{sin} = -\frac{A}{h\omega} \cdot \cos(\omega \cdot y - \varphi). \quad (10)$$

Параметры  $A$ ,  $\omega = \frac{2\pi}{\alpha}$  и  $\varphi$  были вначале определены приближенно по рис. 2, а затем уточнены по методу средних, т.е. из условия осредненного удовлетворения значениям  $x_{sin}$  во всех точках синусоидальной кривой, и оказались равными  $A = 0,1950$  мм;  $\varphi = 1,0905$ ;  $\omega = 0,2040$ .

Тогда полные значения  $\zeta$  будут равны алгебраической сумме ее составляющих (7) и (10)

$$\zeta = ay^2 + \beta y - \frac{A}{h\omega} \cdot \cos(\omega \cdot y - \varphi) + \zeta_0, \quad (11)$$

или после постановки значений постоянных

$$\zeta = 0,006914y^2 - 0,3506y - 0,3824 \cdot \cos(0,204 \cdot y - 1,0905) + \zeta_0. \quad (12)$$

Постоянную  $\zeta_0$  находим из уравнения, которое получим суммированием уравнения (12) для всех точек аппроксимируемого участка кривой износа. Она равна  $\zeta_0 = 4,842$ .

Опытные значения  $\zeta^{оп}$  приведены в столбце 4 табл. 2, а вычисленные по формуле (12) и разность между ними  $\Delta_1\zeta$  помещены в столбцах 8 и 9 табл. 2. Различие между  $\zeta^{оп}$  и  $\zeta^{расч}$  оказалось в ряде точек довольно значительным, и мы прибегли к последующей аппроксимации уже  $\Delta_1\zeta$ . График кривой  $\Delta_1\zeta = \zeta^{оп} - \zeta^{расч}$ , построенный по данным столбца 9 табл. 2, показывает, что ее с удовлетворительной точностью можно аппроксимировать синусоидой

$$\Delta_1\zeta = A_1 \cdot \sin(\omega_1 y + \varphi_1). \quad (13)$$

Значения постоянных определяем непосредственно по рис. 2 через длину полуволны  $\frac{a_1}{2 \cdot 4} = 22,5$  мм, а отрезок, соответствующий «начальной фазе»  $l_1 = \frac{45}{4}$  мм, по формулам  $\omega_1 = \frac{\pi}{a_1/2} = 0,1396$  1/мм;  $\varphi_1 = \omega_1 \cdot l_1 = 1,5708$  рад. Здесь цифра 4 в знаменателе учитывает масштаб кривой по оси абсцисс.

После приближенных расчетов находим величину  $A_1 = 0,118$  мм из условия наилучшего совпадения расчетных и опытных величин  $\Delta_1\zeta$  в большинстве точек кривой. Таким образом, имеем

$$\Delta_1\zeta = 0,118 \cdot \sin(0,1396y + 1,5708). \quad (14)$$

Окончательно аппроксимирующее уравнение и его производные запишем в виде:

$$\zeta = ay^2 + \beta y - \frac{A}{h\omega} \cdot \cos(\omega \cdot y - \varphi) + A_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot y + \varphi_1) + \zeta_0; \quad (15)$$

$$\zeta' = 2ay + \beta + \frac{A}{h} \cdot \sin(\omega \cdot y - \varphi) + \omega_1 \cdot A_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot y + \varphi_1); \quad (16)$$

$$\zeta'' = 2a + \frac{A\omega}{h} \cdot \cos(\omega \cdot y - \varphi) + \omega_1^2 \cdot A_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot y + \varphi_1). \quad (17)$$

Значения  $\zeta$ , вычисленные по формуле (15), приведены в столбце 10, а разница  $\Delta_2\zeta = \zeta^{оп} - \zeta_{(8)}$  в столбце 11 табл. 2. При оценке отклонений расчетных величин  $\zeta$ ,  $\zeta'$  и  $\zeta''$  от опытных концевые точки 6 и 6', 10 и 9' следует отбросить, поскольку характер кривых зависит еще и от значений функций в точках 5''' и 5'', в 10' и в 11, а они как раз и не учитывались. В процентном отношении величина  $\Delta_2\zeta$  невелика. Ее максимальное значение будет в точке 7''' и составит 1,75 %, а в точке 6'' уже меньше — 0,4 %, в остальных точках погрешность не выше последней величины. Точность аналитического вычисления  $\zeta$  и ее производных можно было бы повысить, выполнив еще одну аппроксимацию  $\Delta_2\zeta$ . Однако кривая  $\Delta_2\zeta$ , изображенная на рис. 3, имеет сложный характер, и простой функцией ее не описать.

Значения производных  $\zeta'$  и  $\zeta''$ , найденные по формулам (16), (17), приведены в столбцах 2 и 3 табл. 3. По значениям функций  $\zeta$ ,  $\zeta'$  и  $\zeta''$  вычисляем

$$\operatorname{tg} \beta = z' = \frac{\zeta'}{\zeta''} \text{ и } r = \frac{1}{z''} = \frac{\zeta \cdot \zeta' - 2(\zeta')^2}{\zeta^3} \quad (18)$$

и записываем их в столбцах 9 и 4 табл. 3.

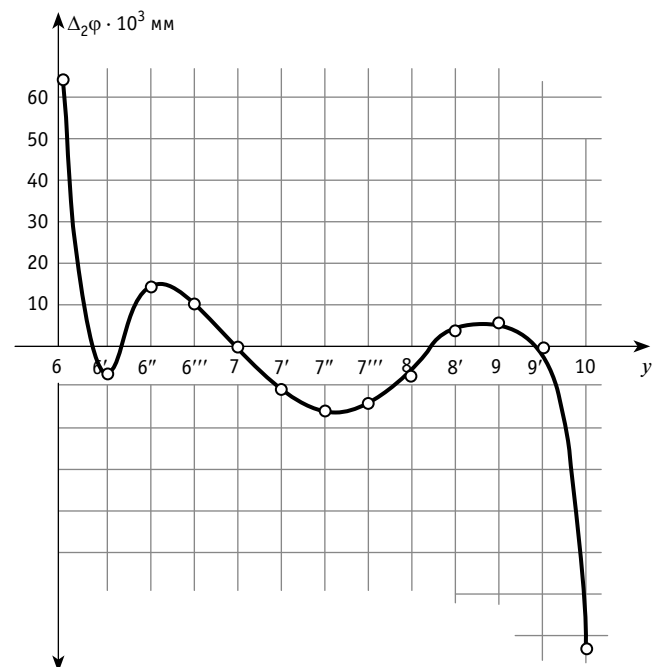


Рис. 3. Величины отклонений расчетных  $\varphi$  от опытных

Таблица 3

Вычисление радиусов кривизны профиля (с  $\Pi = 2,5$  мм) на участке 6''–9 на основании уравнений (8)–(10) и с учетом неучтенных добавок от  $\Delta_2\zeta$

№ точки на профиле	$\zeta$	$\zeta''$	$r$ , мм	$\Delta_2\zeta \cdot 10^3$	$(\Delta_2\zeta)' \cdot 10^3$	$(\Delta_2\zeta)'' \cdot 10^3$	Уточненное $r$ , мм	$\text{tg}\beta = z' = \frac{\zeta'}{\zeta''} \cdot 10^2$	$z' = \frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2\Delta y} \times 10^2$ при $2\Delta y = 5$ мм	$\frac{z'_{\text{аппр}} - z'_{\text{мкр}}}{z'_{\text{аппр}}} \times 100\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	-0,4198	0,01888	418	-	-	-	-	-1,83	-1,73	-4,9
6'	-0,3644	0,02495	367	-	-	-	-	-2,34	-2,70	15,4
6''	-0,2976	0,02794	279	-	-	-	-	-3,37	-3,52	4,4
6'''	-0,2280	0,02708	300	11,3	-2,8	-1,410	269	-4,26	-4,30	0,94
7	-0,1651	0,02269	464	1,3	-4,2	0,192	392	-4,96	-5,00	0,81
7'	-0,1165	0,01600	917	-8,6	-3,4	0,704	748	-5,34	-5,46	2,25
7''	-0,0856	0,00880	482	-15,5	-1,9	1,880	758	-5,68	-6,06	0,63
7'''	-0,0712	0,00304	159	-16,5	2,0	2,560	273	-6,64	-6,82	2,64
8	-0,0678	0,00026	72	-8,0	4,6	-0,064	80	-9,11	9,08	-0,33
8'	-0,0668	0,00122	41	2,2	2,04	-1,024	41	-13,87	-13,88	0,07
9	-0,0588	0,00570	40	3,8	-0,56	-0,896	35	-20,58	-20,02	-2,72
9'	-0,0363	0,01254	-	-1,9	-7,04	-8,83	31	-21,37	-31,04	31,2
10	-0,0044	0,01994	-	-7,5	-60	-45	17	-	-	-

Остановимся кратко на сравнении величин трех слагаемых формулы (16). Между точками 6 и 7'' первое слагаемое в 3–10 раз больше двух других, второе слагаемое больше третьего в 3–5 раз. На отрезке между точками 8–10 порядок всех трех слагаемых примерно одинаков, и, следовательно, роль добавочных членов с  $\sin$  и  $\cos$  существенна. В формуле (17) для  $\zeta''$  в подавляющем большинстве точек участка 6–10 первое и второе слагаемые близки по величине и на целый порядок выше, чем третье слагаемое. Сами функции  $\zeta$  и  $\zeta'$  монотонно убывают с увеличением  $y$ , функция же  $\zeta''$  изменяется по закону косинуса, примерно так же будет изменяться и величина  $r$  (см. рис. 1).

Анализируя полученные результаты, видно, что величина  $r_{7'} = 917$  мм достаточно большая по сравнению с  $r_7 = 464$  мм и  $r_{7''} = 482$  мм, т.е. происходит резкое изменение на длине 5 мм. Частично, видимо, это связано с погрешностью аппроксимации (15)–(17). Общеизвестно, что погрешность производных (особенно второй) значительно выше, чем погрешность самой аппроксимируемой функции; количественно же оценить эти погрешности в нашем случае не представляется возможным из-за дискретного задания функции  $\zeta$  при таком большом интервале, как 10 мм.

Попытаемся оценить влияние  $\Delta_2\zeta$  и ее производных на величину радиуса  $r$ . Учитывая малую величину  $\Delta_2\zeta$  во всех, кроме крайних, точках, изобразим кривую  $\Delta_2\zeta$  по ее ординатам, увеличенным в  $10^3$  раз (см. рис. 3) и незначительно исправленным в отдельных точках (столбец 5 табл. 1 и столбец 11 табл. 3). Первую и вторую производные  $(\Delta_2\zeta)'$  и  $(\Delta_2\zeta)''$  вычислим методом конечных разностей по формулам (11) и (12) из [1] и результаты занесем в столбцы 6 и 7 табл. 3.

Это и будут не учтенные формулами (15)–(17) добавки к функции  $\zeta$  и ее производным. Величины этих добавок в большинстве точек меньше самих функций  $\zeta'$  в 40–150 раз,  $\zeta''$  в 5–100 раз, причем с приближением к точке 10 величина добавок увеличивается. Однако в точках 7''', 8' и 9' добавки к  $\zeta'''$  почти равны самой функции. А это существенно скажется на величине  $r$  (столбец 8 табл. 3): снизился пик в точке 7' с  $r = 917$  до  $r = 748$  мм, а в точке 7'', наоборот, повысилась величина  $r$  с 482 до 758 мм, почти вдвое увеличился радиус в точке 7''' (со 159 до 273 мм). Следовательно, при подборе аппроксимирующего уравнения для кривой износа в виде синусоиды (косинусоиды) надо обращать внимание на более высокую точность в местах изменения знака кривизны, где величина вторых производных мала. Далее опытные измерения величин износа и все последующие действия  $z_{\text{МН}}^{\text{ИЗН}}$  надо выполнять с четырьмя знаками после запятой, три из которых должны быть достоверны.

Тангенсы углов наклона касательной к кривой профиля вычислены с учетом  $\Delta_2\zeta$  и  $(\Delta_2\zeta)'$  в точках интервала 6''–9', а в точках 6, 6', 6'' без их учета как аналитически (столбец 9 табл. 3), так и методом конечных разностей (столбец 10 табл. 3). Различия в величинах  $z'$  при вычислении их с учетом  $\Delta_2\zeta$  и  $(\Delta_2\zeta)'$  очень невелико (см. столбец 11 табл. 3), около 2 %, а без учета добавок несколько выше — до 5 %.

Все вышеизложенное позволяет более точно определять напряженно-деформированное состояние в зоне взаимодействия колеса и рельса. Моделирование данной проблемы в расчетных комплексах обеспечивает значительное преимущество в экономии времени вычислений.

## Литература

1. Кротов С. В., Кононов Д. П., Буйносов А. П. Влияние проката колеса грузового вагона на контактно-усталостную долговечность // Транспорт Урала. 2022. № 4 (75). С. 11–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-11-15. ISSN 1815-9400.
2. Кротов С. В., Кононов Д. П., Воробьев А. А. Контакт железнодорожного колеса с рельсом. Казань : ОО «Бук», 2023. 146 с.
3. Кротов С. В., Кононов Д. П. Анализ зоны контакта железнодорожного колеса и рельса // Известия ПГУПС. 2022. Т. 19. № 2. С. 221–231. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-221-231. ISSN 1815-588X.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Москва : Мир, 1989. 510 с.
5. Fromm H. Arbeitsverlust, Formänderungen und Schlupf beim Rollen von treibenden und gebremsten Rädern oder Scheiben. Beitrag vlg Analyse der Reibungsgasetee. Z. f. techn. Phys. 9 Jg. 1928. 299 s.
6. Кротов С. В., Кононов Д. П. Исследование напряженно-деформированного состояния при контакте цилиндрических поверхностей деталей железнодорожного подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 33–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47. ISSN 2223-9987.
7. Кротов С. В., Кононов Д. П., Соболев А. А. Влияние трения на контактно-усталостную долговечность образцов из рельсовой и колесной стали // Известия ПГУПС. 2019. Т. 16. № 2. С. 212–219. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-16-2-212-219. ISSN 1815-588X.
8. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car // Transport problems. 2011. Vol. 6. Issue 1. Pp. 43–49.
9. Кротов С. В., Кононов Д. П., Соболев А. А. Показатели контактно-усталостной долговечности при взаимодействии колеса с рельсом в кривых участках пути // Бюллетень результатов научных исследований. 2019. № 3. С. 56–66. DOI: 10.20295/2223-9987-2019-3-56-66. ISSN 2223-9987.
10. Кротов С. В., Кононов Д. П. Контактная долговечность рельсовой и колесной сталей // Известия ПГУПС. 2018. Т. 15. № 1. С. 54–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2018-15-1-54-61. ISSN 1815-588X.
11. Кротов С. В. Основы теории несущей способности прессовых соединений колесных пар железнодорожных вагонов. Москва : УМЦ ЖДТ, 2011. 152 с.
12. Кротов С. В., Кононов Д. П. Исследование напряженного состояния в колесе вагона // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 3. С. 26–40. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-3-26-40. ISSN 2223-9987.
13. Кротов С. В., Сладковски А. В. Факторный анализ расчета несущей способности колесной пары вагона // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 36–40. ISSN 1815-9400.
14. Буйносов А. П. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов в результате изменения технологии их обточка // Автоматизация. Современные технологии. 1992. № 8. С. 23–25. ISSN 0869-4931.

## References

1. Krotov S. V., Kononov D. P., Buynosov A. P. Influence of freight car wheel mileage on contact and fatigue durability [Vliyaniye prokata koleasa gruzovogo vagona na kontaktno-ustalostnuyu dolgovechnost']. Transport of the Urals. 2022. No. 4 (75). Pp. 11–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-11-15. ISSN 1815-9400.
2. Krotov S. V., Kononov D. P., Vorobyev A. A. Contact of the railway wheel with the rail [Kontakt zheleznodorozhnogo koleasa s rel'som]. Kazan : Book, 2023. 146 p.
3. Krotov S. V., Kononov D. P. Analysis of Contact Zone of Railway Wheel and Rail [Analiz zony kontakta zheleznodorozhnogo koleasa i rel'sa]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2022. Vol. 19. No. 2. Pp. 221–231. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-221-231. ISSN 1815-588X.
4. Johnson K. Mechanics of contact interaction [Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya]. Moscow : World, 1989. 510 p.
5. Fromm H. Arbeitsverlust, Formänderungen und Schlupf beim Rollen von treibenden und gebremsten Rädern oder Scheiben. Beitrag vlg Analyse der Reibungsgasetee. Z. f. techn. Phys. 9 Jg. 1928. 299 s.
6. Krotov S. V., Kononov D. P. Investigation of stress-strain state at contact of cylindrical surfaces of parts of railway rolling stock [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri kontakte tsilindricheskikh poverkhnostey detaley zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava]. Bulletin of scientific research results. 2022. No. 1. Pp. 33–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47. ISSN 2223-9987.
7. Krotov S. V., Kononov D. P., Sobolev A. A. The influence of friction on contact fatigue endurance of samples from rail and wheel steel [Vliyaniye treniya na kontaktno-ustalostnuyu dolgovechnost' obraztsov iz rel'sovoy i koleasnoy stali]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2019. Vol. 16. No. 2. Pp. 212–219. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-16-2-212-219. ISSN 1815-588X.
8. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car. Transport problems. 2011. Vol. 6. Issue 1. Pp. 43–49.
9. Krotov S. V., Kononov D. P., Sobolev A. A. Contact fatigue endurance indices of the wheel-rail interaction at curved sections of the track [Pokazateli kontaktno-ustalostnoy dolgovechnosti pri vzaimodeystvii koleasa s rel'som v krivykh uchastkakh puti]. Bulletin of scientific research results. 2019. No. 3. Pp. 56–66. DOI: 10.20295/2223-9987-2019-3-56-66. ISSN 2223-9987.
10. Krotov S. V., Kononov D. P. Contact fatigue durability of track and wheel steel [Kontaktno-ustalostnaya dolgovechnost' rel'sovoy i koleasnoy stali]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2018. Vol. 15. No. 1. Pp. 54–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2018-15-1-54-61. ISSN 1815-588X.
11. Krotov S. V. Basics of theory on carrying capacity of press-fit connections of wheelsets for railway cars [Osnovy teorii nesushhey sposobnosti pressovykh soedineniy koleasnykh par zheleznodorozhnykh vagonov]. Moscow : UMTs ZhDT, 2011. 152 p.
12. Krotov S. V., Kononov D. P. Car wheel stress state study [Issledovanie napryazhennoy sostoyaniya v kolese vagona]. Bulletin of scientific research results. 2020. No. 3. Pp. 26–40. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-3-26-40. ISSN 2223-9987.
13. Krotov S. V., Stadkowski A. Factor analysis of bearing capacity calculation of railcar's wheel set [Faktornyy analiz rascheta nesushhey sposobnosti koleasnoy pary vagona]. Transport of the Urals. 2012. No. 2 (33). Pp. 36–40. ISSN 1815-9400.
14. Buynosov A. P. The increase of the resource of the spokes of wheel-sets of electric locomotives in the result of the technological changes of their turning [Povysheniye resursa bandazhey koleasnykh par elektrovozov v rezul'tate izmeneniya tekhnologii ikh obtochki]. Automation. Modern technologies. 1992. No. 8. Pp. 23–25. ISSN 0869-4931.

Объем статьи 1,2 авторских листа

УДК 656.078

**Олег Николаевич Ларин, доктор технических наук, профессор кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), профессор Департамента логистики Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия,**

**Цогт Моононхуу, аспирант кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия**

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР — ЮГ» ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ РОССИЙСКИХ ГРУЗОВ

**Oleg Nikolaevich Larin, DSc in Engineering, Professor, Logistics Transport Systems and Technologies Department, Russian University of Transport (MIIT), Professor, Department of Logistics, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia,**

**Tsogt Moononhuu, postgraduate student, Logistics Transport Systems and Technologies Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia**

## Prospects for using the North-South International Transport Corridor for the transportation of Russian goods

### Аннотация

В статье представлена характеристика международного транспортного коридора «Север — Юг» в составе трех его базовых маршрутов. На основе анализа экономического, социального, внешнеторгового потенциала государств Центральной Азии сделан вывод о дальнейшем увеличении загрузки восточного маршрута коридора внешнеторговыми и внутренними грузопотоками из этого региона. С учетом прогнозов загрузки объектов транспортно-логистической инфраструктуры стран Центральной Азии возможно снижение эффективности доставки российских внешнеторговых грузов по восточному маршруту. Для проактивного реагирования на соответствующие риски необходимо организовать сбор и анализ информации об эксплуатационных и экономических показателях доставки грузов по всем маршрутам коридора, состоянию и уровне загрузки его инфраструктурных объектов.

**Ключевые слова:** международный транспортный коридор «Север — Юг», транспортно-логистическая инфраструктура, внешнеторговые перевозки, пропускная способность, транзитные перевозки

### Abstract

The article discusses the characteristics of the North-South International Transport Corridor as part of its three basic routes. Based on the analysis of the economic, social, and foreign trade potential of the Central Asian states, the conclusion was made about a further increase in the load on the eastern route of the corridor with foreign trade and domestic cargo flows from this region. Taking into account the forecasts for the load on the transport and logistics infrastructure of the Central Asian countries, the efficiency of delivery of Russian foreign trade goods along the eastern route may decrease. To proactively respond to relevant risks, it is necessary to organize the collection and analysis of information on the operational and economic indicators of cargo delivery along all routes of the corridor, the condition and level of load of its infrastructure facilities.

**Keywords:** North-South International Transport Corridor, transport and logistics infrastructure, foreign trade transportation, throughput, transit transportation

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-54-61

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, под международным транспортным коридором (МТК) понимается «совокупность маршрутов, проходящих по территориям государств и обеспечивающих перевозки пассажиров и грузов в международном сообщении на направлениях их наибольшей концентрации, а также совокупность технологических и организационно-правовых условий осуществления этих перевозок» [1]. В соответствии с упомянутой Стратегией ключевыми для России являются МТК «Запад — Восток» (МТК ЗВ) и МТК «Север — Юг» (МТК СЮ), использование которых обеспечивает эффективный выход отечественных компаний на зарубежные рынки и увеличение объемов экспорта транспортных услуг, в том числе транзитных перевозок.

Структурно МТК разделяются на начальные, конечные и промежуточные сегменты, образованные в составе инфраструктурных объектов на территории отдельного государства, по которому проходят маршруты МТК. Начальные и конечные — это сегменты, в которых располагаются соответственно пункты зарождения и поглощения грузопотоков. Промежуточные — сегменты, которые используются для транзитной перевозки грузов между начальными и конечными сегментами. Каждый сегмент маршрута состоит из одного или нескольких участков национальной транспортной сети, состав и количество которых зависят от конфигурации линейной инфраструктуры и используемых видов транспорта в границах государства. Стыковка сегментов осуществляется в пунктах пропуска через государственные границы.

В силу географических, геополитических и геоэкономических факторов МТК СЮ обладает значительным транспортным и интеграционным потенциалом. Для России данный маршрут

всегда имел стратегическое значение. Еще путешествие купца Афанасия Никитина из России в Индию, совершенное в XV в., показало, что этот путь сложный (из-за мультимодальности), продолжительный, дорогой и небезопасный, однако перспективный для использования в интересах торговли со странами южной части континента. В XX в. во время Второй мировой войны по данному коридору в СССР поставлялись значительные объемы военных грузов от стран коалиции.

В конце XX в. интерес к коридору снова возрос в связи с активизацией международного сотрудничества стран Прикаспийского региона (Азербайджана, Ирана, Казахстана, России, Туркменистана). На том этапе проект МТК СЮ для России был важным средством укрепления дружественных отношений и расширения взаимовыгодной торговли с Ираном. Дополнительно к этому Россия получала удобный выход к иранским портам в Персидском заливе для доставки товаров в Индию и другие страны. Российские экспортеры увидели перспективу от реализации возможностей МТК СЮ в снижении затрат и сроков доставки грузов в страны бассейна Индийского океана по сравнению со стандартными маршрутами через Балтику и Черное море. В свою очередь, отечественный логистический бизнес мог бы получить значительные доходы от перевозки транзитных грузов по российским участкам МТК СЮ.

Базовые организационно-правовые условия реализации проекта, в том числе по надлежащему использованию и совершенствованию имеющейся транспортной инфраструктуры коридора, были закреплены в межправительственном «Соглашении о международном транспортном коридоре «Север — Юг» (далее — Соглашение), которое подписали Индия, Иран и Россия в сентябре 2000 г., хотя в развитии МТК СЮ были заинтересованы и другие Прикаспийские государства, а также ряд стран из прилегающих регионов Центральной Азии, Южного Кавказа и Персидского залива. Поэтому в последующем к Соглашению присоединилось много новых участников, в частности Азербайджан, Армения, Белоруссия, Казахстан, Оман, Сирия и др.

Отметим, что в течение нескольких лет с момента подписания Соглашения коридор не получал должного развития из-за сдерживающих санкций стран «западного» блока в отношении Ирана. Однако в современных условиях Россия в ответ на недружественную политику отдельных европейских государств активно трансформирует свои цепочки поставок и увеличивает отправки грузов по инфраструктуре МТК СЮ. В итоге континентальный коридор трансформировался в «межконтинентальный мост», который обеспечивает инфраструктурную основу для расширения торгово-экономического и культурно-гуманитарного сотрудничества России со странами «Глобального Юга» (практически все государства на побережье Индийского океана и даже внутри Африканского континента). Президент Владимир Путин, выступая на пленарном заседании Экономического и гуманитарного форума «Россия — Африка» в июле 2023 г., отметил, что данный маршрут повысит эффективность экспорта отечественных товаров на Африканский континент, а также увеличит поставки африканских товаров на российский рынок. Дальнейшее развитие МТК СЮ будет не только способствовать росту внешней торговли отечественных компаний, но также окажет содействие формированию новых оте-

чественных промышленных кластеров в регионах Северного Кавказа, Поволжья и Урала.

В 2022 г. объем перевозок российских грузов по МТК СЮ составил почти 15 млн т (на 40 % больше по сравнению с предыдущим периодом), в 2023 г. общий грузопоток по коридору также увеличится, а к 2030 г. совокупные объемы перевозок грузов по МТК СЮ могут достигнуть 100 млн т/год при условии опережающего развития инфраструктуры на всех его маршрутах [2]. По данным исследования [3], снижение транспортных расходов на 1 % сопровождается приростом объемов торговли, равным 2 %.

Модернизация транспортно-логистической инфраструктуры требуется на многих национальных участках коридора. На сегодняшний день общий объем необходимых инвестиций превышает 40 млрд долл. на период до 2030 г. [4]. При этом модернизация инфраструктуры, скорее всего, не будет синхронной, так как каждый из участников Соглашения заинтересован развивать в первую очередь участки МТК, которые необходимы для перевозок внешнеторговых и внутренних грузов. Для пропуска транзитных грузов, как правило, используется (при наличии) свободная мощность линейной и терминальной инфраструктуры. Если пропускные способности промежуточных участков МТК СЮ будут полностью задействованы для перевозки внутренних и внешнеторговых грузов стран-транзитеров, то в этом случае эффективность транзита грузовых отправок из начальных сегментов коридора будет снижаться. Например, в исследовании [5] утверждается, что полное использование провозных возможностей российских железнодорожных линий в составе МТК ЗВ (Транссиб, БАМ) для транзита контейнеров в сообщении КНР — ЕС создало дефицит пропускной способности магистральной и терминальной инфраструктуры и ухудшило доступность грузоотправителей из стран Центральной Азии (ЦА) к российским морским портам на тихоокеанском побережье. Поэтому данные поставки стали направляться в морские порты на побережье Персидского и Оманского заливов. В исследовании [6] также утверждается, что в перспективе следует ожидать увеличения перевозок грузов из стран ЦА в Евросоюз через Каспий и Персидский залив из-за сокращения количества судозаходов в балтийские и черноморские порты Российской Федерации.

Россия располагает на начальном сегменте МТК СЮ и заинтересована в стабильном использовании и надежном функционировании промежуточных (транзитных) участков коридора на территории стран-транзитеров, в том числе из Центральной Азии. В связи с этим актуальна проблема оценки загрузки промежуточных участков МТК СЮ грузопотоками из стран-транзитеров и выявления рисков исчерпания пропускных способностей инфраструктурных объектов. Поэтому целью данного исследования является анализ факторов, которые оказывают влияние на загрузку транзитных участков в составе различных маршрутов МТК СЮ грузопотоками стран-транзитеров, что может создать угрозу эффективности перевозок российских грузов. Исследование выполнено на примере государств ЦА, которые диверсифицируют свои цепочки поставок и активно используют потенциал промежуточных участков МТК СЮ для внешнеторговых и внутренних перевозок.



## КОНФИГУРАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР — ЮГ»

Общая протяженность МТК СЮ (в заявленном сторонами Соглашения формате — от Санкт-Петербурга до индийского порта Мумбаи) превышает 7 тыс. км в составе магистральных путей различных видов транспорта: речного, железнодорожного, автомобильного, морского [7]. В первоначальном варианте конфигурации МТК СЮ российский участок коридора проходил по железной дороге от границы с Финляндией (ст. Буловская) через Санкт-Петербург, Москву, Рязань, Саратов, Волгоград, Астрахань до портов на побережье Каспийского моря. Протяженность железнодорожного сегмента по российской территории составляет 2,7 тыс. км [8]. В последнее время уделяется большое внимание использованию исторического «Волжского торгового пути», по которому грузы из речных портов регионов Поволжья перевозятся до морских гаваней на Каспии — в порты Астрахань и Оля, расположенные в устьевой части Волги на расстоянии 100 км друг от друга. Осадка заходящих в морские порты судов составляет 4,5 м. Выход в море из портов осуществляется по Волго-Каспийскому морскому судоходному каналу.

В настоящее время в районе Каспия коридор разветвляется на три конкурирующих между собой маршрута: центральный — через Каспий, восточный — через страны Центральной Азии, западный — через Южный Кавказ (в основном через Азербайджан). Центральный маршрут — морской и связывает отечественные торговые порты на Каспии с морскими гаванями на иранском побережье, такими как Бендер-Энзели, Амирабад, Ноушехер.

Изначально центральный маршрут был основным для МТК СЮ, так как на территории всех стран Каспийского региона не было единых («бесшовных») сетей железных дорог. Однако в последующем стали формироваться железнодорожные участки восточной ветки МТК СЮ на территории Казахстана, Туркменистана и Ирана. В настоящее время российские грузы из центральной части страны, а также из регионов Урала и Сибири поступают по железным дорогам в Казахстан и далее следуют в Иран транзитом через Туркменистан. Например, в Челябинской области создан крупный сухой порт «Южноуральский», откуда отправляются поезда через Казахстан в Туркменистан до железнодорожных пограничных переходов с Ираном Теджен (турк.) — Серахс (ир.) и Этрек (турк.) — Инче-Бурун (ир.), где происходит смена широкой колеи (1520 мм) на узкую (1435 мм). По данным [9], на сегодняшний день восточный маршрут МТК СЮ с использованием железнодорожного транспорта является наиболее привлекательным для перевозок российских грузов в Иран и другие страны Юга.

Западная ветка проходит по территории Азербайджана, где расположены интегрированные с российской сетью автодорожные и железнодорожные магистрали [10]. Узкое звено западного маршрута — стык азербайджанских и иранских железнодорожных сетей. В настоящее время между Азербайджаном и Ираном сквозное сообщение по железным дорогам отсутствует. Для соединения двух сетей необходимо построить участок на иранской территории от приграничной станции Астара до Решта протяженностью 162 км, который проходит по местности со сложными геологическими условиями и тре-

бует значительных средств. Однако в случае успешной реализации данного инфраструктурного проекта привлекательность западной ветки значительно возрастет. Этот путь может стать даже более эффективным (с точки зрения расстояния, скорости и стоимости) для перевозки российских грузов по сравнению с восточной и центральной ветками.

На сегодняшний день российские компании используют все маршруты в составе МТК СЮ для перевозки внешнеторговых грузов. Однако их объемы пока незначительны из-за низкой пропускной способности инфраструктуры. Поэтому отечественный бизнес и государство заинтересованы в развитии отдельных участков коридора, в том числе на территории других государств. Например, в 2023 г. Москва предоставила Тегерану кредит в размере свыше 1,5 млрд евро на достройку железнодорожного участка Решт — Астара, чтобы его пропускная способность достигла 15 млн т грузов в год. В дальнейшем планируется продление широкой (1520 мм) железнодорожной колеи от Азербайджана на иранскую территорию (возможно, даже до морских портов в Персидском заливе) путем совмещения с узкой колеей 1435 мм, что значительно увеличит пропускную способность западного маршрута и обеспечит существенную экономию времени и средств, которые сейчас теряются при смене колеи. Аналогичный вариант совмещенного пути (колеи 1435 и 1520 мм) уже внедрен в КНДР на участке от российской границы (станция Хасан) до северокорейского морского порта Раджин [11].

Анализ конфигурации МТК СЮ показывает, что только центральный маршрут напрямую связывает российские и иранские транспортные сети. Однако он является мультимодальным, имеет низкую скорость перевозки и в перспективе (по мере развития альтернативных маршрутов) будет использоваться для доставки в основном сырьевых грузов при условии минимального количества перевалок с наземных видов транспорта на морской и речной. В свою очередь, западный и восточный маршруты используют транзитные магистрали Азербайджана и Казахстана с Туркменистаном соответственно. Как уже отмечалось, использование транзитных путей сопряжено с дополнительными рисками, которые обязательно должны оцениваться на этапе выбора маршрута для доставки и тем более при вложении инвестиций в развитие инфраструктуры на территории стран-транзитеров.

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ЗАГРУЗКИ ВОСТОЧНОЙ ВЕТКИ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР — ЮГ»

Транспортно-логистические системы стран Центральной Азии обладают значительным потенциалом для увеличения объемов внутренних, внешнеторговых и транзитных перевозок [5]. К 2050 г. объемы грузовых перевозок по региональным участкам ключевых транскаспийских международных транспортных коридоров (МТК СЮ, МТК «Трасека», МТК «Средний коридор») увеличатся в несколько раз. Рост обеспечат как транзитные перевозки контейнерных грузов между КНР и Европой через Каспий, так и перевозки собственных внешнеторговых грузов стран региона [12]. В современных условиях государства Центральной Азии активно трансформируют свои национальные экономики и наращивают экономическое взаимодействие и сотрудничество с партнерами по всему миру (табл. 1).

Таблица 1

Основные социально-экономические показатели стран Центральной Азии [13]

Показатель	Год	Казахстан	Узбекистан	Кыргызстан	Туркменистан	Таджикистан
Территория, тыс. км <sup>2</sup>	–	2724,9	448,9	200,0	488,1	141,4
Численность населения, млн чел.	1990	16,3	20,5	4,4	3,7	5,3
	2000	14,9	24,7	4,9	4,5	6,2
	2010	16,3	28,6	5,4	5,1	7,5
	2019	18,5	33,6	6,5	5,9	9,3
	2020	18,7	34,2	6,6	5,9	9,5
Размер ВВП, млрд долл.	1990	26,9	13,4	2,7	3,2	2,6
	2000	18,3	13,8	1,4	2,9	0,9
	2010	148,0	46,7	4,8	22,6	5,6
	2019	181,7	57,9	8,5	–	8,1
	2020	159,8	57,7	7,7	50,68	8,0
ВВП на душу населения, долл.	1990	1647,5	651,4	609,2	865,8	497,6
	2000	1229,0	558,2	279,6	643,2	138,4
	2010	9070,5	1634,3	880,0	4439,2	749,6
	2019	9812,5	1724,9	1309,5	7902,4	870,8
	2020	8528,4	1686,7	1178,4	8611,3	838,6

Многие исследователи отмечают, что страны региона обладают значительным экспортным потенциалом, который пока реализуется не полностью из-за слабого развития транспортной инфраструктуры и высоких логистических издержек. О низком уровне логистического сервиса свидетельствуют данные Всемирного банка, который использует собственную методику оценки эффективности логистики в отдельном государстве в виде обобщенного показателя Logistics Performance Index (индекс эффективности логистики, LPI), измеряемого от нуля до пяти. Обобщенный показатель формируется на основе значений частных показателей, измеряющих шесть ключевых параметров, влияющих на качество логистического сервиса и, как следствие, на производственные и финансовые результаты участников внешней торговли [14]:

- 1) быстрота и простота выполнения таможенных и пограничных процессов контроля (Customs score);
- 2) качество торговой и транспортной инфраструктуры (Infrastructure score);
- 3) доступность услуг международной перевозки по конкурентоспособным ценам (International shipments score);
- 4) компетентность и качество логистических услуг (Logistics competence and quality score);
- 5) своевременность доставки грузов в пункт назначения в установленный срок (Timeliness score);
- 6) возможность отслеживания транспортных средств и получение информации о состоянии груза (Tracking and tracing score).

Оценка логистических услуг по данным параметрам формируется на основе опроса участников рынка международной логистики. Итоговый индекс (LPI score) представляет собой среднее значение полученных оценок (табл. 2).

Таблица 2

Значения показателей эффективности логистики в странах Центральной Азии [15]

Страны	Место в рейтинге LPI	Итоговый индекс	Таможня	Инфраструктура	Международные перевозки	Компетентность и качество логистики	Своевременность	Трекинг и трейсинг
Казахстан	84	2,7	2,6	2,5	2,6	2,7	2,9	2,8
Узбекистан	96	2,6	2,6	2,4	2,6	2,6	2,8	2,4
Таджикистан	111	2,5	2,2	2,5	2,5	2,8	2,9	2,0
Кыргызстан	127	2,3	2,2	2,4	2,4	2,2	2,4	2,3
Туркменистан*	–	2,4	2,3	2,2	2,4	2,3	2,7	2,6

\*Информация за 2018 г.

По мнению экспертов Всемирного банка, важно уделять внимание всем показателям, которые системно связаны между собой. Например, отклонения в процессах таможенного оформления или обработки грузов на терминалах могут привести к нарушению сроков доставки. По данным [15], среднее время перевозки контейнеров по морскому сегменту международной доставки (от входа в порт экспорта до выхода из порта назначения) составляет 44 дня при стандартном отклонении 10,5 дней. При этом только 60 % времени приходится собственно на перевозку контейнера на морском судне. Остальное

время контейнеры находятся на терминалах отправления или назначения, где часто происходят отклонения в работе технологических систем, что приводит к нарушению сроков доставки.

Улучшение таможенных процедур и инфраструктуры обеспечивает наибольший вклад в повышение эффективности логистики [7, 16 и др.]. Для стран с низкими оценками LPI по критериям «Таможня» и «Инфраструктура» характерны наиболее длительные задержки в доставке грузов. Негативное влияние таможенных и инфраструктурных факторов на логистику усиливается в странах, не имеющих выхода к морю (далее — НВМ). В контексте данного исследования это важный фактор, так как все государства Центральной Азии относятся к категории стран НВМ — Каспий не соединяется с Мировым океаном. Поэтому государства региона для реализации внешнеторгового потенциала на глобальном рынке вынуждены пользоваться транспортными услугами сопредельных государств. Значение транспортного фактора для внешней торговли стран НВМ выражается следующими показателями:

доля транспортных расходов в импорте таких стран достигает 20 %, в то время как у остальных государств она не превышает 5 %;

продолжительность времени доставки импортируемых товаров в 2 раза больше, чем у стран, имеющих выход к морю; каждый дополнительный день транзита сокращает объемы внутренней торговли стран НВМ на 1 %.

По данным [5], среднее расстояние от центров производства и потребления в странах ЦА до ближайших морских портов превышает 800 км, на преодоление которых по транзитным участкам международных транспортных коридоров требуется более двух дней, что дополнительно увеличивает стоимость доставки. Значительные расстояния до морских портов обусловлены не только географической удаленностью, но и направлениями внешнеторговых связей. Соответственно ближайший морской порт не всегда является подходящим транзитным терминалом. Вместе с тем региону необходима собственная развитая сеть современных терминально-логистических центров хабового типа, использование которых позволяет повысить эффективность перевозок за счет применения большегрузного подвижного состава и полного использования его вместимости даже при несбалансированных грузопотоках по направлениям перевозок [17].

Ниже приведены факторы, которые будут формировать заинтересованность стран ЦА к использованию участков восточного маршрута МТК СЮ для внешнеторговых перевозок:

- 1) географическая удаленность от российских морских портов;
- 2) высокий уровень взаимосвязанности транспортных систем государств региона (автодорожные и железнодорожные сети соединены, инфраструктура имеет единый стандарт);
- 3) наличие геополитических ограничений, препятствующих выбору альтернативных маршрутов.

В исследовании [18] отмечается, что транспортно-логистическая инфраструктура всех пяти стран Центрально-Азиатского региона образует единую систему, которая обеспечивает региональную связанность путем соединения основных социальных и промышленных центров государств. Такому си-

стемному образованию проще углублять региональную интеграцию, выстраивать транспортные коммуникации с другими экономическими центрами, в частности с Евросоюзом, сокращать логистические затраты за счет упрощения процедур пересечения границ, координации долгосрочного планирования инфраструктурных проектов, снижения негативного воздействия на окружающую среду. Для сообщений стран ЦА с Евросоюзом рекомендовано развивать широтный Транскаспийский коридор, по которому прогнозируется рост объемов транзитных контейнерных перевозок с 18 тыс. TEU в 2022 г. до 130 тыс. TEU к 2040 г. при существующем уровне развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры. Если будут реализованы инвестиционные проекты и приняты меры по упрощению процедур торговли (что сократит продолжительность транзита между европейскими и азиатскими хабами с существующих 18 до 13 дней), то объемы транзита могут увеличиться почти в 7 раз — до 865 тыс. TEU к 2040 г. за счет «перетягивания» грузопотоков с российских участков международного транспортного коридора «Запад — Восток».

В перспективе страны ЦА будут расширять торгово-экономическое сотрудничество с государствами Южной Азии (ЮА) [19]. Крупнейшим торговым партнером стран ЦА в регионе ЮА является Индия — третья в мире и вторая в Азии экономика. Для поставок в Южно-Азиатский регион страны ЦА используют восточный маршрут МТК СЮ, прежде всего железнодорожный коридор «Казахстан/Узбекистан — Туркменистан — Иран». Для грузового сообщения стран региона с Поднебесной проектируется новый железнодорожный коридор «Китай — Кыргызстан — Узбекистан», который будет состыкован с южной частью восточного маршрута МТК СЮ в Туркменистане.

Дополнительно прорабатывается проект строительства нового ответвления от восточного маршрута МТК СЮ — железнодорожный коридор «Узбекистан — Афганистан — Пакистан». В случае его реализации будет создан кратчайший транзитный маршрут для стран ЦА в направлении морских портов на побережье Аравийского моря, что частично разгрузит иранскую железнодорожную и портовую инфраструктуру грузопотоками из стран региона [20, 21].

Интерес к железнодорожным проектам в странах региона объясняется несколькими причинами: во-первых, отсутствием выхода к морю; во-вторых, сложными географическими условиями (горы, пустыни, суровый климат); в-третьих, экологическими факторами. По данным [22], в перспективе у железных дорог будут наибольшие темпы прироста объемов перевозок по сравнению с остальными континентальными видами транспорта (автомобильным, трубопроводным, речным). Этому будет способствовать политика декарбонизации — при перевозке грузов по железным дорогам парниковых газов выделяется меньше, чем при перевозке автомобильным транспортом.

В настоящее время в странах ЦА внешнеторговые грузы перевозятся преимущественно по железным дорогам. Согласно [5], около 40 % от общего объема экспортно-импортных грузов стран ЦА перевозится железнодорожным транспортом, что значительно больше, чем в других регионах мира. Например, в Евросоюзе по железным дорогам перевозится около 18 % общего объема таких грузов. В случае успешной реализации

Таблица 3

Перспективная загрузка дорожной инфраструктуры на 2030 и 2050 гг., % [23]

Страна*	2030 г.		2050 г.	
	Автомобильные дороги	Железные дороги	Автомобильные дороги	Железные дороги
Казахстан	151	45	350	138
Кыргызстан	251	5	984	10
Таджикистан	191	0	516	3
Узбекистан	486	14	1365	459

\*Данные по Туркменистану в первоисточнике отсутствуют.

перечисленных выше проектов по созданию новых железнодорожных линий (в Китай, Пакистан) роль железных дорог в регионе усилится. В исследовании [23] приводятся результаты прогноза обеспеченности транспортного спроса наличной пропускной способностью участков как международных транспортных коридоров, так и региональной сети автомобильных и железных дорог. В табл. 3 приведены оценочные данные об использовании пропускной способности, полученные через отношение прогнозного объема транспортного потока к пропускной способности соответствующих сетей. При загрузке менее 100 % весь транспортный спрос будет удовлетворен. В противном случае возникнет дефицит пропускной способности транспортной сети с вытекающими из этого нежелательными последствиями для грузоотправителей.

Данные прогноза показывают, что в среднесрочной перспективе все страны ЦА столкнутся с дефицитом пропускной способности автомобильных дорог. Наибольший прирост перевозок внешнеторговых грузов по железнодорожным магистралям ожидается по сетям транзитных государств — Казахстана и Узбекистана. Туркменистан также является страной-транзитером, однако данные по загрузке его сетей отсутствуют. Дополнительно стоит заметить, что в исследовании [23] не учитывалась современная роль МТК СЮ в обслуживании внешнеторговых связей России. Поэтому приведенные в табл. 3 прогнозные значения перспективной загрузки железных дорог для стран-транзитеров нужно скорректировать в сторону увеличения. Как следствие, пропускная способность железнодорожных участков восточной ветки МТК СЮ, прежде всего в Казахстане и Туркменистане, может быть исчерпана

уже к 2030 г. Данное обстоятельство будет создавать риски снижения эффективности доставки российских внешнеторговых грузов по восточной ветке МТК СЮ.

### ВЫВОДЫ

Россия заинтересована в надежной и эффективной работе МТК СЮ и использовании всех его маршрутов, которые в силу объективных причин отличаются по своим пропускным и провозным способностям. На сегодняшний день имеются технические и технологические возможности для наращивания объемов перевозок по железнодорожным участкам восточного маршрута транзитом через Казахстан и Туркменистан. Вместе с тем результаты исследований дают основания предполагать увеличение загрузки национальных участков данного маршрута внешнеторговыми и внутренними грузопотоками из соответствующих стран ЦА. При этом нет оснований ожидать, что транспортно-логистическая инфраструктура в регионе будет развиваться опережающими темпами и не возникнет дефицит пропускных способностей магистральных и терминальных объектов на транзитных участках восточной ветки МТК СЮ, которая используется для перевозки рос-

сийских внешнеторговых грузов. В связи с этим представляются целесообразными и обоснованными меры финансовой поддержки (за счет средств федерального и региональных бюджетов) инвестиционных проектов по развитию и модернизации российских участков центрального маршрута МТК СЮ, в том числе обустройство внутренних водных путей и строительство автомобильных дорог в прилегающих к маршруту регионах. Также представляется весьма своевременным решение о выделении Ирану кредита на достройку железнодорожного участка на западной ветке МТК СЮ, что позволит организовать бесперегрузочную железнодорожную доставку российских грузов до иранских портов в Персидском заливе. Реализация данных проектов повлияет на распределение грузопотоков по всем маршрутам МТК СЮ. Поэтому для проактивного реагирования на риски снижения эффективности перевозок российских грузов по МТК СЮ необходимо организовать сбор и анализ информации об эксплуатационных и экономических показателях доставки грузов по всем маршрутам коридора, а также о состоянии и уровне загрузки его инфраструктурных объектов.

### Литература

1. О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161?ysclid=ln2rbta1vp864221376> (дата обращения: 02.08.2023).
2. Потенциальный объем перевозок по МТК Север — Юг превышает 100 млн тонн // Информационное агентство ТАСС. 15.06.23. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18018769> (дата обращения: 10.08.2023).

### References

1. About the Russian Federation transport strategy up to 2030 with a forecast for the period up to 2035 [O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda]. The Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161?ysclid=ln2rbta1vp864221376> (access date: 02.08.2023).
2. The potential volume of transportation along the North-South International Transport Corridor exceeds 100 million tons [Potentsial'nyy ob'em perevozok po MTK Sever — Yug prevyshaet 100 mln ton]. TASS Russian

3. Limao N., Venables A. J. Infrastructure, Geographical Disadvantage, Transport Costs, and Trade // *The World Bank Economic Review*. 2001. 15. 451–479. <https://doi.org/10.1093/wber/15.3.451>.
4. Международный транспортный коридор «Север – Юг»: инвестиционные решения и мягкая инфраструктура. Доклады и рабочие документы 22/2 / Е. Винокуров, А. Ахунбаев, А. Забоев, Н. Усманов. Алматы; Москва: Евразийский банк развития, 2022. 84 с. URL: [https://eabr.org/upload/iblock/a2b/EDB\\_2022\\_Report-2\\_INSTC\\_rus.pdf](https://eabr.org/upload/iblock/a2b/EDB_2022_Report-2_INSTC_rus.pdf) (дата обращения: 02.08.2023).
5. Обзорное исследование портов и логистики в странах ЦАРЭС. Февраль 2021 г. Азиатский банк развития, 2021. 77 с.
6. Все идет к тому, что транспортный коридор Север – Юг станет ключевым элементом в Евразии // *Эксперт*. 2023. 2 апр. URL: <https://podrobno.uz/cat/obchestvo/vse-idet-k-tomu-chto-transportnyy-koridor-sever-yug-stanet-klyuchevym-elementom-v-evrazii-ekspert/> (дата обращения: 11.08.2023).
7. Международный транспортный коридор «Север – Юг»: создание транспортного каркаса Евразии. Доклад 21/5 / Е. Винокуров, А. Ахунбаев, М. Шашкенов, А. Забоев. Алматы; Москва: Евразийский банк развития, 2021. 122 с.
8. Перспективы развития инфраструктуры автомобильных и железных дорог, включенных в транспортные маршруты ЕвразЭС. Алматы, 2011. 64 с.
9. Гулый И. М. Перспективы развития перевозок грузов по маршрутам мультимодального международного транспортного коридора «Север – Юг» // *Экономика Центральной Азии*. 2022. Т. 6. № 4. С. 341–354. DOI: 10.18334/asia.6.4.117073. ISSN 2542-0607.
10. Ларин О. Н. Перспективные направления развития транспортной инфраструктуры Индии и стратегические интересы России // *Проблемы национальной стратегии*. 2018. № 3 (48). С. 156–180. ISSN 2079-3359.
11. Кирьянов О. В., Тонких И. М. Российско-северокорейский проект «Хасан — Раджин»: текущее состояние и перспективы развития // *Корейский полуостров в поисках мира и процветания: сборник трудов конференции*, Москва, 28–29 марта 2019 г. Москва: Институт Дальнего Востока Российской академии наук, 2019. Т. 1. С. 304–318.
12. Key Statistics and Trends in International Trade 2022. The remarkable trade rebound of 2021 and 2022. United Nations, 2023. 25 p.
13. Зиядулаев Н. С. Центральная и Южная Азия: между глобализацией и регионализацией или транспортно-транзитная взаимосвязанность // *Экономика Центральной Азии*. 2021. Т. 5. № 3. С. 247–260. DOI: 10.18334/asia.5.3.113729. ISSN 2542-0607.
14. International Scorecard Page. URL: <https://lpi.worldbank.org/international/scorecard/radar/C/TKM/2023> (дата обращения: 20.08.2023).
15. Connecting to Compete 2023 Trade Logistics in an Uncertain Global Economy The Logistics Performance Index and Its Indicators. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank, 2023. 74 p. URL: [https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI\\_2023\\_report.pdf](https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI_2023_report.pdf) (дата обращения: 02.08.2023).
16. Зохидов А. А. Центрально-Азиатская транспортная система: инициативы по совместной координации, проблемы и решения // *Экономика Центральной Азии*. 2020. Т. 4. № 3. С. 185–196. DOI: 10.18334/asia.4.3.110886. ISSN 2542-0607.
- New Agency. 15.06.23. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18018769> (access date: 02.08.2023).
3. Limao N., Venables A. J. Infrastructure, Geographical Disadvantage, Transport Costs, and Trade. *The World Bank Economic Review*. 2001. 15. 451–479. <https://doi.org/10.1093/wber/15.3.451>.
4. Vinokurov E., Akhunbaev A., Zabojev A., Usmanov N. The North-South International Transport Corridor: investment decisions and soft infrastructure. Reports and working papers 22/2 [Mezhdunarodnyy transportnyy koridor «Sever — Yug»: investitsionnye resheniya i myagkaya infrastruktura. Doklady i rabochie dokumenty 22/2]. Алматы; Moscow: Eurasian Development Bank, 2022. 84 p. URL: [https://eabr.org/upload/iblock/a2b/EDB\\_2022\\_Report-2\\_INSTC\\_rus.pdf](https://eabr.org/upload/iblock/a2b/EDB_2022_Report-2_INSTC_rus.pdf) (access date: 02.08.2023).
5. Ports and logistics scoping study in CAREC countries. February, 2021 [Obzornoe issledovanie portov i logistiki v stranakh TsARES. Fevral' 2021 g.]. Asian Development Bank, 2021. 77 p.
6. Everything is going to the point that the North-South transport corridor will become a key element in Eurasia [Vse idet k tomu, chto transportnyy koridor Sever — Yug stanet klyuchevym elementom v Evrazii]. *Expert*. 2023. April 2. URL: <https://podrobno.uz/cat/obchestvo/vse-idet-k-tomu-chto-transportnyy-koridor-sever-yug-stanet-klyuchevym-elementom-v-evrazii-ekspert/> (access date: 11.08.2023).
7. Vinokurov E., Akhunbaev A., Shashkenov M., Zabojev A. The North-South International Transport Corridor: creation of a transport framework for Eurasia. Report 21/5 [Mezhdunarodnyy transportnyy koridor «Sever — Yug»: sozдание transportnogo karkasa Evrazii. Doklad 21/5]. Алматы; Moscow: Eurasian Development Bank, 2021. 122 p.
8. Prospects for the development of infrastructure of roads and railways included in the Eurasian Economic Community transport routes [Perspektivy razvitiya infrastruktury avtomobil'nykh i zheleznykh dorog, vklyuchennykh v transportnye marshruty EvrAzES]. Алматы, 2011. 64 p.
9. Guly I. M. Prospects for the development of cargo transportation along the international North–South transport corridor [Perspektivy razvitiya perevozok грузов по маршрутам мультимодального международного транспортного коридора «Север — Юг»]. *Central Asia Economy*. 2022. Vol. 6. No. 4. Pp. 341–354. DOI: 10.18334/asia.6.4.117073. ISSN 2542-0607.
10. Larin O. N. The promising areas for India's transport infrastructure development and Russia's strategic interests [Perspektivnye napravleniya razvitiya transportnoy infrastruktury Indii i strategicheskie interesy Rossii]. *National Strategy Issues*. 2018. No. 3 (48). Pp. 156–180. ISSN 2079-3359.
11. Kir'yanov O. V., Tonkikh I. M. Russian — North Korean Khasan — Rajin project: current situation and prospects for development [Rossiysko-severokoreyskiy proekt «Khasan — Radzhin»: tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya]. Moscow, 2019. Vol. 1. Pp. 304–318.
12. Key Statistics and Trends in International Trade 2022. The remarkable trade rebound of 2021 and 2022. United Nations, 2023. 25 p.
13. Ziyadulaev N. S. Central and South Asia: between globalization and regionalization or transport and transit interconnectedness [Tsentral'naya i Yuzhnaya Aziya: mezhdub globalizatsiei i regionalizatsiei ili transportno-tranzitnaya vzaimosvyazannost']. *Central Asia Economy*. 2021. Vol. 5. No. 3. Pp. 247–260. DOI: 10.18334/asia.5.3.113729. ISSN 2542-0607.
14. International Scorecard Page. URL: <https://lpi.worldbank.org/international/scorecard/radar/C/TKM/2023> (access date: 20.08.2023).
15. Connecting to Compete 2023 Trade Logistics in an Uncertain Global Economy The Logistics Performance Index and Its Indicators. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank, 2023. 74 p. URL: [https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI\\_2023\\_report.pdf](https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI_2023_report.pdf) (access date: 02.08.2023).
16. Zokhidov A. A. Central Asian transport system: joint coordination initiatives, challenges and solutions [Tsentral'no-Aziatskaya transportnaya sistema: initsiativy po sovmestnoy koordinatsii, problemy i resheniya]. *Central Asia Economy*. 2020. Vol. 4. No. 3. Pp. 185–196. DOI: 10.18334/asia.4.3.110886. ISSN 2542-0607.

17. Вопросы создания мультимодального хаба в Прикаспийском регионе / О. Н. Ларин, А. Н. Стеблянская, С. Дай, Х. Ванг // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 9. С. 3–10. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-09-1. ISSN 0236-1914.
18. Sustainable transport connections between Europe and Central Asia. Final Report / EBRD. 2023, Jun. 16. 57 p. URL: <https://www.ebrd.com/news/publications/special-reports/sustainable-transport-connections-between-europe-and-central-asia.html> (дата обращения: 02.08.2023).
19. ЦЭИР обнародовал данные по взаимной торговле между странами Центральной и Южной Азии. URL: [https://uz.sputniknews.ru/20210707/tseir-obnarodoval-dannye-po-vzaimnoy-torgovle-mezhdu-stranami-tsentralnoy-i-yujnoy-azii-19584789.html?utm\\_source=yxnews&utm\\_medium=desktop](https://uz.sputniknews.ru/20210707/tseir-obnarodoval-dannye-po-vzaimnoy-torgovle-mezhdu-stranami-tsentralnoy-i-yujnoy-azii-19584789.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop) (дата обращения: 02.08.2023).
20. Ибрагимов У. Н., Ибрагимова Д. Т. Взаимосвязанность Центральной и Южной Азии — новый тренд экономического развития Евразии // Экономика Центральной Азии. 2021. Т. 5. № 4. С. 405–420. DOI: 10.18334/asia.5.4.113636. ISSN 2542-0607.
21. Central Asian transport corridors and prospects of Uzbekistan's further integration to the global transport network / M. Rasulov, U. Ibragimov, M. Mirakhmedov, A. Rizaev // The 7th International Symposium for Transportation Universities in Europe and Asia. China, Dalian Jiaotong University, 2014. Pp. 25–30.
22. ITF Transport Outlook 2019. Paris: OECD Publishing, 2019. URL: [https://dx.doi.org/10.1787/transp\\_outlook-en-2019-en](https://dx.doi.org/10.1787/transp_outlook-en-2019-en) (дата обращения: 02.08.2023).
23. Повышение торгово-транспортной связности и развитие грузоперевозок в Центральной Азии: Международный транспортный форум ОЭСР, 2019. 180 с. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/svyaznost-gruzovoy-transport-centralnaya-aziya.pdf> (дата обращения: 02.06.2023).
17. Larin O. N., Steblyanskaya A. N., Dai X., Wang He. Issues of creating a multimodal hub in the Caspian Region [Voprosy sozdaniya mul'timodal'nogo khaba v Prikaspiyskom regione]. Transport: science, equipment, management. 2022. No. 9. Pp. 3–10. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-09-1. ISSN 0236-1914.
18. Sustainable transport connections between Europe and Central Asia. Final Report / EBRD. 2023, Jun. 16. 57 p. URL: <https://www.ebrd.com/news/publications/special-reports/sustainable-transport-connections-between-europe-and-central-asia.html> (access date: 02.08.2023).
19. CERR released data on mutual trade between the countries of Central and South Asia [TsEIR obnarodoval dannye po vzaimnoy torgovle mezhdustranami Tsentral'noy i Yuzhnoy Azii]. URL: [https://uz.sputniknews.ru/20210707/tseir-obnarodoval-dannye-po-vzaimnoy-torgovle-mezhdu-stranami-tsentralnoy-i-yujnoy-azii-19584789.html?utm\\_source=yxnews&utm\\_medium=desktop](https://uz.sputniknews.ru/20210707/tseir-obnarodoval-dannye-po-vzaimnoy-torgovle-mezhdu-stranami-tsentralnoy-i-yujnoy-azii-19584789.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop) (access date: 02.08.2023).
20. Ibragimov U. N., Ibragimova D. T. The interconnectedness of Central and South Asia as a new trend in the Eurasian economic development [Vzaimosvyazannost' Tsentral'noy i Yuzhnoy Azii — novyy trend ekonomicheskogo razvitiya Evrazii]. Central Asia Economy. 2021. Vol. 5. No. 4. Pp. 405–420. DOI: 10.18334/asia.5.4.113636. ISSN 2542-0607.
21. Rasulov M., Ibragimov U., Mirakhmedov M., Rizaev A. Central Asian transport corridors and prospects of Uzbekistan's further integration to the global transport network. The 7th International Symposium for Transportation Universities in Europe and Asia. China, Dalian Jiaotong University, 2014. Pp. 25–30.
22. ITF Transport Outlook 2019. Paris : OECD Publishing, 2019. URL: [https://dx.doi.org/10.1787/transp\\_outlook-en-2019-en](https://dx.doi.org/10.1787/transp_outlook-en-2019-en) (access date: 02.08.2023).
23. Increasing of the trade and transport connectivity and developing of the cargo transportation in Central Asia [Povyshenie torgovo-transportnoy svyaznosti i razvitie gruzoperevozok v Tsentral'noy Azii]. International Transport Forum OECD, 2019. 180 p. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/svyaznost-gruzovoy-transport-centralnaya-aziya.pdf> (access date: 02.06.2023).

Объем статьи 1,9 авторских листа

УДК 656.073

Николай Евгеньевич Окулов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Елена Николаевна Тимухина, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Антон Алексеевич Кощеев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Наталья Вячеславовна Кашеева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ НА ВНУТРЕННИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Nikolay Evgenyevich Okulov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Elena Nikolaevna Timukhina, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Anton Alexeevich Koshcheev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Natalya Vyacheslavovna Kashheeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

## The influence of random factors on internal transport processes of industrial enterprises

### Аннотация

В современных экономических условиях промышленные предприятия стремятся минимизировать производственные затраты, в том числе на внутреннее транспортное обслуживание. В статье на примере горно-перерабатывающего комбината представлен новый подход к организации внутреннего транспортного обслуживания, учитывающий стохастический характер добычи и переработки сырья. Определены случайные процессы в режиме работы предприятия. Предложен метод расчета ритмов отправления, обеспечивающий равномерное прибытие сырья с учетом параметров транспортной сети.

**Ключевые слова:** транспортное обслуживание, подвод сырья, метод динамического согласования, затраты на хранение, ущерб от недопоставки

### Abstract

In modern economic conditions, industrial enterprises strive to minimize production costs, including for internal transport services. Using the example of a mining and processing enterprise, the article presents a new approach to organization of internal transport services, taking into account the stochastic nature of extraction and processing of raw materials. Random processes in the operating mode of the enterprise are determined. The method for calculating the rhythms of departure is proposed, which ensures the rhythmic arrival of raw materials taking into account the transport network parameters.

**Keywords:** transport service, supply of raw materials, dynamic matching method, storage costs, damage from under-delivery

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-62-66

### ВВЕДЕНИЕ

В деятельности любого горно-перерабатывающего предприятия (далее — ГПП) значительное место занимает транспортное обслуживание производственных линий переработки. Поэтому важными задачами транспорта таких предприятий являются организация ритмичного прибытия сырья с месторождения, надежное обеспечение сырьем процесса производства, а также эффективное использование транспортных средств (самосвалов, экскаваторов, погрузчиков) и складов с максимизацией дисконтированной прибыли [1]. Нередко затраты предприятия на логистику составляют около 20 % от общих расходов [2], причем одно из самых затратных звеньев логистической системы — содержание складов. Поэтому на предприятиях стремятся минимизировать затраты не только на транспортировку сырья и продукции, но и на работу складов за счет сокращения объемов хранения, а следовательно, складских площадей.

В качестве объекта исследования рассмотрим логистическую систему ГПП, которое занимается добычей и переработкой мрамора. Транспортное обслуживание ГПП представляет собой сложную систему, включающую несколько карьеров (месторождений) по добыче мрамора и два завода по его переработке, выпускающих мраморную крошку, мраморный песок и т.п. Заводы работают с разной мощностью и находятся на разном удалении от карьера. Доставка сырья от карьера до заводов осуществляется самосвалами.

## МЕТОДЫ

Функционированию промышленных систем, включающих транспорт, и управлению цепями поставок посвящено немало исследований. Например, в статье [1] представлен риск-ориентированный метод оптимизации промышленного предприятия по добыче полезных ископаемых, состоящего из нескольких карьеров, технологических путей и имеющего определенные требования к добываемому сырью.

Антикризисное управление в логистике рассмотрено в работе [3]. Авторы предлагают решения по оптимизации потоков в любых цепочках поставок, основанные на использовании математических моделей и позволяющие свести к минимуму риски из-за нехватки запасов.

Структура потоков промышленных предприятий характеризуется значительной неравномерностью, что усложняет управление внутренними транспортными процессами. В статье [4] рассматривается имитационно-логистическая модель горного предприятия, при помощи которой можно определять продолжительность выполнения тех или иных транспортно-технологических операций и адаптивно управлять промышленным транспортом и производственными линиями, изменяя ритмы их работы.

Логистика предприятий — сложная система, которая должна быстро реагировать на постоянные изменения внешней и внутренней среды [5, 6]. Например, в исследованиях предложены и описаны методы, основанные на цифровых технологиях, которые служат инструментами для гибкого управления предприятием при изменении его производственной программы и требований клиента. По мнению авторов работы [2], только за счет автоматизированных средств можно снизить затраты на логистику, особенно в режиме реального времени.

В некоторых исследованиях [7–14] для нахождения оптимальных решений логистических процессов, особенно в случаях, которые связаны с динамическими входными данными потока, используются моделирование и информационные системы.

В работах [15, 16] анализируется взаимодействие поставщиков и потребителей в зависимости от случайных факторов и описан метод такого взаимодействия — динамическая транспортная задача с учетом ущерба у потребителя.

Очевидно, что, решая вопросы оптимизации, ученые, а также менеджеры по управлению цепями поставок стремятся использовать специальные методы, в основе которых лежат информационные технологии. Поэтому для расчета ритмов добычи сырья, обеспечивающих его равномерное прибытие на заводы ГПП, а следовательно, равномерную работу производственных линий, мы будем использовать метод динамического согласования (МДС), разработанный П. А. Козловым [6, 17, 18]. Суть метода заключается в том, что он позволяет определить ритмичность отправления груза (в нашем случае — ритмичность добычи и отгрузки сырья на карьере) и обеспечить его равномерное прибытие с учетом параметров транспортной инфраструктуры предприятия [19].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Задача транспортной системы рассматриваемого нами промышленного предприятия — обеспечить надежное обслуживание производства с минимальными расходами на транспортировку,

хранение сырья (хранение осуществляется как на карьере, так и на заводах) и минимальными затратами на изменение объема его добычи. Любые промышленные предприятия, в том числе и горнодобывающие, не могут работать в детерминированных условиях, поскольку на их деятельность постоянно оказывают влияние различные случайные факторы в логистической цепочке, такие как спонтанный всплеск потребления продукции, выход оборудования из строя, задержка в доставке сырья, потеря груза и т.д. [3, 4, 14]. Как показал анализ, на предприятиях ГПП отмечается случайный разброс и во времени добычи мрамора, и во времени его переработки на заводах. Транспортировка сырья имеет детерминированный характер, так как плечо подвоза сырья небольшое, осуществляется по качественным автодорогам, время доставки незначительное. При этом стоимость хранения на складе карьера и на складе завода сопоставимы. Стохастический характер добычи и потребления может быть связан с временем суток (день, ночь), режимом работы (с началом смены производительность увеличивается, а к концу смены снижается), погодными условиями, обеспеченностью смены людьми, работой оборудования на производственных линиях и т.п. Наличие случайного разброса в режиме работы заводов и карьера приводит к дополнительным затратам.

Рассмотрим ситуации, которые могут возникать на ГПП.

1. Детерминированная добыча (производство) мрамора на карьере и случайное потребление на заводе (рис. 1).

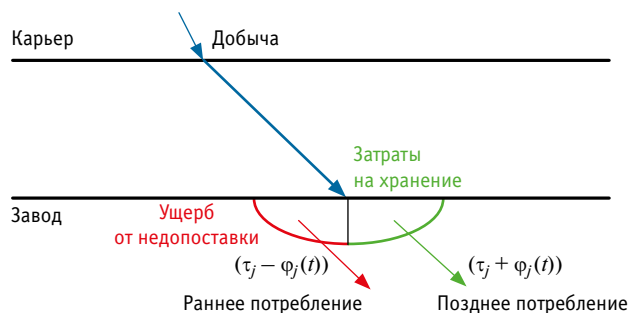


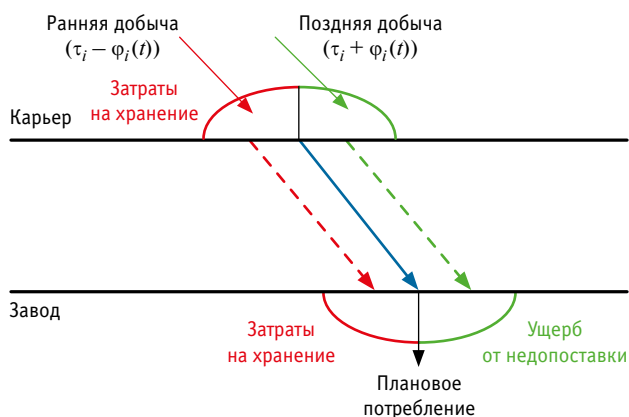
Рис. 1. Ущерб при детерминированной добыче (производстве) мрамора на карьере и случайном потреблении на заводе

Время потребления мрамора на заводе  $\tau_j(t)$  имеет случайный разброс  $\varphi_j(t)$ . Таким образом, для каждого момента потребления  $t$  характерно  $(\tau_j \pm \varphi_j(t))$ . В этом случае при раннем потреблении  $(\tau_j - \varphi_j(t))$  и плановой добыче возникает ущерб от недопоставки. При позднем потреблении  $(\tau_j + \varphi_j(t))$  и плановой добыче возникают затраты на хранение, которое может осуществляться как на складе завода, так и на складе карьера.

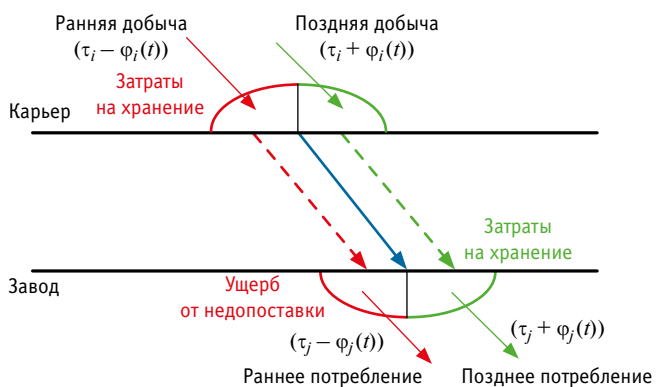
2. Случайная добыча и детерминированное потребление на заводе (рис. 2). В этом случае при добыче сырья ранее запланированных сроков  $(\tau_j - \varphi_j(t))$  и плановом потреблении возникают затраты от хранения сырья на складе карьера или на складе завода. При добыче с опозданием сырья  $(\tau_j + \varphi_j(t))$  и плановом потреблении возникает ущерб от недопоставки.

3. Случайное производство (добыча) и случайное потребление (рис. 3).





**Рис. 2. Ущерб при случайной добыче (производстве) мрамора на карьере и детерминированном потреблении на заводе**



**Рис. 3. Ущерб при случайной добыче (производстве) мрамора на карьере и случайном потреблении на заводе**

При ранней добыче и раннем потреблении мрамора ущерб будет незначительным. Он будет заключаться либо в дополнительных затратах на хранение, либо в ущербе от недопоставки мрамора (в зависимости от того, что произойдет раньше — добыча или потребление). Но может быть и полное отсутствие затрат, если момент добычи и момент потребления совпадут. Аналогичная ситуация будет, если произойдет опоздание во времени добычи на карьере и времени потребления на заводе.

Может возникнуть и иная ситуация, когда происходит ранняя добыча на карьере и позднее потребление на заводе или же поздняя добыча на карьере и раннее потребление на заводе. В этих случаях будут большие затраты на хранение или большой ущерб от недопоставки соответственно.

Итак, задачу транспортного обслуживания ГПП сформулируем следующим образом: определим наилучшую динамическую структуру поставки сырья с учетом ущерба от недопоставок и затрат на хранение при стохастическом объеме потребления и объеме добычи.

В задаче вместо заданного момента прибытия  $t$  выбираем время прибытия  $t_0$ :

$$\sum E_p = E_1 + E_2 + E_3 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $E_1$  — расходы на перевозку сырья с места добычи до завода по переработке,

$$E_1 = \sum_{t=0}^T \sum_{p_i, p_j \in P} c_{ij}(t) u_{ij}(t), \quad (2)$$

здесь  $c_{ij}(t)$  — стоимость транспортировки единицы сырья;  $u_{ij}(t)$  — объем поставки;

$E_2$  — затраты на хранение сырья на складе карьера и (или) завода,

$$E_2 = \sum_{t=0}^T \sum_{p_i \in P} c_{jj}(t) u_{jj}(t), \quad (3)$$

здесь  $c_{jj}(t)$  — стоимость хранения на складе единицы сырья;  $u_{jj}(t)$  — объем сырья на складе;

$E_3$  — ущерб от недопоставок,

$$E_3 = \sum_{t=0}^T \sum_{p_j \in P} c_j^\omega(t) \omega_j(t), \quad (4)$$

здесь  $\omega_j(t)$  — переменная, показывающая величину недопоставки в момент  $t$ .

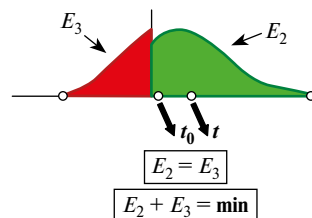
Переменная  $\omega_j(t)$  ориентирована в обратном направлении по отношению к времени потребления по плану. Поток  $\omega_j(t)$  показывает величину недопоставки. Просуммировав по времени и умножив на удельный ущерб от недопоставки  $c_j^\omega(t)$ , получим полный ущерб потребителю. Кроме того, переменную  $\omega_j(t)$  можно трактовать как изменение ритма потребления.

Так как слагаемые  $E_2$  и  $E_3$  зависят от вида и параметров закона распределения [16, 19], а  $c_{jj}(t)$  — это стоимость хранения единицы сырья, то дополнительные затраты на хранение и ущерб от недопоставки составят соответственно:

$$E_2 = \int_{t_0}^{\infty} \varphi(t) u_j c_j \Delta t dt; \quad (5)$$

$$E_3 = \int_{-\infty}^{t_0} \varphi(t) u_j c_j^\omega \Delta t dt. \quad (6)$$

Таким образом, оптимальное прибытие  $t_0$  будет достигнуто тогда, когда ущерб за простой производственных линий и затраты за хранение на складах станут равными (рис. 4).



**Рис. 4. Снижение суммарных потерь при замещении момента прибытия  $t$  на  $t_0$**

Необходимо учитывать, что затраты на хранение несопоставимы с ущербом от остановки работы производственных линий завода, поэтому необходимо осуществлять подвод сырья заблаговременно [15, 16, 19].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения гармоничного транспортного обслуживания производственных линий промышленных предприятий, таких как горно-перерабатывающие, необходимо учитывать стоха-

стический характер добычи сырья на карьерах и его потребления на комбинатах. Подвод сырья должен соответствовать надежному обеспечению производства, при этом исключать сгущение прибытия, которое требует дополнительного хранения сырья, а следовательно, увеличения затрат. Использование предложенного метода МДС при организации подвода сырья на горно-перерабатывающие предприятия позволит снизить затраты либо уменьшить ущерб от недопоставок.

## Литература

1. Montie L., Dimitrakopoulos R. Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: An uncertainty-based approach // *European Journal of Operational Research*. 2015. Vol. 247. Issue 1. Pp. 166–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.002>.
2. Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0 / I. Antoniuk, R. Svitek, M. Krajčovič, B. Furmannová // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. Pp. 503–509. DOI: [10.1016/j.trpro.2021.07.093](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.093).
3. Imane Ch., El Khaili M., Mestari M. Logistics Flow Optimization for Advanced Management of the Crisis Situation // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 175. Pp. 419–426. DOI: [10.1016/j.procs.2020.07.059](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.059).
4. Mishkurov P., Fridrikhson O., Lukyanov V. [et al.]. Simulated Transport and Logistics Model of a Mining Enterprise // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. Pp. 411–418. DOI: [10.1016/j.trpro.2021.02.090](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.090).
5. Рахмангулов А. Н., Копылова О. А. Повышение эффективности функционирования железнодорожных транспортно-технологических систем // *Корпоративная экономика*. 2015. № 2 (2). С. 4–12. ISSN 2413-0176.
6. Мишкuroв П. Н., Рахмангулов А. Н. Проблемы использования метода динамического программирования для оперативного управления вагонопотоками // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2012. Т. 2. № 1. С. 279–285. ISSN 2222–9396.
7. Górnicka D., Kochańska J., Burduk A. Production Resources Utilization Improvement with the Use of Simulation Modelling // *Information Systems Architecture and Technology*. 2019. Pp. 41–50. DOI: [10.1007/978-3-030-30604-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30604-5_4).
8. Simulation Technologies in Risk Prevention within Crisis Management / J. Ristvej, R. Ondrejka, L. Simak [et al.] // *Proceedings of the Modelling and Simulation 2016 — European Simulation and Modelling Conference, Las Palmas, Spain, 26–28 October, 2016*. Pp. 327–330.
9. Executive dashboard systems for emergency management / A. Zagorecki, J. Ristvej, L. K. Comfort, T. Lovecek // *Komunikacie*. 2012. No. 14. Pp. 82–89.
10. Bubeník P., Horák F. Proactive Approach to Manufacturing Planning // *Qual. Innov. Prosper*. 2014. No. 18. Pp. 23–32.
11. Analysis and Optimisation of Complex Small-Lot Production in New Manufacturing Facilities Based on Discrete Simulation / M. Edl, V. Votava, Z. Ulrych [et al.] // *Proceedings of the 20th European Modeling & Simulation Symposium, Amantea, Italy, 17–19 September, 2008*. Pp. 198–203.

## References

1. Montie L., Dimitrakopoulos R. Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: An uncertainty-based approach. *European Journal of Operational Research*. 2015. Vol. 247. Issue 1. Pp. 166–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.002>.
2. Antoniuk I., Svitek R., Krajčovič M., Furmannová B. Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. Pp. 503–509. DOI: [10.1016/j.trpro.2021.07.093](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.093).
3. Imane Ch., El Khaili M., Mestari M. Logistics Flow Optimization for Advanced Management of the Crisis Situation. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 175. Pp. 419–426. DOI: [10.1016/j.procs.2020.07.059](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.059).
4. Mishkurov P., Fridrikhson O., Lukyanov V. [et al.]. Simulated Transport and Logistics Model of a Mining Enterprise. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. Pp. 411–418. DOI: [10.1016/j.trpro.2021.02.090](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.090).
5. Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A. Improving the efficiency of railway transport and technological systems [Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya zheleznodorozhnykh transportno-tekhnologicheskikh sistem]. *Corporate Economics*. 2015. No. 2 (2). Pp. 4–12. ISSN 2413-0176.
6. Mishkurov P. N., Rakhmangulov A. N. Problems of using the dynamic programming method for operational management of railway car traffic [Problemy ispol'zovaniya metoda dinamicheskogo programmirovaniya dlya operativnogo upravleniya vagonoptokami]. *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2012. Vol. 2. No. 1. Pp. 279–285. ISSN 2222-9396.
7. Górnicka D., Kochańska J., Burduk A. Production Resources Utilization Improvement with the Use of Simulation Modelling. *Information Systems Architecture and Technology*. 2019. Pp. 41–50. DOI: [10.1007/978-3-030-30604-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30604-5_4).
8. Ristvej J., Ondrejka R., Simak L. [et al.]. Simulation Technologies in Risk Prevention within Crisis Management. *Proceedings of the Modelling and Simulation 2016 — European Simulation and Modelling Conference, Las Palmas, Spain, 26–28 October, 2016*. Pp. 327–330.
9. Zagorecki A., Ristvej J., Comfort L. K., Lovecek T. Executive dashboard systems for emergency management. *Communication*. 2012. No. 14. Pp. 82–89.
10. Bubeník P., Horák F. Proactive Approach to Manufacturing Planning. *Qual. Innov. Prosper*. 2014. No. 18. Pp. 23–32.
11. Edl M., Votava V., Ulrych Z. [et al.]. Analysis and Optimisation of Complex Small-Lot Production in New Manufacturing Facilities Based on Discrete Simulation. *Proceedings of the 20th European Modeling & Simulation Symposium, Amantea, Italy, 17–19 September, 2008*. Pp. 198–203.
12. Martinkovič M., Svitek R., Biňasová V., Mičieta B. Computer simulation in the assessment of a new production variants. *Technologies, process and production systems*. 2018. Pp. 157–166.
13. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A., Osokin O. V. On using effective management models for transport flows [Ob ispol'zovanii mode-

12. Computer simulation in the assessment of a new production variants / M. Martinkovič, R. Svitek, V. Biňasová, B. Mičeta // Technologie, procesy i systémy produkcyjne. 2018. S. 157–166.
13. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин, О. В. Осокин // Вестник УрГУПС. 2019. № 1 (41). С. 60–69. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69. ISSN 2079-0392.
14. Рахмангулов А. Н. Выбор эффективной информационной модели управления горнодобывающего предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 8. С. 195–198. ISSN 0236-1493.
15. Козлов П. А., Владимирская И. П. Оптимизация взаимодействия поставщиков и потребителей при случайном разбросе в потреблении и времени доставки // Вестник РГУПС. 2009. № 2 (34). С. 66–70. ISSN 0201-727X.
16. Александров А. Э., Якушев Н. В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления // Управление большими системами. 2006. № 12–13. С. 5–14.
17. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Организационные подходы и модели оптимизации // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 18–23. ISSN 1992-3252.
18. Система расчета согласованного подвода грузов МДС (метод динамического согласования) / П. А. Козлов, И. В. Иванов, А. А. Каляганов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015663337 Российская Федерация. Заявл. 15.10.2015; опубл. 20.01.2016.
19. Козлов П. А., Владимирская И. П. Метод оптимизации взаимодействия в производственно-транспортных системах // Современные проблемы науки и образования. 2009. № 6–2. С. 17–18. eISSN 2070-7428.
14. Rakhmangulov A. N. Choosing an effective information management model of a mining enterprise [Vybor effektivnoy informatsionnoy modeli upravleniya gornodobyvayushhego predpriyatiya]. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2003. No. 8. Pp. 195–198. ISSN 0236-1493.
15. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Optimization of provider-consumer interaction in event of random scatter in consumption and delivery time [Optimizatsiya vzaimodeystviya postavshhikov i potrebiteley pri sluchaynom razbrose v potreblenii i vremeni dostavki]. Vestnik RGPS. 2009. No. 2 (34). Pp. 66–70. ISSN 0201-727X.
16. Alexandrov A. E., Yakushev N. V. Stochastic formulation of a dynamic transport problem with delays considering the random spread of delivery and consumption time [Stokhasticheskaya postanovka dinamicheskoy transportnoy zadachi s zaderzhkami s uchetom sluchaynogo razbroso vremeni dostavki i vremeni potrebleniya]. Management of large systems. 2006. No. 12–13. Pp. 5–14.
17. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Organizational approach and optimization models [Organizatsionnye podkhody i modeli optimizatsii]. World of Transport and Transportation. 2011. Vol. 9. No. 5 (38). Pp. 18–23. ISSN 1992-3252.
18. Kozlov P. A., Ivanov I. V., Kalyaganov A. A. The system for calculating coordinated supply of goods DMM (dynamic matching method) [Sistema rascheta soglasovannogo podvoda грузов MDS (metod dinamicheskogo soglasovaniya)]. Certificate of registration of a computer program No. 2015663337 Russian Federation. Filed 15.10.2015 ; publ. 20.01.2016.
19. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Method of optimization of interaction in production and transport systems [Metod optimizatsii vzaimodeystviya v proizvodstvenno-transportnykh sistemakh]. Modern Problems of Science and Education. 2009. No. 6-2. Pp. 17–18. eISSN 2070-7428.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 656.073.3

**Дмитрий Владимирович Кузьмин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

**Вера Владимировна Багинова**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Логистика и управление транспортными системами» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

**Дмитрий Алексеевич Краснобаев**, магистрант кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Dmitriy Vladimirovich Kuzmin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Systems Logistics and Management Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

**Vera Vladimirovna Baginova**, DSc in Engineering, Professor, Head of Transport Systems Logistics and Management Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

**Dmitriy Alexeevich Krasnobaev**, magistrate student, Transport Systems Logistics and Management Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

### Improving the operation of transport and logistics infrastructure using discrete-event simulation modeling tools

**Аннотация**

В статье рассмотрена имитационная дискретно-событийная модель, позволяющая изучать процесс сборки заказов на терминальном логистическом комплексе. С использованием модели выполнен ряд простых экспериментов, целью которых было определить по ABC-методу и случайным порядком среднее время обхода сборщиком мест хранения заказов. Установлено, что сегментированное размещение товарно-материальных ценностей по ABC-методу значительно сокращает время формирования заказа (обхода сборщиком мест хранения), а следовательно, повышает эффективность работы склада и уровень логистического сервиса компании. Приведенный пример реализации модели, а также листинг кода могут быть полезны для широкого круга разработчиков, в том числе не имеющих широких компетенций в области программирования.

**Ключевые слова:** дискретно-событийное моделирование, имитационная модель, складская логистика, ABC-анализ, AnyLogic

**Abstract**

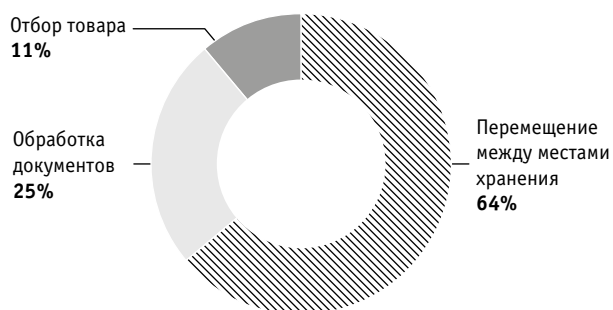
The article discusses a discrete-event simulation model that allows to study the process of order assembly at a terminal logistics complex. Using the model, a number of simple experiments were carried out, the purpose of which was to determine, using the ABC method and random order, the average time for an order picker to walk around order storage locations. It has been established that segmented placement of inventory items using the ABC method significantly reduces the time of order formation (order picker walking around storage locations), and therefore increases the efficiency of the warehouse and the level of the company's logistics service. The given example of the model implementation, as well as the code listing, can be useful for a wide range of developers, including those who do not have extensive programming competencies.

**Keywords:** discrete-event modeling, simulation model, warehouse logistics, ABC-analysis, AnyLogic

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-67-71

**К**онкурентоспособность компании, ее положение на рынке напрямую зависят от того, насколько быстро и качественно выполняются заказы потребителей. Поэтому оперативности комплектации заказов необходимо уделять особое внимание.

Организации работы объектов транспортно-логистической инфраструктуры посвящено множество трудов отечественных и зарубежных ученых [например, 1–3]. Анализ публикаций по тематике исследований позволяет заключить, что относительные временные затраты при отборе товара в основном распределяются по таким операциям, как перемещение отборщика между местами хранения, отбор товара с мест хранения и обработка документов (рис. 1).



**Рис. 1.** Типичное распределение временных затрат на операции отбора товара

Как видно из рис. 1, наиболее трудозатратная операция — это перемещение отборщика между местами хранения при сборе заказа. Следовательно, сокращение времени передвижений отборщиков позволит ускорить отбор товара и повысить качество логистического сервиса.

В связи с этим основной задачей проектирования системы розничного комиссионирования является разработка технологий, которые минимизируют время перемещения отборщика на одну единицу отбираемого товара.

Как правило, маршрут отборщика в основной зоне хранения выстраивается последовательно в соответствии со сформированным отборочным листом. Можно выделить два подхода к маршрутизации агента внутри склада:

а) хаотичный — агент перемещается от одной точки к другой, выбор происходит случайным образом;

б) последовательный — в соответствии с отборочным листом, сформированным WMS-системой.

Оптимальность маршрута можно рассматривать относительно нескольких целевых функций: времени сбора заказа, преодолеваемого сборщиком расстояния, сокращения или исключения повторного прохождения одних и тех же участков и т.д.

Сокращение времени отбора может быть достигнуто благодаря размещению товара на складе с учетом ABC-анализа, который классифицирует товарные группы по степени частоты обращения к тому или иному артикулу.

Чтобы проанализировать, как повлияет оптимальное расположение различных товарных групп на время отбора товара в зоне хранения, была построена имитационная модель в среде AnyLogic [4].

Дискретно-событийная имитационная модель представляет собой последовательность функциональных блоков, имитирующих поведение сотрудника склада, который выполняет комплектацию заказа. Модель позволяет проводить простые эксперименты с цифровой копией склада, в рамках которых наглядно демонстрируется преимущество номенклатурного распределения товарно-материальных ценностей по принципу ABC перед неупорядоченным размещением продукции.

ABC-анализ — это метод классификации запасов или ресурсов предприятия по степени их важности. В основу данного метода положен принцип Парето, согласно которому 20 % реализуемой продукции обеспечивают 80 % оборота компании.

В контексте управления запасами ABC-анализ позволяет классифицировать товары на основе их значимости для бизнеса. Это достигается путем разделения всех видов продукции на три категории.

Категория А: позиции с наибольшей стоимостью или наибольшей важностью. Обычно они составляют около 20 % от общего количества товаров. Категория А требует наибольшего контроля и внимания, так как обеспечивает высокую маржу прибыли или важна для осуществления ключевых операций.

Категория В: товары, занимающие промежуточное положение по стоимо-

сти или важности. Они обычно составляют около 30 % от общего ассортимента и составляют 15 % продаж.

Категория С: товары с наименьшей ценностью, которые составляют около 50 % от общего количества товаров и 5 % от продаж.

Цель ABC-анализа состоит в том, чтобы оптимизировать управление ресурсами, сосредоточившись на товарах категории А, которые обычно имеют наибольшее влияние на финансовые показатели или операционную эффективность.

Для изучения того, как принцип размещения различных товарных групп влияет на время отбора товара в зоне хранения, выполнена декомпозиция технологического процесса работы склада и разработана программно-имитационная дискретно-событийная модель. Процесс и разметка пространства планировки склада показаны на рис. 2.

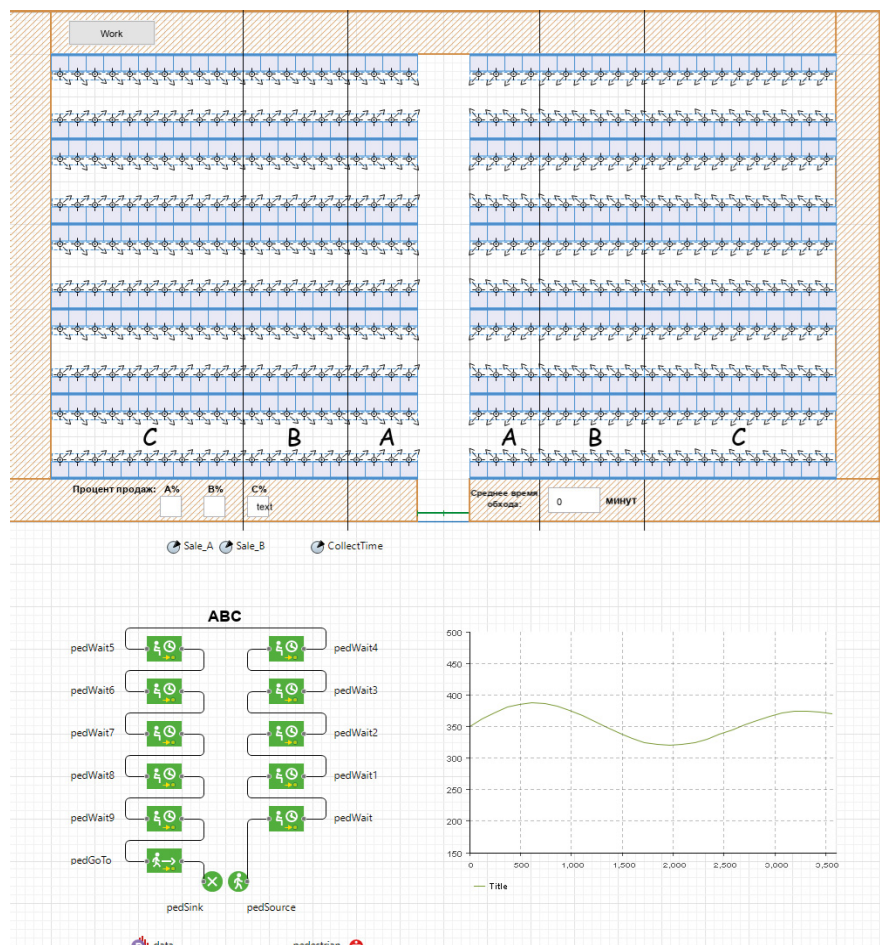


Рис. 2. Диаграмма процесса и разметка пространства планировки помещения основной зоны хранения склада

Таблица 1

Описание функциональных блоков модели

Блок	Функция	Характеристика
pedSource	Появление отборщиков заказа на входе склада	Появление агентов происходит по заданной интенсивности
pedWait	Определение маршрута отборщика и скорости сборки заказа	С помощью функции ChooseNode определяется маршрут, с помощью параметра CollectTime — скорость сборки заказа
pedGoTo	Блок маршрутизации потока	Цель движения — выход склада
pedSink	Удаление агентов из модели	
pedestrian	Популяция агентов	При удалении агентов обращается к корневому классу основной модели и сообщает элементу data разницу между временем текущей модели и временем появления агента <code>main.data.add(time () — timeWalk)</code>
data	Данные гистограммы. Выполнение статистического анализа значений	Анализируемое выражение <code>(time () — timeWalk)</code>
timeWalk	Параметр. Хранилище данных	Фиксирует время появления агента в модели. Тип хранимых данных — <code>double</code> . Используемая функция — <code>time()</code>
trafficLight	Светофор. Регулирование движения на перекрестке	Время работы секций определяется параметрами TL1–6
C_R 1_A, C_R 1_B, C_R 1_C	Коллекция	Содержит узлы каждого стеллажного прохода
ChooseNode	Функция	Определяет, к какой группе товара пойдет отборщик

Структура имитационной модели представляет собой последовательную совокупность функциональных блоков библиотеки AnyLogic (табл. 1).

С точки зрения архитектуры имитационные модели могут быть условно поделены на централизованные и децентрализованные. Подробнее данный вопрос рассмотрен в работах [5–8]. Централизованные имитационные модели представляют собой модели, в которых принятие решений осуществляется единой архитектурной веткой. В децентрализованных имитационных моделях каждый агент имеет свою собственную архитектурную ветку.

В нашей имитационной модели объекта транспортно-логистической инфраструктуры используется только одна архитектурная ветка, следовательно, модель является централизованной.

Для разработки централизованных моделей в программе AnyLogic реализованы базовые инструменты — блоки TimeMeasureStart и TimeMeasureEnd, которые позволяют измерить время, проведенное агентами в ограниченном этими блоками участке диаграммы процесса. TimeMeasureStart задает начальную точку участка, а TimeMeasureEnd задает конечную точку и хранит собранную статистику. Каждый агент, проходящий через блок TimeMeasureStart, затем должен пройти через соответствующий блок TimeMeasureEnd.

В данной модели вместо блоков TimeMeasureStart и TimeMeasureEnd в тело агента зашит параметр, который хранит время его появления. Время работы отборщика = модельное время удаления агента — модельное время появления.

В интерфейсе модели предусмотрена возможность отслеживать среднее время прохождения отборщиком полного пути,

а также формировать график, отображающий распределение времени прохождения пути. Среднее время полного обхода и график реализованы с помощью отслеживания динамического значения `data.mean()`.

Для выбора секции стеллажа, к которой должен подойти отборщик, используются узлы, содержащие в себе аттракторы. Узлы разделяют товар на складе по ABC-группам. Аттракторы отвечают только за выбор секции на стеллаже. Сначала выбирается узел, а затем — аттрактор внутри выбранного узла. Вид узлов и аттракторов модели представлен на рис. 3.

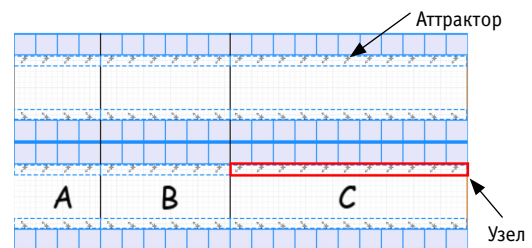


Рис. 3. Разметка пространства основной зоны хранения (узлы и аттракторы в модели)

Для упрощения работы с моделью узлы каждого стеллажного прохода были объединены в коллекции по ABC-группам (C\_R 1\_A, C\_R 1\_B, C\_R 1\_C).

Функция ChooseNode определяет, к какой группе товара пойдет отборщик. Код функции ChooseNode приведен ниже:

```
int randomNum = uniform_discr(0, 99);
ArrayList<AreaNode> selectedCollection = null;
```

```

if (randomNum < Sale_A)
    selectedCollection = C_R 1_A;
else if (randomNum < Sale_A+Sale_B)
    selectedCollection = C_R 1_B;
else
    selectedCollection = C_R 1_C;
int i = uniform_discr(0, selectedCollection.size()-1);
return selectedCollection.get(i)
    
```

Среда разработки поддерживает возможность использования любых вероятностных распределений для описания задержек и распределений агента в различных функциональных блоках диаграммы процесса.

В модели используется дискретное равномерное распределение, которое применяется, когда событие имеет ограниченное количество равновероятных исходов, т.е. вероятность каждого события равна  $1/n$ :

$$\begin{aligned}
 a &\in (\dots, -2, -1, 0, 1, 2 \dots) \\
 b &\in (\dots, -2, -1, 0, 1, 2 \dots) \\
 n &= b - a + 1
 \end{aligned}$$

На рис. 4 и 5 представлены графики распределения времени движения отборщика при размещении товара без оптимизации и с использованием ABC-метода.

Как видно из рис. 4 и 5, при размещении товара на складе ABC-методом среднее время прохождения полного пути составило  $\sim 225$  с, а при размещении без оптимизации  $\sim 360$  с. То есть использование ABC-метода позволило сократить среднее время сбора заказа приблизительно на 35 %.

Таким образом, на основе анализа рассмотренной имитационной модели можно сделать следующие выводы.

1. Размещение товаров на складе с использованием ABC-метода сокращает время комплектации заказов на 30–35 % и тем самым повышает эффективность работы складского комплекса.
2. Имитационное моделирование представляет собой эффективный инструмент для анализа и оптимизации складской логистики, так как позволяет исследовать и использовать различные сценарии и ситуации без прямого воздействия на реальную инфраструктуру.

## Литература

1. Смирнова А. В. Формирование складской системы как элемента транспортно-логистического комплекса // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. Москва : Российский университет транспорта, 2021. С. 583–589. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.77.
2. Киндинова В. В., Кринецкий Е. О., Кузнецова Е. В. Достоверность результатов имитационного моделирования процессов складской логистики // Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), Алушта, 24–31 мая 2018 г. Алушта : МАИ, 2018. С. 692–693.

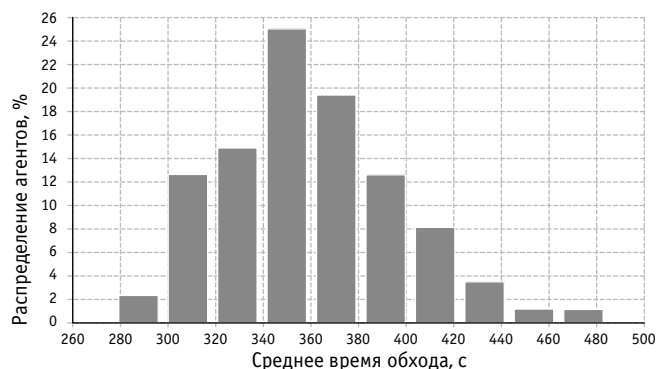


Рис. 4. Распределение времени прохождения пути при размещении товара на складе без оптимизации

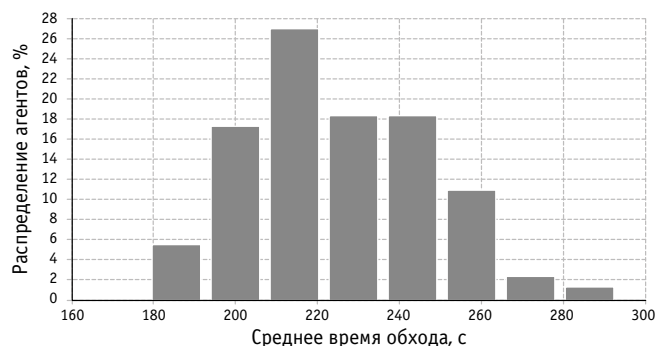


Рис. 5. Распределение времени прохождения пути при размещении товара на складе с использованием ABC-метода

Дальнейшая разработка представленной в статье темы имеет несколько возможных траекторий развития. В первую очередь для повышения детализации модели необходимо реализовать механизм варьирования вместимости ABC-зон. Помимо этого целесообразно использовать механизм варьирования количества наименований, отбираемых из мест хранения (модельно — количества точек назначения агента).

*Статья публикуется в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта № 5106164 от 28.12.2022 г.*

## References

1. Smirnova A. V. Formation of a warehouse system as an element of a transport and logistics complex [Formirovanie skladsКОЙ sistemy kak elementa transportno-logisticheskogo kompleksa]. Academician Vladimir Nikolayevich Obratsov — the founder of transport science. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021. Moscow : Russian University of Transport, 2021. Pp. 583–589. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.77.
2. Kindinova V. V., Krinetsky E. O., Kuznetsova E. V. Reliability of the results of simulation modeling of warehouse logistics processes [Dostovernost' rezul'tatov imitatsionnogo modelirovaniya protsessov skladsКОЙ logistiki]. Proceedings of the 12th International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (NPNJ'2018), Alushta, May 24–31, 2018. Alushta : MAI, 2018. Pp. 692–693.

3. Игнатова Д. В., Илларионов И. В. Моделирование рисков складских процессов в программной среде AnyLogic // Сборник студенческих научных работ факультета компьютерных наук ВГУ. Воронеж : Воронежский государственный университет, 2018. С. 145–150.
4. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 08.04.2023).
5. Разработка имитационной дискретно-событийной модели транспортной инфраструктуры с использованием инструментов оптимизации / Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова, Д. А. Краснобаев, Д. В. Мусатов // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 2. С. 42–48. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-42-48. ISSN 2072-8735.
6. Kuzmin D., Baginova V. Discrete-Event Intersection Operation Model (Yasnyy Proyezd — Dezhnev street, Moscow). Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 247. Pp. 283–294. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_29.
7. Kuzmin D., Baginova V., Ageikin A. Discrete event simulation model of the railway station. The 10th International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 2–5, 2022. Novosibirsk: Elsevier B. V., 2022. Pp. 929–937. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.091.
8. Кузьмин Д. В., Багинова В. В. Дискретно-событийная имитационная модель работы перекрестка // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. Москва : Российский университет транспорта, 2021. С. 487–497. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.65.
3. Ignatova D. V., Illarionov I. V. Risk modeling of warehouse processes in the AnyLogic software environment [Modelirovanie riskov skladских процессов v programmnoy srede AnyLogic]. Collection of student scientific papers of the Faculty of Computer Science of the Voronezh State University. Voronezh : Voronezh State University, 2018. Pp. 145–150.
4. AnyLogic: simulation modeling for business [AnyLogic: imitatsionnoe modelirovanie dlya biznesa]. URL: <https://www.anylogic.ru/> (access date: 04.08.2023).
5. Kuzmin D. V., Baginova V. V., Krasnobaev D. A., Musatov D. V. Development of simulation discrete-event model of transport infrastructure using optimization tools [Razrabotka imitatsionnoy diskretno-sobytiynoy modeli transportnoy infrastruktury s ispol'zovaniem instrumentov optimizatsii]. T-Comm: Telecommunications and Transport. 2023. Vol. 17. No. 2. Pp. 42–48. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-42-48. ISSN 2072-8735.
6. Kuzmin D., Baginova V. Discrete-Event Intersection Operation Model (Yasnyy Proyezd — Dezhnev street, Moscow). Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 247. Pp. 283–294. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_29.
7. Kuzmin D., Baginova V., Ageikin A. Discrete event simulation model of the railway station. The 10th International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 2–5, 2022. Novosibirsk : Elsevier B.V., 2022. Pp. 929–937. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.091.
8. Kuzmin D. V., Baginova V. V. Discrete-event simulation model of the intersection [Diskretno-sobytiynaya imitatsionnaya model' raboty perekrestka]. Academician Vladimir Nikolayevich Obratsov — the founder of transport science. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021. Moscow : Russian University of Transport, 2021. Pp. 487–497. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.65.

Объем статьи 0,54 авторских листа



УДК 621.43.013

**Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮрГАУ), Челябинск, Россия,**

**Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и технология и механизация животноводства» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮрГАУ), Челябинск, Россия,**

**Александр Сергеевич Меньшенин, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮрГАУ), Челябинск, Россия,**

**Степан Андреевич Чоккой, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮрГАУ), Челябинск, Россия**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧНОСТИ БЕНЗИНОВОГО АВТОМОБИЛЯ ПУТЕМ АНАЛИЗА СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПЕРЕД АНТИТОКСИЧНОЙ СИСТЕМОЙ

**Alexander Vladimirovich Gritsenko, DSc in Engineering, Professor, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Professor, Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia,**

**Konstantin Vyacheslavovich Glemba, PhD in Engineering, Associate Professor, Researcher, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Associate Professor, Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia,**

**Alexander Sergeevich Menshenin, postgraduate student, Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia,**

**Stepan Andreevich Chokoy, postgraduate student, Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia**

## Study of the environmental friendliness of a gasoline car by analyzing the composition of exhaust gases before the anti-toxic system

### Аннотация

Предлагается метод тестового диагностирования, основанный на контроле многокомпонентным газоанализатором параметров токсичности отработавших газов в выпускных коллекторах отдельных цилиндров до каталитического нейтрализатора. Исследуются взаимосвязи параметров  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  как по отдельности, так и совместно при имитации изменения технического состояния свечей системы зажигания и сопротивления каталитического нейтрализатора в выпускной системе. Эксперименты проводятся при двух положениях открытия дроссельной заслонки: 20 и 40 %. Совместный анализ зависимостей  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  показывает на смещение точки их пересечения в зону большей или меньшей длительности впрыска в зависимости от неисправности. С ростом величины сопротивления выпуска диапазон изменения  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  существенно уменьшается, то же самое наблюдается при уменьшении зазора свечи зажигания. Представленный метод рекомендуется для использования автообслуживающими и машиностроительными предприятиями, что позволит им осуществлять высокоэффективный контроль за техническим состоянием систем двигателя.

**Ключевые слова:** двигатель, диагностирование, тестовый метод, каталитический нейтрализатор, параметры токсичности отработавших газов

### Abstract

A test diagnostic method is proposed, based on monitoring the toxicity parameters of exhaust gases in the exhaust manifolds of individual cylinders up to the catalytic converter with a multi-component gas analyzer. The relationships between the parameters  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}$  are analysed both individually and jointly when simulating changes in the technical condition of the spark plugs of the ignition system and the resistance of the catalytic converter in the exhaust system. Experiments are carried out at two throttle opening positions: 20 and 40 %. A joint analysis of the dependences of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}$  shows a shift of the point of their intersection to the zone of longer or shorter injection duration, depending on the malfunction. As the exhaust resistance increases, the range of changes in  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}$  decreases significantly; the same is observed when the spark plug gap decreases. The presented method is recommended for use by auto service and machine-building enterprises, which will allow them to carry out highly effective monitoring of the technical condition of engine systems.

**Keywords:** engine, diagnostics, test method, catalytic converter, exhaust gas toxicity parameters

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-72-82

e-mail: alexgrits13@mail.ru, glemba77@mail.ru, jibrflf@gmail.com, mail2014mail@mail.ru  
Дата поступления: 30.06.2023

ТРАНСПОРТ УРАЛА / № 4 (79) / 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Основная часть автомобильного парка России находится в зоне действия устаревших стандартов и эксплуатируется с демонтированными каталитическими нейтрализаторами, замещенными эмуляторами и «обманками» экологических систем, что приводит к существенному увеличению количества выбросов отработавших газов (ОГ) и превышению экологических норм [1–3]. Как правило, из-за отсутствия экологического контроля автотранспортные средства эксплуатируются с серьезными нарушениями экологических нормативов. Кроме того, по разным причинам большинство населения России не может получить полноценный комплекс ТО и ТР в дилерских центрах [4–6]. Согласно данным аналитического агентства АВТОСТАТ, в 2022 г. такие затраты в среднем на один автомобиль в месяц возросли с 9,1 до 10,6 тыс. руб. В то же время смещаются акценты, связанные с распределением работ по предприятиям сервиса, например, на долю официальных дилеров приходится 12 % всего рынка услуг (52,3 млрд руб.), на независимые станции технического обслуживания — 35 % (151,1 млрд руб.), причем самообслуживание и гаражный ремонт составляют 53 % (228,7 млрд руб.), и в условиях международных экономических санкций доля самообслуживания будет неуклонно возрастать [7–9].

В сложившейся ситуации многие организации и физические лица вынуждены ограничивать свои расходы, предпочитая покупать дешевые расходные материалы (рис. 1) [4, 10].

Анализ данных рис. 1 показывает, что лидирует такая причина, как рост стоимости смазочных материалов. В условиях значительной конкуренции предлагаемых смазочных материалов и запчастей фактор стоимости очень важен, тем более что часть клиентов быстро перестраивается под приобретение продукции новых брендов. Согласно данным АВТОСТАТ, многие автовладельцы перешли на отечественные марки масел, то же самое можно сказать и о расходных материалах, которые уступают по уровню качества лидирующим брендам, ушедшим с рынка [11, 12]. Это, в свою очередь, приводит к увеличению числа отказов различных систем автомобиля [13–15]. Соответственно для управления экологической ситуацией в регионах России необходим контроль за токсичностью ОГ при эксплуатации автотранспортных средств [16–18]. Достичь этого, по мнению авторов, возможно, например, на основе использования встроенных методов тестового контроля технического состояния систем автотранспорта [19–21].

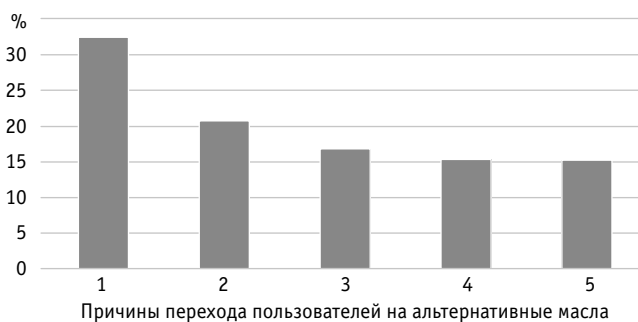


Рис. 1. Статистика причин перехода от многолетнего использования предпочитаемой марки моторного масла к иным брендам:

- 1 — существенный рост стоимости; 2 — смена марки автомобиля;
- 3 — заметное снижение качества; 4 — отсутствие предпочитаемой марки в продаже; 5 — бренд исчез из продажи

Цель исследований, представленных в настоящей статье, — повышение экологической безопасности автотранспорта за счет разработки метода и средства контроля технического состояния системы выпуска двигателя при помощи анализа показателей токсичности ОГ на тестовых режимах с возможностью управления экологическими параметрами. Задачи исследований: разработка методики проведения тестового контроля параметров токсичности и планирование эксперимента; разработка стенда и выбор контрольного и диагностического оборудования. Гипотезой является предположение, что контроль параметров токсичности ОГ до каталитического нейтрализатора позволяет превентивно определить эпицентр неисправности и скорость ее развития, выявить степень опасности для всех систем двигателя и устранить неисправность, что даст возможность продлить ресурс и срок безаварийной работы антитоксичных систем.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились на исследовательском стенде, представляющем собой испытательную установку на базе бензинового двигателя ВАЗ-2112, оснащенного электронной системой управления с обратной связью (рис. 2а) [4, 22, 23]. Кроме того, для обеспечения тестового диагностирования систем двигателя внутреннего сгорания (ДВС) использовалось разработанное авторами приборное средство (рис. 2б), которое подсоединялось в разрыв соединительных цепей системы зажигания и электромагнитных форсунок [4]. Прибор позволяет

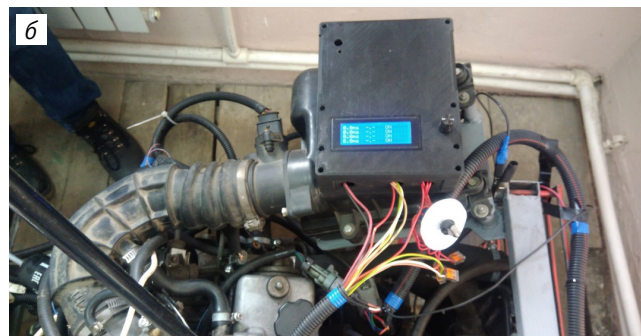


Рис. 2. Экспериментальная установка и оборудование:

а — исследовательский стенд на базе ДВС ВАЗ-2112; б — разработанный прибор для тестового диагностирования ДВС

обособленно управлять работой свечи зажигания и электромагнитной форсунки каждого цилиндра, выбранного для диагностирования, путем отключения отдельных импульсов или методом варьирования их длительностью.

Важной частью методики проведения эксперимента было обеспечение таких режимов работы ДВС, при которых оставался бы только один работающий цилиндр, а остальные отключались посредством управления тестового прибора. В ходе эксперимента задавалась вариация длительности впрыска топлива в широких пределах — от минимально возможной до максимальной с дискретностью в 0,1 мс [4, 24, 25]. Для измерения параметров токсичности ОГ использовался многокомпонентный газоанализатор «Инфракар М-3» нулевого класса точности с возможностью контроля показателей таких компонентов, как  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$  и  $CH$ . Подсоединение газоанализатора к испытательной установке осуществлялось через каждый коллектор из четырех, на которых специально были смонтированы резьбовые штуцеры с герметичным подсоединением. В результате было обеспечено последовательное подсоединение зонда газоанализатора для проведения замеров параметров токсичности каждого отдельно работающего цилиндра. Зонд газоанализатора подсоединялся через охлаждаемый змеевик, так как выпускные ОГ после выхода из цилиндра имеют температуру в выпускном коллекторе до 700 °С, но после охлаждения их температура уже находится в диапазоне 30–90 °С (в зависимости от режима испытания ДВС).

При проведении исследований обеспечивались два режима работы ДВС — при 20 и 40 % открытия дроссельной заслонки, положение которой точно фиксировалось в процессе испытаний с отображением в программном интерфейсе в виде отдельного параметра, а все регистрируемые данные записывались в цифровом виде [4]. Режим имитации неисправностей создавался путем варьирования зазоров в комплекте свечей зажигания от 0,3 до 1,1 мм с шагом в 0,4 мм. В системе выпуска ОГ предусмотрена разъединяемая муфта с возможностью установки в нее съемных шайб с различными диаметрами отверстий (от 8 до 26 мм с шагом 9 мм). Пределы варьирования имитируемых неисправностей выбирались с учетом минимальных и максимальных пределов изменения технического состояния систем ДВС.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались в приложении программы Excel, и здесь же формировались графические зависимости. На первом этапе экспериментальных исследований проводился анализ данных отдельно по каждому компоненту ОГ, т.е.  $CO_2$  и  $CH$ , а на втором этапе — их совместный анализ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

Взаимосвязь между концентрацией  $CO_2$  и временем впрыска исследовалась на основе варьирования таких входных параметров, как эквивалентное сопротивление системы выпуска (в виде диаметра отверстий съемных шайб в разъединяемой муфте системы выпуска ОГ) и зазор свечи зажигания, при степени открытия дроссельной заслонки 20 и 40 % (рис. 3).

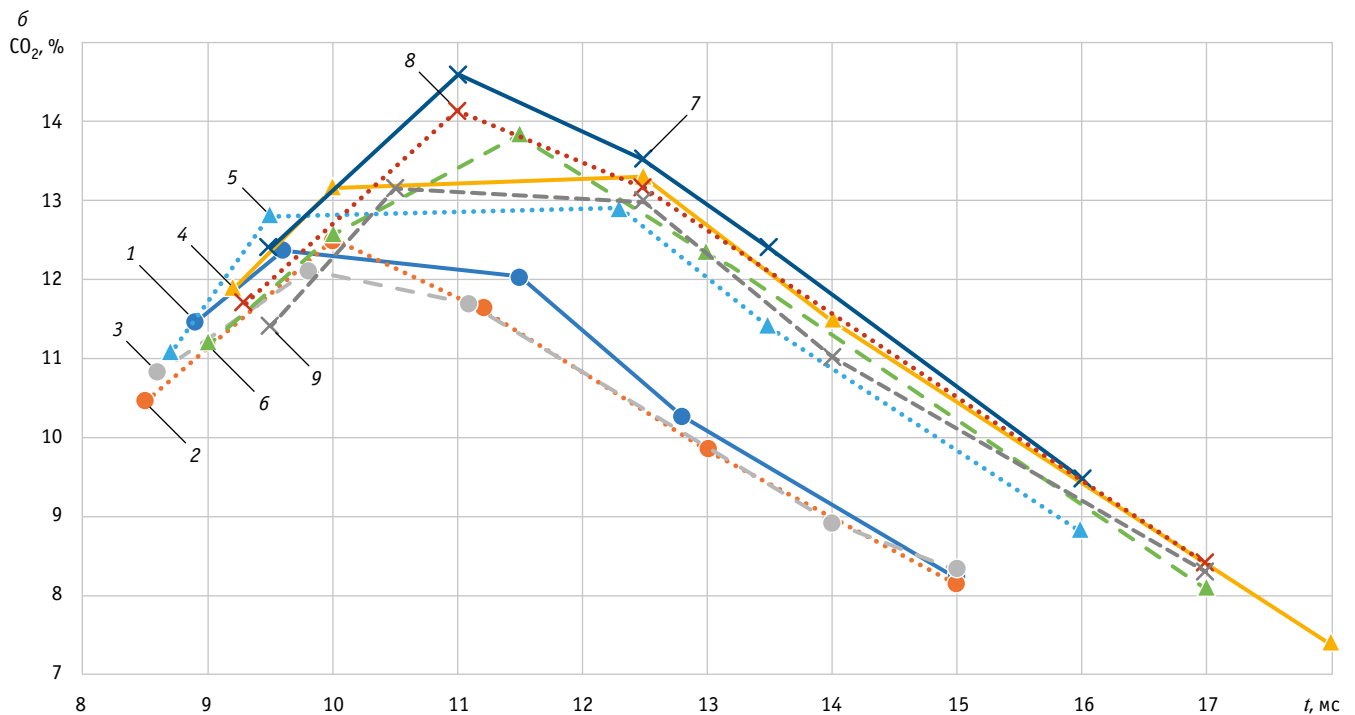
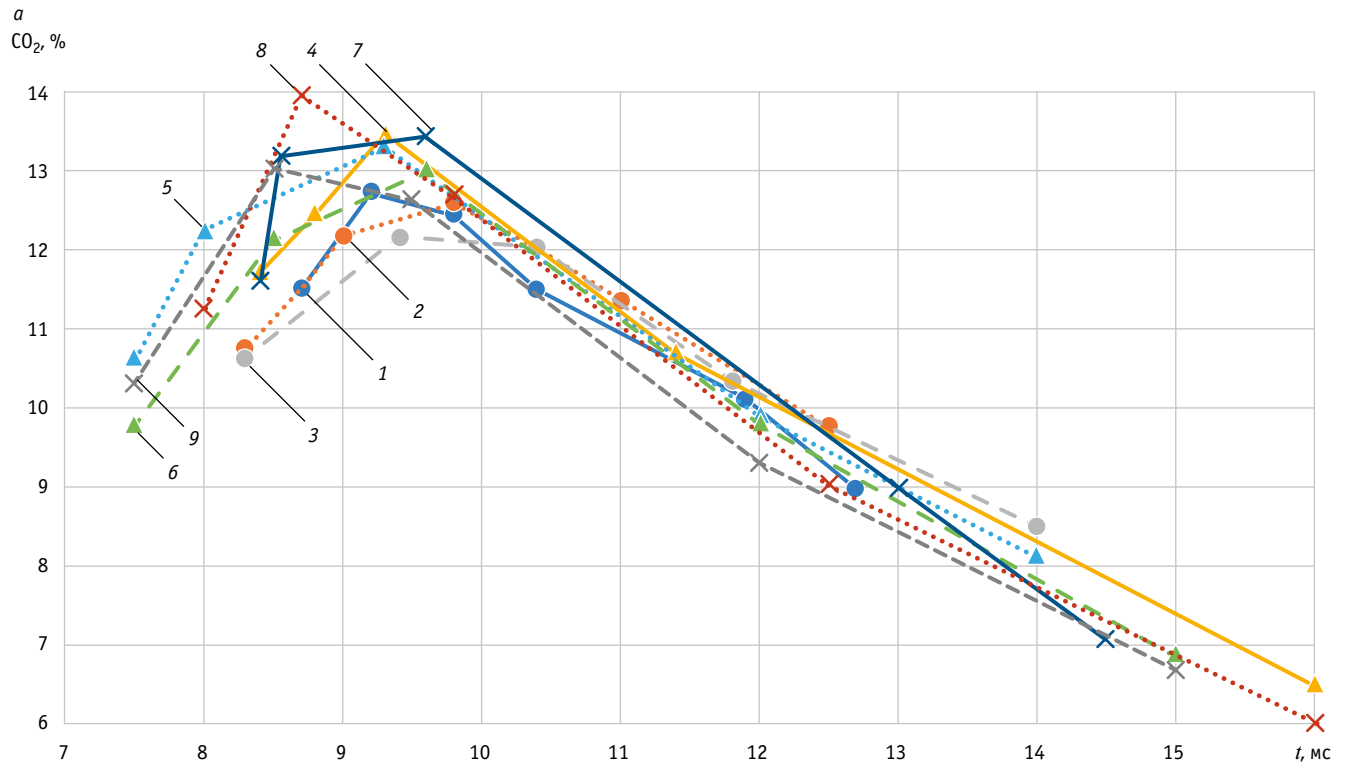
Анализ рис. 3а показывает, что в зоне малых длительностей впрыска при  $t = 7,5$  мс начинается рост до максимального

значения параметра  $CO_2$  (около 14 %), кроме того, максимум  $CO_2$  приходится на временной диапазон  $t = 8–9,5$  мс, и после достижения максимума все характеристики лавинно устремляются вниз, достигая предела работоспособности при максимальном времени впрыска топлива. Максимальный предел работоспособности для зоны богатых смесей составляет  $t = 16$  мс. Из серии характеристик видно, что при эквивалентном сечении выпускного тракта  $R = 8$  мм минимальная длительность впрыска смещается в большую сторону за пределы  $t = 8$  мс, точка максимума  $CO_2$  тоже уходит правее и находится в области  $t = 9,3$  мс, и продолжительность характеристик заканчивается при меньших значениях  $t$  (до 15 мс). В то же время допустимые изменения эквивалентного сопротивления и номинальные значения сопротивления не дают весомых изменений, и все снятые характеристики проходят в пределах одного поля данных при небольших изменениях и вариации  $CO_2$ .

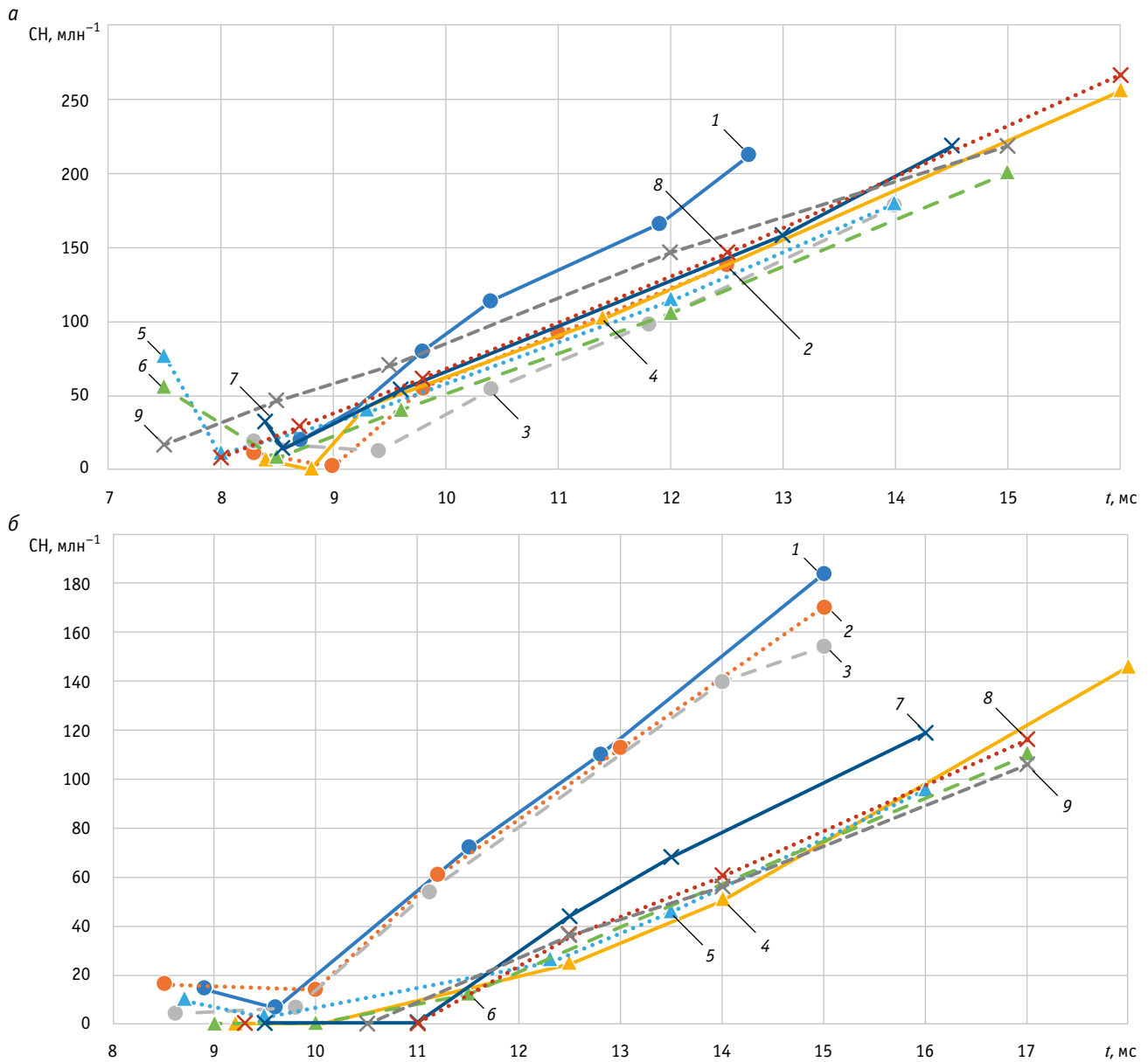
Анализ рис. 3б показывает, что начало и окончание характеристики  $CO_2$  смещаются правее в сторону больших длительностей впрыска. Например, начало характеристик наблюдается при  $t = 8,6$  мс, после чего пик максимума характеристик смещается в точку, соответствующую  $t = 11$  мс. Кроме того, максимальная граница пределов работоспособности уходит вправо до значения  $t = 18$  мс. На графике также видна тенденция снижения выбросов  $CO_2$  при уменьшении эквивалентного сечения выпускного тракта  $R$  до 8 мм, при этом максимум  $CO_2$  находится в зоне  $t = 10,5$  мс, а максимальный предел работоспособности при  $R = 8$  мм наступает при  $t = 15$  мс. То есть видна явная закономерность, связанная со смещением максимума  $CO_2$  и пределов регулирования по максимальной длительности впрыска при увеличении сопротивления выпускного тракта, что можно использовать в практике диагностирования каталитических нейтрализаторов, а также свечей зажигания.

Значительный интерес представляет исследование изменения параметра  $CH$  при варьировании длительности впрыска от минимально возможных до предельных значений, ограничивающих работоспособность ДВС. С этой целью проведен эксперимент по контролю параметра  $CH$  для 9 опытов с набором последовательностей данных при варьировании  $R = 8–26$  мм и  $z = 0,3–1,1$  мм со степенью открытия дроссельной заслонки в 20 % (рис. 4а).

Из рис. 4а видно, что серия характеристик начинается в зоне малой длительности впрыска при  $t = 7,5$  мс. Явный минимум параметра  $CH$  приходится на диапазон длительности впрыска 8,7–9,3 мс, после чего наблюдается практически линейное увеличение выбросов  $CH$  до точки, соответствующей пределу работоспособности  $t = 16$  мс. На графике виден явный тренд удлинения зоны регулирования ДВС для вариантов с минимальным сопротивлением выпускной системы, тогда как рост сопротивления выпускной системы приводит к смещению начала характеристики вправо в сторону больших длительностей впрыска от  $t = 8,5–8,7$  мс до области предела работоспособности при  $t = 12,7–14$  мс. Можно сделать вывод, что контроль сопротивления выпускного тракта возможен на основе фиксации предельных значений длительности впрыска в зоне малых и больших длительностей впрыска.



**Рис. 3.** Изменение токсичности CO<sub>2</sub> от времени впрыска  $t$  в зависимости от варьирования значений эквивалентного сопротивления системы выпуска  $R$  (8, 17 и 26 мм) и зазора свечи зажигания  $z$  (0,3, 0,7 и 1,1 мм) при степени открытия дроссельной заслонки 20% (а) и 40% (б):  
 1 —  $R = 8$  мм,  $z = 0,3$  мм; 2 —  $R = 8$  мм,  $z = 0,7$  мм; 3 —  $R = 8$  мм,  $z = 1,1$  мм; 4 —  $R = 17$  мм,  $z = 0,3$  мм; 5 —  $R = 17$  мм,  $z = 0,7$  мм;  
 6 —  $R = 17$  мм,  $z = 1,1$  мм; 7 —  $R = 26$  мм,  $z = 0,3$  мм; 8 —  $R = 26$  мм,  $z = 0,7$  мм; 9 —  $R = 26$  мм,  $z = 1,1$  мм



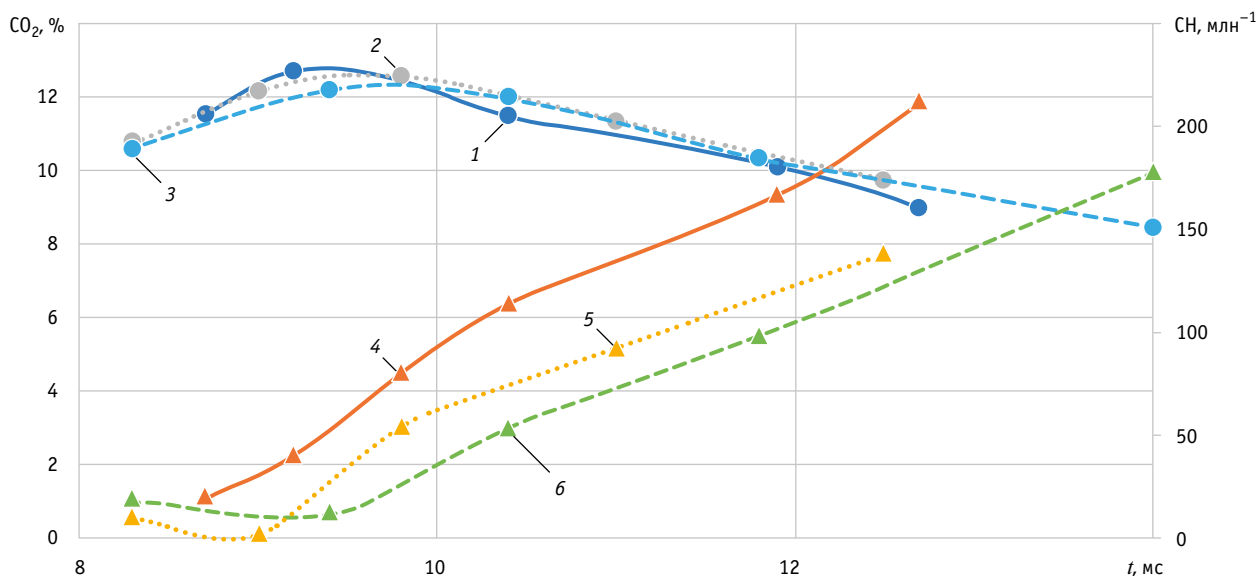
**Рис. 4.** Изменение параметра  $CH$  от длительности впрыска  $t$  в опытах с варьированием значений эквивалентного сопротивления системы выпуска  $R$  (8, 17 и 26 мм) и зазора свечи зажигания  $z$  (0,3, 0,7 и 1,1 мм) при степени открытия дроссельной заслонки 20 % (а) и 40 % (б):  
 1 —  $R = 8$  мм,  $z = 0,3$  мм; 2 —  $R = 8$  мм,  $z = 0,7$  мм; 3 —  $R = 8$  мм,  $z = 1,1$  мм; 4 —  $R = 17$  мм,  $z = 0,3$  мм; 5 —  $R = 17$  мм,  $z = 0,7$  мм;  
 6 —  $R = 17$  мм,  $z = 1,1$  мм; 7 —  $R = 26$  мм,  $z = 0,3$  мм; 8 —  $R = 26$  мм,  $z = 0,7$  мм; 9 —  $R = 26$  мм,  $z = 1,1$  мм

Из рис. 4б видно, что начало характеристики лежит в зоне более больших длительностей впрыска при  $t = 8,5$  мс (по сравнению с рис. 4а) и пределы максимума достижимой длительности впрыска до предела работоспособности также уходят далеко вправо до  $t = 18$  мс. Кроме того, по рис. 4б четко заметно разделение серий характеристик, особенно при  $R = 8$  мм. Три характеристики начинаются с одинаковых значений  $t$ , но точка минимума приходится на 9,2–9,5 мс. Далее характеристики идут резко вверх, обнаруживая весомый прирост содержания  $CH$  до 60–70 млн<sup>-1</sup> относительно характеристик с номинальным сопротивлением выпуска и достигая максимума

при  $t = 15$  мс, где концентрация  $CH$  равна 154–184 млн<sup>-1</sup>, причем большая величина регистрируется при предельно минимальных значениях зазора свечи зажигания, т.е.  $z = 0,3$  мм.

На втором этапе экспериментов изучалось взаимовлияние двух параметров токсичности  $CO_2$  и  $CH$  с разными величинами длительности впрыска  $t$ , уровнями 20 и 40 % открытия дроссельной заслонки и изменением  $R$  в пределах 8–26 мм.

Сравнение зависимостей, представленных на рис. 5, показывает некоторый максимум показателя  $CO_2$ , который представляет интерес с точки зрения нахождения оптимума состава топливно-воздушной смеси (ТВС). С учетом исследований



**Рис. 5.** Изменение параметров  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  в отработавших газах бензинового ДВС в зависимости от длительности впрыска  $t$  при степени открытия дроссельной заслонки 20 % и эквивалентном сопротивлении системы выпуска  $R = 8$  мм: 1 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,3$  мм; 2 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,7$  мм; 3 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 1,1$  мм; 4 —  $\text{CH}$ ,  $z = 0,3$  мм; 5 —  $\text{CH}$ ,  $z = 0,7$  мм; 6 —  $\text{CH}$ ,  $z = 1,1$  мм

в области теории анализа изменения параметров токсичности с разным коэффициентом избытка воздуха [13–15] можно утверждать, что максимум  $\text{CO}_2$  всегда приходится на вариант со стехиометрическим составом смеси. Поэтому косвенно точка максимума перегиба  $\text{CO}_2$  в случае нахождения наилучшего варианта реализации мощности двигателя и минимального удельного эффективного расхода топлива будет важной характеристикой правильной работы ДВС. С другой стороны, параметр  $\text{CH}$  имеет здесь некий минимум с последующим прямым восхождением графиков по всей ширине описываемой характеристики. Важно также, что точка минимума выбросов  $\text{CH}$  является характеристикой полноты процесса сгорания, и нахождение в соответствующей этому минимуму области длительности впрыска будет наилучшим вариантом работоспособности ДВС.

Как видно из подробного анализа рис. 5, изменение  $\text{CO}_2$  в зависимости от технического состояния свечей зажигания показывает существенное отличие лишь в зоне больших длительностей впрыска, где цилиндр с номинальным значением зазора свечи зажигания продолжает работать ( $\text{CO}_2$  плавно уменьшается), тогда как в цилиндре с минимальным зазором свечи зажигания работа невозможна. С увеличением зазора свечи зажигания от 0,3 до 1,1 мм наблюдается смещение характеристик  $\text{CH}$  правее в область больших длительностей впрыска. Параметр  $\text{CH}$  и степень его изменения позволяют однозначно идентифицировать изменение зазора свечи зажигания и нарушение правильности функционирования ДВС, что заметно при значениях зазора свечи зажигания 0,7 и 1,1 мм, где сгорание происходит в более благоприятных условиях по сравнению с зависимостью при  $z = 0,3$  мм.

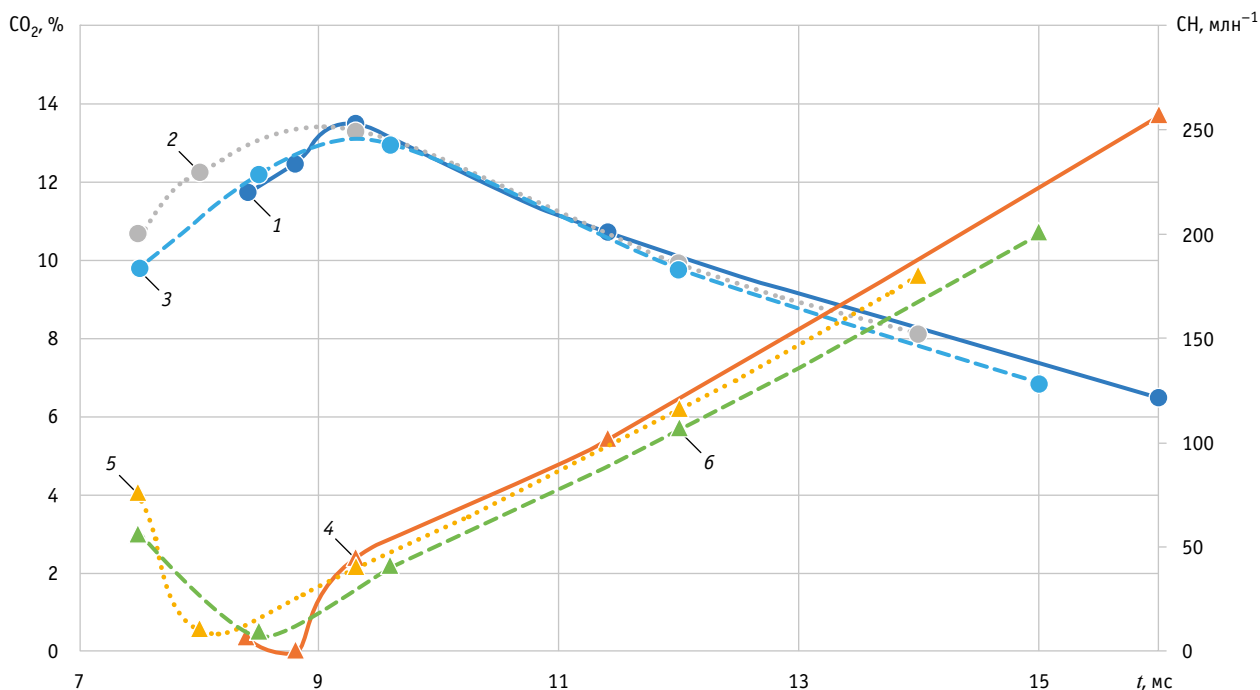
Рассмотрим данные эксперимента при эквивалентном сопротивлении  $R = 17$  мм (рис. 6). Анализ изменения концентрации  $\text{CO}_2$  показывает на малый разбег при изменении зазо-

ра свечи зажигания, т.е. фактически параметр  $\text{CO}_2$  мало чувствителен к изменению зазора свечи зажигания. Однако если сравнить рис. 5 и 6, то видно, что максимум  $\text{CO}_2$  выше при  $R = 17$  мм и изменяется в более широком диапазоне длительности впрыска.

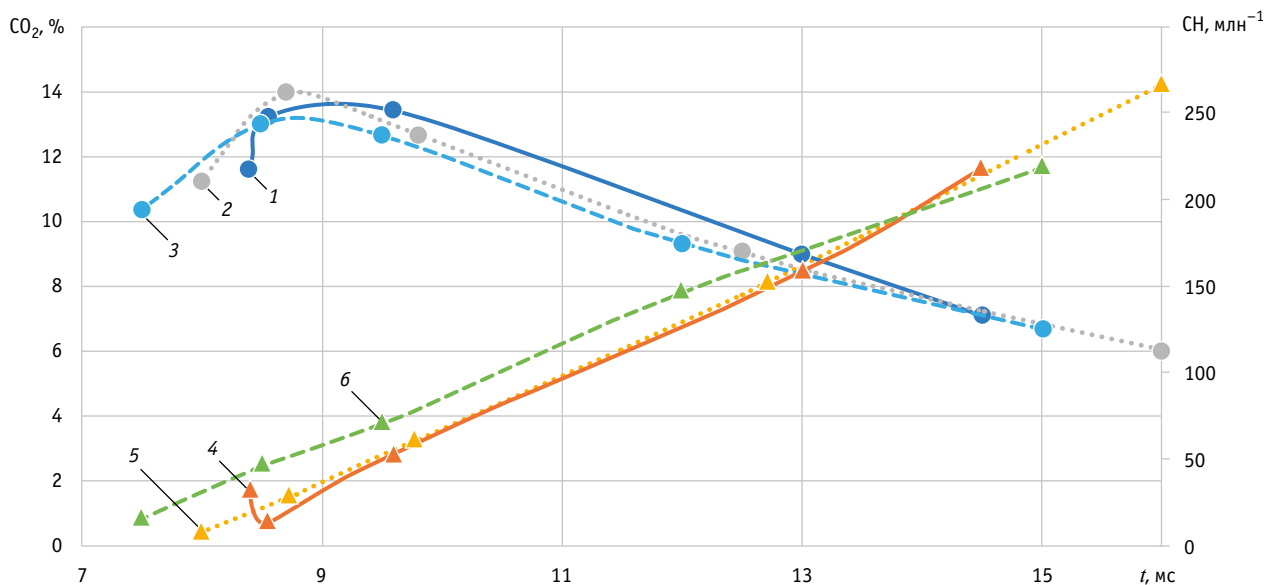
Как видно из рис. 6, увеличение зазора свечи зажигания также приводит к снижению выбросов  $\text{CH}$ , но в очень малых пределах (10–15 млн<sup>-1</sup>) по сравнению с данными рис. 5, где разница уже составляет 60–70 млн<sup>-1</sup>, что говорит о низкой чувствительности изменения параметра  $\text{CH}$  к величине зазора свечи зажигания. Формируется вывод о целесообразности дальнейшего проведения высокоточного контроля технического состояния свечей зажигания, который возможен только при высоких сопротивлениях в выпускном тракте (или предельно возможных нагрузках на цилиндр ДВС). Однако из рис. 6 видно, что характеристики  $\text{CH}$  смещаются правее по сравнению с рис. 4б, показывая более расширенный диапазон длительности впрыска работы цилиндров с эквивалентным сечением выпускного тракта  $R = 17$  мм, расширяя возможности регулирования. В то же время границы работоспособности в области минимального диапазона длительности впрыска также возрастают.

Проанализируем эксперимент при  $R = 26$  мм (рис. 7). Графики изменения параметра  $\text{CO}_2$  также указывают на высокую схожесть с рис. 6, что подтверждает предположение о малоэффективности контроля технического состояния свечей зажигания в области малых сопротивлений выпускного тракта.

Графики рис. 7 указывают также на малые отличительные особенности изменения показателя  $\text{CH}$  в зависимости от величины зазора свечи зажигания. Однако видно более низкое значение этого параметра при минимальных длительностях впрыска, так как создаются более благоприятные условия работы цилиндра при минимизации сопротивления выпускного тракта.



**Рис. 6.** Изменение параметров  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  в отработавших газах бензинового ДВС в зависимости от длительности впрыска  $t$  при степени открытия дроссельной заслонки 20 % и эквивалентном сопротивлении системы выпуска  $R = 17$  мм: 1 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,3$  мм; 2 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,7$  мм; 3 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 1,1$  мм; 4 —  $\text{CH}$ ,  $z = 0,3$  мм; 5 —  $\text{CH}$ ,  $z = 0,7$  мм; 6 —  $\text{CH}$ ,  $z = 1,1$  мм

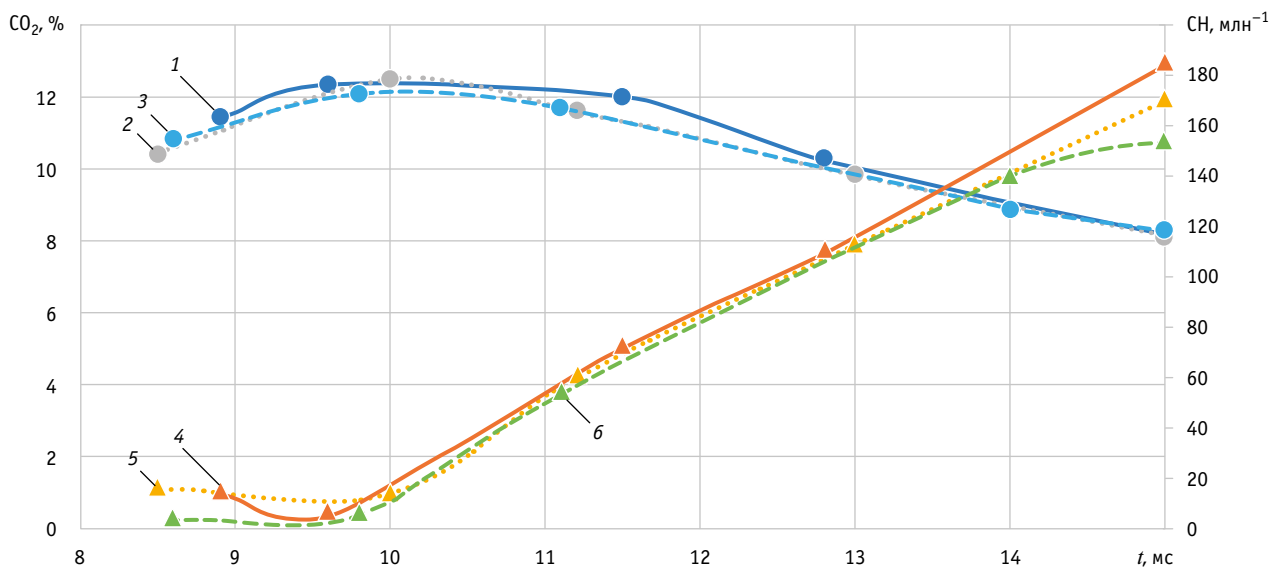


**Рис. 7.** Изменение параметров  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  в отработавших газах бензинового ДВС в зависимости от длительности впрыска  $t$  при степени открытия дроссельной заслонки 20 % и эквивалентном сопротивлении системы выпуска  $R = 26$  мм: 1 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,3$  мм; 2 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,7$  мм; 3 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 1,1$  мм; 4 —  $\text{CH}$ ,  $z = 0,3$  мм; 5 —  $\text{CH}$ ,  $z = 0,7$  мм; 6 —  $\text{CH}$ ,  $z = 1,1$  мм

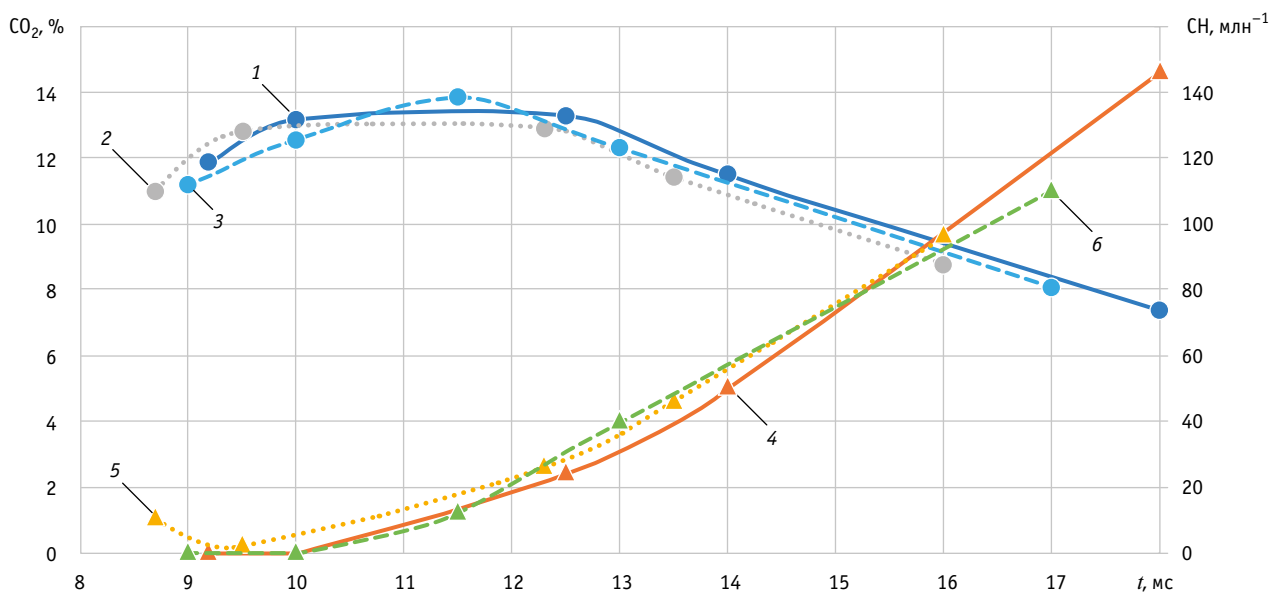
Проведем анализ изменения зависимостей параметров  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  при степени открытия дроссельной заслонки 40 %. Сравнивая полученные зависимости изменения параметра  $\text{CO}_2$  на рис. 8, видим отсутствие корреляции связи параметра  $\text{CO}_2$  с зазором свечи зажигания: все графики изменения  $\text{CO}_2$  идут заметно близко к друг другу и малоразличимы. Однако отлич-

ительной особенностью зависимости  $\text{CO}_2$  является максимум, приходящийся на 12,5 % в диапазоне  $t = 9,5-10,5$  мс.

Рассмотрим зависимости  $\text{CH}$  (см. рис. 8). Как видно, в диапазоне 8,5–10 мс наблюдается минимум значения выбросов  $\text{CH}$ , что характеризует наилучшие условия процесса сгорания, и выбор данной области является оптимальным с точки



**Рис. 8.** Изменение параметров  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  в отработавших газах бензинового ДВС в зависимости от длительности впрыска  $t$  при степени открытия дроссельной заслонки 40 % и эквивалентном сопротивлении системы выпуска  $R = 8 \text{ мм}$ : 1 —  $\text{CO}_2, z = 0,3 \text{ мм}$ ; 2 —  $\text{CO}_2, z = 0,7 \text{ мм}$ ; 3 —  $\text{CO}_2, z = 1,1 \text{ мм}$ ; 4 —  $\text{CH}, z = 0,3 \text{ мм}$ ; 5 —  $\text{CH}, z = 0,7 \text{ мм}$ ; 6 —  $\text{CH}, z = 1,1 \text{ мм}$



**Рис. 9.** Изменение параметров  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}$  в отработавших газах бензинового ДВС в зависимости от длительности впрыска  $t$  при степени открытия дроссельной заслонки 40 % и эквивалентном сопротивлении системы выпуска  $R = 17 \text{ мм}$ : 1 —  $\text{CO}_2, z = 0,3 \text{ мм}$ ; 2 —  $\text{CO}_2, z = 0,7 \text{ мм}$ ; 3 —  $\text{CO}_2, z = 1,1 \text{ мм}$ ; 4 —  $\text{CH}, z = 0,3 \text{ мм}$ ; 5 —  $\text{CH}, z = 0,7 \text{ мм}$ ; 6 —  $\text{CH}, z = 1,1 \text{ мм}$

зрения настройки работы двигателя на максимальной мощности и в режиме малого расхода топлива. Начиная со значения  $t = 10 \text{ мс}$  происходит линейный рост  $\text{CH}$  до границ регулирования, и заметной разницы между зависимостями не наблюдается, что подтверждает малочувствительность параметра  $\text{CH}$  к изменению зазора свечи зажигания в пределах  $z = 0,3\text{--}1,1 \text{ мм}$ .

Проанализируем рис. 9, отличающийся от предыдущего эквивалентным сопротивлением выпускного тракта  $R = 17 \text{ мм}$ . Видно, что смещение точки максимума  $\text{CO}_2$  идет в сторону боль-

ших длительностей впрыска  $t = 11,5 \text{ мс}$ . Кроме того, максимум  $\text{CO}_2$  поднимается практически до уровня 14 % (на рис. 8 — до 12,5 %). Дальнейшее изменение  $\text{CO}_2$  идет фактически линейно до ограничения работоспособности при  $t = 18 \text{ мс}$ .

Анализ изменения параметра  $\text{CH}$  показывает на аналогичный тренд начала в точках диапазона  $t = 8,5\text{--}10 \text{ мс}$ , однако далее наклон характеристик  $\text{CH}$  идет более полого по сравнению с рис. 8. Видно, что при 15 мс значение  $\text{CH}$  не превышает  $75 \text{ млн}^{-1}$ , тогда как на рис. 8 его величина около  $180 \text{ млн}^{-1}$ . Это говорит о более благоприятном процессе сгорания при



$R = 17$  мм по сравнению с вариантом при  $R = 8$  мм, однако влияние зазора свечи зажигания на изменение параметра СН не дает заметного различия, т.е. указывает на низкую корреляцию этих параметров. Можно сделать общий вывод об улучшении процесса сгорания с уменьшением сопротивления выпускного тракта, которое с высокой точностью позволяет диагностировать анализ выбросов СН в зависимости от изменения длительности впрыска.

Рассмотрим изменение показателей  $\text{CO}_2$  и СН при  $R = 26$  мм (рис. 10). Параметр  $\text{CO}_2$  достигает пика со значением 14,6 % (против 13,8 % при  $R = 17$  мм на рис. 9 и 12,5 % при  $R = 8$  мм на рис. 8). Дальнейшее изменение  $\text{CO}_2$  происходит по нисходящему тренду, примерно совпадая с трендом рис. 9.

Как показывает анализ зависимостей рис. 10, начало характеристики СН достаточно затяжное и сопровождается минимальным уровнем выбросов, т.е. можно говорить о более расширенной зоне эффективности работы ДВС и лучших условиях для регулирования. Дальнейшее увеличение впрыска показывает больший прирост уровня СН до абсолютных значений в  $118 \text{ млн}^{-1}$  (при зазоре свечи зажигания  $z = 0,3$  мм и длительности впрыска  $t = 16$  мс) по сравнению со значением в  $98 \text{ млн}^{-1}$  при аналогичных режимных параметрах (см. рис. 9). Однако абсолютные значения СН все же лидируют на рис. 9 с максимальным уровнем в  $146 \text{ млн}^{-1}$  при зазоре свечи зажигания  $z = 0,3$  мм и длительности впрыска топлива  $t = 18$  мс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы взаимосвязи параметров  $\text{CO}_2$  и СН как по отдельности, так и совместно при имитации изменения технического состояния свечей системы зажигания и сопротивления каталитического нейтрализатора в выпускной системе.

Установлено снижение показателя  $\text{CO}_2$  с уменьшением эквивалентного сечения выпускного тракта  $R$  до 8 мм, при этом значительно снижается и пиковое значение выбросов  $\text{CO}_2$ . Максимальный предел работоспособности при  $R = 8$  мм наступает при меньших значениях длительности впрыска  $t$ . По смещению максимума  $\text{CO}_2$  и пределов его регулирования можно определять рост сопротивления каталитических нейтрализаторов и ухудшение характеристик свечей зажигания. Таким образом, рекомендуется проводить контроль технического состояния системы выпуска путем анализа концентрации СН при открытии дроссельной заслонки  $\geq 40$  % и при максимальных длительностях впрыска. Что касается номинальных и допустимых значений сопротивления выпуска, то тренд изменения содержания СН идет гораздо ниже и существенно вправо, достигая времени впрыска  $t = 18$  мс и более. Минимальные и максимальные значения сопротивления на выпуске существенно различны, так как параметр СН имеет высокую чувствительность в районе  $50\text{--}60 \text{ млн}^{-1}$  на 2 мс прибавку времени длительности впрыска. Таким образом, контроль сопротивления выпускной системы может осуществляться путем анализа параметров токсичности, но высокая чувствительность обнаруживается только при  $R > 8\text{--}10$  мм, и динамика чувствительности увеличивается по мере приближения к максимуму сопротивления выпускного тракта. Чувствительный контроль системы зажигания возможен при малых значениях степени открытия дроссельной заслонки и высоких сопротивлениях в линии выпуска ОГ (в том числе и искусственно сформированных) или реализации значительных нагрузок на специальных нагрузочных стендах.

Установлен характерный максимум зависимости  $\text{CO}_2$  при изменении времени впрыска, что соответствует точке наилучшей эффективности работы ДВС. Так, уровень  $\text{CO}_2$  в зоне за-

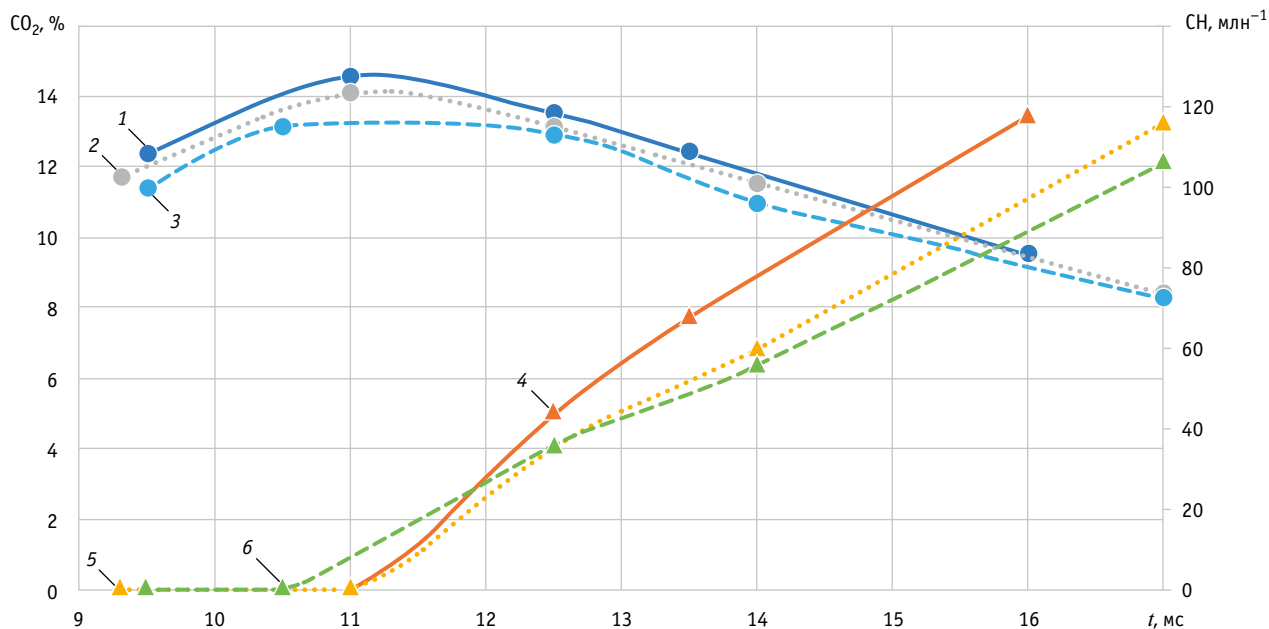


Рис. 10. Изменение параметров  $\text{CO}_2$  и СН в отработавших газах бензинового ДВС от длительности впрыска  $t$  при степени открытия дроссельной заслонки 40 % и эквивалентном сопротивлении системы выпуска  $R = 26$  мм:  
1 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,3$  мм; 2 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 0,7$  мм; 3 —  $\text{CO}_2$ ,  $z = 1,1$  мм; 4 — СН,  $z = 0,3$  мм; 5 — СН,  $z = 0,7$  мм; 6 — СН,  $z = 1,1$  мм

беднения ТВС и излишнего обогащения значительно снижается, но по характеристике  $\text{CO}_2$  с высокой точностью определяется оптимум обеспечения длительности впрыска, что соответствует максимуму значения  $\text{CO}_2$  на графике.

Эксперимент при степени открытия дроссельной заслонки 40 % показал высокую чувствительность параметра  $\text{CO}_2$  к изменению сопротивления выпускного тракта, а также лучшую чувствительность неисправностей системы выпуска и системы зажигания к изменению параметра СН. Так, при  $R = 8$  мм характеристики  $\text{CO}_2$  в точке максимума поднялись чуть выше 12 % (но при  $R = 26$  мм всего лишь выше на 14 %) и при увеличении длительности впрыска обнаружили меньший предел работоспособности при  $t = 15$  мс. Контроль характеристики СН показал на его характерный минимум в начале роста длительности впрыска и последующий предельный рост

с увеличением длительности впрыска. При  $R = 8$  мм происходит смещение графиков СН в зону их больших значений в среднем на 70–80 млн<sup>-1</sup>, а также уменьшение предела работоспособности по параметру  $t$  (при  $R = 8$  мм значение  $t$  не превысило 15 мс).

Совместный анализ зависимостей  $\text{CO}_2$  и СН показывает на смещение точки их пересечения в зону большей или меньшей длительности впрыска в зависимости от неисправности. С ростом величины сопротивления выпуска диапазон изменения  $\text{CO}_2$  и СН существенно уменьшается, и то же самое наблюдается при уменьшении зазора свечи зажигания. Таким образом, данный метод рекомендуется использовать автообслуживающим и машиностроительным предприятиям для высокоэффективного контроля за техническим состоянием систем ДВС.

## Литература

1. Давлетова Н. Х. Автотранспорт как глобальный источник загрязнения атмосферного воздуха // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 4. С. 90. ISSN 1812-7320.
2. Бондаренко Е. В., Гончаров А. А., Федотов А. М. Научные аспекты транспортной ноосферы // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 11. С. 4–7. ISSN 2077-7175.
3. Козлов А. В., Теренченко А. С., Васильев А. В. Анализ экологических требований «Евро-6» к автомобильным двигателям // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 3 (104). С. 40–46. ISSN 2073-9133.
4. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018: Lecture notes in mechanical engineering. Springer International Publishing, 2019. Pp. 2163–2173.
5. Экономическая непривлекательность принятия стандарта Евро-6 для Российской Федерации / О. Г. Феоктистов, Е. С. Короткова, Е. П. Усольцева, А. А. Касумова // Экономика и предпринимательство. 2017. № 11 (88). С. 121–127. ISSN 1999-2300.
6. Assessment of the City Air Basin Pollution Using a Calculation and Instrumental Technique / I. F. Suleimanov, G. V. Mavrin, D. A. Kharlyamov [et al.] // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. Vol. 9. No. 1S. Pp. 1360–1372.
7. Коротких Ю. С. Экологический стандарт Евро-6 в Европе и России // Управление рисками в АПК. 2016. № 1 (5). С. 34–40. ISSN 2413-6573.
8. Lozhkin V., Lozhkina O. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. Pp. 412–417.
9. Euro-7/VII-Konzepte in der Interaktion mit OBD und OBM / R. Gunja, H. Wancura, B. Raser, M. Weißbäck // MTZ. Motortechnische Zeitschrift. 2022. Vol. 83. No. 11. Pp. 44–51.
10. Методология бестормозного диагностирования кривошипно-шатунного механизма ДВС / С. А. Гребенников, А. С. Гребенников, Г. О. Киселев [и др.] // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2020. № 3 (42). С. 147–155.
11. Результаты исследования влияния процессов окисления на вязкостно-температурные характеристики частично синтетических моторных масел / Е. А. Ефремова, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. З. Олейник // Фундаментальные и прикладные

## References

1. Davletova N. Kh. Motor transport as a global source of atmospheric air pollution [Avtotransport kak global'nyy istochnik zagryazneniya atmosfery vozdukh]. Up-to-date high-tech technologies. 2005. No. 4. P. 90. ISSN 1812-7320.
2. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Fedotov A. M. Scientific aspects of the transport noosphere [Nauchnye aspekty transportnoy noosfery]. Intellect. Innovations. Investments. 2017. No. 11. Pp. 4–7. ISSN 2077-7175.
3. Kozlov A. V., Terenchenko A. S., Vasilyev A. V. Analysis of the Euro-6 environmental requirements to vehicle engines [Analiz ekologicheskikh trebovaniy «Euro-6» k avtomobil'nyim dvigatelyam]. Journal of Automotive Engineers. 2017. No. 3 (104). Pp. 40–46. ISSN 2073-9133.
4. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment. Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018 : Lecture notes in mechanical engineering : Springer International Publishing, 2019. Pp. 2163–2173.
5. Feoktistov O. G., Korotkova E. S., Usol'tseva E. P., Kasumova A. A. Economic unattractiveness of the adoption of the Euro-6 standard for the Russian Federation [Ekonomicheskaya neprivlekatel'nost' prinyatiya standarta Euro-6 dlya Rossiyskoy Federatsii]. Journal of Economy and entrepreneurship. 2017. No. 11 (88). Pp. 121–127. ISSN 1999-2300.
6. Suleimanov I. F., Mavrin G. V., Kharlyamov D. A. [et al.]. Assessment of the City Air Basin Pollution Using a Calculation and Instrumental Technique. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. Vol. 9. No. 1S. Pp. 1360–1372.
7. Korotkikh Yu. S. Environmental standard of Euro-6 in Europe and Russia [Ekologicheskyy standart Euro-6 v Evrope i Rossii]. Agricultural Risk Management. 2016. No. 1 (5). Pp. 34–40. ISSN 2413-6573.
8. Lozhkin V., Lozhkina O. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus. Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. Pp. 412–417.
9. Gunja R., Wancura H., Raser B., Weißbäck M. Euro-7/VII-Konzepte in der Interaktion mit OBD und OBM. MTZ. Motortechnische Zeitschrift. 2022. Vol. 83. No. 11. Pp. 44–51.
10. Grebennikov S. A., Grebennikov A. S., Kiselev G. O. [et al.]. Methodology of formless diagnosis of crank mechanism of internal combustion engine [Metodologiya bestormoznogo diagnostirovaniya krivoshipno-shatunogo mekhanizma DVS]. Technical Regulation in Transport Construction. 2020. No. 3 (42). Pp. 147–155.
11. Efremova E. A., Kovalsky B. I., Bezborodov Yu. N., Oleinik V. Z. Results of the study of the influence of oxidation processes on the viscosity-temperature characteristics of partially synthetic motor oils [Rezultaty issledovaniya vliyaniya protsessov okisleniya na vyazkostno-temperaturnye kharakteristiki chastichno sinteticheskikh motornykh masel]. Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2021. No. 5 (349). Pp. 9–14. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-9-14. ISSN 2073-7408.

- проблемы техники и технологии. 2021. № 5 (349). С. 9–14. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-9-14. ISSN 2073-7408.
12. Методы контроля и прогнозирования показателей термоокислительной стабильности смазочных масел / Б. И. Ковальский, А. Н. Сокольников, В. И. Верещагин [и др.]. Красноярск : Сибирский федеральный университет ; Институт нефти и газа, 2021. 204 с.
  13. Халиуллин Ф. Х., Амиров А. М. Методика оценки экологических показателей ДВС мобильных машин при неустойчивых режимах работы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2011. Т. 6. № 4 (22). С. 102–104. ISSN 2073-0462.
  14. Самуэль Б. С. Метод определения скорости химических реакций в процессах нейтрализации отработавших газов // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 6. № 2–2. С. 266–270. ISSN 2074-0530.
  15. Жданок С. А., Васильев Г. М., Мигун А. Н. Теплофизические и кинетические процессы в системах снижения токсичности отработавших газов энергетических установок. Минск : Беларуская навука, 2014. 371 с.
  16. Goncharov A. A., Bondarenko E. V., Krasnoshtanov S. Yu. Theoretical aspects of diagnostics of car as mechatronic system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. Tomsk : Institute of Physics Publishing. 2018. Vol. 327.
  17. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Gorlatov S. E. Методологический подход к созданию многоуровневой адаптивной технологии диагностирования электронных систем автомобилей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10 (129). С. 163–168. ISSN 1814-6465.
  18. Методика диагностирования электронной системы управления двигателем / Е. В. Бондаренко, А. А. Гончаров, П. А. Гончаров, А. Н. Мельников // Автотранспортное предприятие. 2011. № 9. С. 43–45. ISSN 2076-3050.
  19. Использование положений теории распознавания образа при оценке технического состояния электронных систем управления двигателем / А. А. Гончаров, П. А. Гончаров, А. Н. Мельников, А. М. Федотов // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 2 (33). С. 11–18. ISSN 2073-7432.
  20. Мельников А. Н., Гончаров А. А., Федотов А. М. Метод диагностирования топливных форсунок аккумуляторных систем питания дизелей // Автомобильная промышленность. 2018. № 3. С. 34–36. ISSN 0005-2337.
  21. Развитие технических средств диагностирования тракторных ДВС по параметрам рабочих процессов / О. Ф. Савченко, В. В. Альт, С. Н. Ольшевский, И. П. Добролюбов // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 106–112. ISSN 2587-6864.
  22. Гребенников С. А., Гребенников А. С. Повышение точности диагностирования цилиндропоршневой группы ДВС динамическим методом // Грузовик. 2018. № 5. С. 2–9. ISSN 1684-1298.
  23. Концепция индивидуального управления техническим состоянием автомобилей в процессе эксплуатации / С. А. Гребенников, А. С. Гребенников, Ш. К. Гусенов [и др.] // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2018. № 1 (27). С. 103–108.
  24. Лившиц В. М., Косенко Д. Ю., Пятин С. П. Интеллектуализация средств диагностики как основа их совершенствования // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 123. С. 85–88. ISSN 2587-6864.
  25. Дмитриевский Е. В., Новиков Р. А., Обозов А. А. Оптимизация показателей двигателей внутреннего сгорания при электронном управлении // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 2 (75). С. 70–80. ISSN 1999-8775.
  12. Koval'skiy B. I., Sokol'nikov A. N., Vereshhagin V. I. [et al.]. Methods of monitoring and predicting indicators of thermal-oxidative stability of lubricating oils [Metody kontrolya i prognozirovaniya pokazateley termookislitel'noy stabil'nosti smazochnykh masel]. Krasnoyarsk : Siberian Federal University ; School of Petroleum and Natural Gas Engineering, 2021. 204 p.
  13. Khaliullin F. H., Amirov A. M. Evaluation methods of environmental ice performance of mobile machines at transient operation [Metodika otsenki ekologicheskikh pokazateley DVS mobil'nykh mashin pri neustanovivshikh rezhimakh raboty]. Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2011. Vol. 6. No. 4 (22). Pp. 102–104. ISSN 2073-0462.
  14. Samuel B. S. Method of chemical reactions rate detection in the processes of neutralization of exhaust gases [Metod opredeleniya skorosti khimicheskikh reaktsiy v protsessakh neytralizatsii otrabotavshikh gazov]. Izvestiya MG TU MAMI. 2012. Vol. 6. No. 2-2. Pp. 266–270. ISSN 2074-0530.
  15. Zhdanok S. A., Vasilyev G. M., Migun A. N. Thermophysical and kinetic processes in systems for reducing the toxicity of exhaust gases of power plants [Teplofizicheskie i kineticheskie protsessy v sistemakh snizheniya toksichnosti otrabotavshikh gazov energeticheskikh ustanovok]. Minsk : Belarusian science, 2014. 371 p.
  16. Goncharov A. A., Bondarenko E. V., Krasnoshtanov S. Yu. Theoretical aspects of diagnostics of car as mechatronic system. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. Tomsk : Institute of Physics Publishing. 2018. Vol. 327.
  17. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Gorlatov S. E. The methodological approach to creation of multilevel adaptive technology of diagnosing of electronic systems of cars [Metodologicheskii podkhod k sozdaniyu mnogourovnevoy adaptivnoy tekhnologii diagnostirovaniya elektronnykh sistem avtomobiley]. Vestnik of the Orenburg State University. 2011. No. 10 (129). Pp. 163–168. ISSN 1814-6465.
  18. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Goncharov P. A., Mel'nikov A. N. Method for diagnosing an electronic engine control system [Metodika diagnostirovaniya elektronnoy sistemy upravleniya dvigatelem]. Motor Company. 2011. No. 9. Pp. 43–45. ISSN 2076-3050.
  19. Goncharov A. A., Goncharov P. A., Mel'nikov A. N., Fedotov A. M. Use of the theory of recognition images in the assessment of technical condition electronic engine control systems [Ispol'zovanie polozheniy teorii raspoznavaniya obraza pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya elektronnykh sistem upravleniya dvigatelem]. World transport and technological machinery. 2011. No. 2 (33). Pp. 11–18. ISSN 2073-7432.
  20. Mel'nikov A. N., Goncharov A. A., Fedotov A. M. Method of diagnosing fuel nozzles of diesel battery power systems [Metod diagnostirovaniya toplivnykh forsunok akkumulyatornykh sistem pitaniya dizeley]. Avtoprom. 2018. No. 3. Pp. 34–36. ISSN 0005-2337.
  21. Savchenko O. F., Alt V. V., Olshevskiy S. N., Dobrolyubov I. P. Development of technical means of diagnosing tractor engine workflow settings [Razvitie tekhnicheskikh sredstv diagnostirovaniya traktornykh DVS po parametram rabochikh protsessov]. Works of GOSNITI. 2015. Vol. 118. Pp. 106–112. ISSN 2587-6864.
  22. Grebennikov S. A., Grebennikov A. S. Increasing the accuracy of the cylinder group's diagnosis LCUs a dynamic method [Povyshenie tochnosti diagnostirovaniya tsilindroporshnevoy gruppy DVS dinamicheskim metodom]. Truck. 2018. No. 5. Pp. 2–9. ISSN 1684-1298.
  23. Grebennikov S. A., Grebennikov A. S., Gusenov Sh. K. [et al.]. Concept of individual technical condition management of heavy vehicles in operation process [Kontseptsiya individual'nogo upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem avtomobiley v protsesse ekspluatatsii]. Technical Regulation in Transport Construction. 2018. No. 1 (27). Pp. 103–108.
  24. Livshits V. M., Kosenko D. Yu., Pyatin S. P. Intellectualization of diagnostic tools as a basis for their improvement [Intellektualizatsiya sredstv diagnostiki kak osnova ikh sovershenstvovaniya]. Works of GOSNITI. 2016. Vol. 123. Pp. 85–88. ISSN 2587-6864.
  25. Dmitrievskiy E. V., Novikov R. A., Obozov A. A. Optimization of internal combustion engines indices at electronic control [Optimizatsiya pokazateley dvigateley vnutrennego sgoraniya pri elektronnom upravlenii]. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2019. No. 2 (75). Pp. 70–80. ISSN 1999-8775.

Объем статьи 1,57 авторских листа

УДК 629.083

Андрей Сергеевич Гусельников, аспирант кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия,

Николай Степанович Захаров, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сервис автомобилей и технологических машин» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ АВТОМОБИЛЕЙ УРАЛ-4320

Andrey Sergeevich Guselnikov, postgraduate student, Automobile Transport Exploitation Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia,

Nikolay Stepanovich Zakharov, DSc in Engineering, Professor, Head of Car Service and Technological Machinery Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia

### The research of the influence of the exploitation conditions on the safety of the parts of the fuel system parts of Ural-4320 vehicle

#### Аннотация

На примере автомобилей Урал-4320 рассмотрено влияние сезонных условий на эксплуатационную надежность системы питания дизельных двигателей. Рассчитаны основные статистические характеристики распределений наработок на отказ элементов системы питания. Доказана значимость сезонных изменений параметра потока отказов этих элементов. Показано, что повысить эффективность эксплуатации автомобилей Урал-4320 возможно за счет сокращения времени простоев в зонах технического обслуживания и ремонта. Для этого предлагается корректировать количество запасных частей и расходных материалов, находящихся на складе, при помощи коэффициента, учитывающего сезонные условия эксплуатации автомобилей.

**Ключевые слова:** надежность, элементы системы питания, температура воздуха, закон Вейбулла, сезонные условия, корректирующий коэффициент

#### Abstract

The example of the Ural-4320 vehicle shows the influence of seasons conditions on the exploitation safety of the system of diesel engines feeding. The main statistical characteristics of the distribution of the operating time to the failures of the feeding system are calculated. The dependence of the season changes of the parameters of flow of these elements failures is proved. It is presented that it is possible to increase the effectiveness of the exploitation of the Ural-4320 vehicle can be achieved due to the downtime decrease in the areas of technical service. To achieve this, it is offered to correct the amount of the replacement parts and consumables in storage with the help of the coefficient accommodating the season conditions of the vehicles exploitation.

**Keywords:** safety, feeding system parts, air temperature, Weibull law, season conditions, correcting coefficient

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-83-89

#### ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационная надежность систем автомобиля зависит от большого числа внешних и внутренних факторов [1]. В частности, как установлено ранее выполненными исследованиями, температура воздуха оказывает существенное влияние на эксплуатационную надежность элементов системы питания, особенно при смене сезонов года, поскольку температура топлива имеет линейную связь с температурой окружающей среды [2, 3].

При отрицательных температурах воздуха увеличивается вязкость топлива, ухудшается его прокачиваемость по топливпроводам высокого и низкого давления, что приводит к повышению количества отказов элементов топливной аппаратуры. Это может вызвать потерю работоспособности таких элементов системы питания, как топливный насос высокого (ТНВД) и низкого давления (ТННД), топливные форсунки и распылители [4].

Кроме того, при низких температурах воздуха возможны отказы турбокомпрессора, так как вязкость масла, смазывающего его подшипниковый узел, увеличивается [5–7]. В связи с ухудшением подачи масла к турбокомпрессору узел испытывает масляное голодание, которое способно вызвать заклинивание ротора турбокомпрессора.

При повышении температуры воздуха снижается плотность и вязкость топлива. Это приводит к нарушению работы ТНВД и ТННД из-за увеличения количества топлива, перетекающего через зазоры в плунжерных парах [8], и, как следствие, к росту числа отказов топливных форсунок и распылителей [9].

В условиях высоких температур окружающей среды также будет повышаться количество отказов турбокомпрессора: из-за снижения вязкости подвод масла к трущимся деталям осуществляется не в полном объеме, что ведет к заклиниванию подшипникового узла [5].

Следует учитывать и сезонный характер работы подвижно-го состава, так как при резких перепадах температуры воздуха возможно обводнение топлива и попадание воды в топливный бак. Это вызывает коррозию на элементах топливной аппаратуры и преждевременную потерю их работоспособности [10].

Цель исследований, представленных в настоящей статье, состояла в установлении закономерностей влияния сезонных условий эксплуатации на параметр потока отказов элементов системы питания двигателей автомобилей Урал-4320.

Задачи исследования были определены так:

- установить фактические наработки на отказ элементов системы питания;
- установить фактические значения параметра потока отказов по месяцам;
- оценить значимость сезонных изменений параметра потока отказов системы питания;
- предложить методику практического использования полученных результатов исследований.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

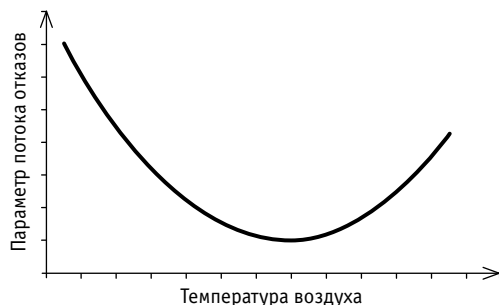
При разработке модели влияния сезонных условий эксплуатации на надежность элементов системы питания автомобильных дизельных двигателей необходимо учитывать температуру окружающего воздуха в разные сезоны года.

В исследовании предполагается, что при понижении температуры количество отказов элементов топливной аппаратуры будет увеличиваться в связи с изменением вязкости топлива и его парафинизацией. С повышением температуры окружающего воздуха число отказов тоже начнет расти, так как в результате минимальной вязкости топлива прецизионные пары будут вынуждены работать при сухом и полусухом трении.

Соответственно математическую модель влияния температуры окружающего воздуха  $t$  на параметр потока отказов  $\omega$  элементов системы питания автомобильных дизельных двигателей можно представить в следующем виде (рис. 1):

$$\omega = a_2 t^2 + a_1 t + a_0,$$

где  $a_0, a_1, a_2$  — эмпирические коэффициенты.



**Рис. 1.** Гипотеза о виде математической модели влияния температуры воздуха на параметр потока отказов элементов системы питания автомобильных дизельных двигателей

Для проверки сделанных предположений проведены экспериментальные исследования.

На первом этапе экспериментов дана оценка фактической надежности системы питания двигателей автомобилей Урал-4320. Гипотеза: наработки на отказ подчиняются закону Вейбулла и имеют существенную вариацию [1, 3].

На втором этапе средние значения потока отказов элементов системы питания по каждому месяцу сопоставлены со среднемесячной температурой окружающего воздуха, проверена адекватность предложенной модели, определены численные значения ее параметров. Гипотеза: поток отказов существенно зависит от температуры воздуха, которая изменяется по сезонам в течение года.

Завершающий этап — разработка методики практического использования полученных результатов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе исследованы статистические данные о наработках на отказ таких элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320, как турбокомпрессор, ТНВД, ТННД, топливная форсунка, распылитель форсунки, топливный бак. Для оценки фактической надежности элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320 рассчитаны основные статистические характеристики (табл. 1).

Как видно из данных табл. 1, эмпирический закон распределения во всех рассмотренных случаях соответствует закону Вейбулла (согласно критерию Пирсона, вероятности соответствия закону превышают 0,95).

Графики распределения наработок на отказ исследуемых элементов системы питания автомобилей Урал-4320 представлены на рис. 2.

Для проверки значимости сезонного изменения параметра потока отказов элементов топливной аппаратуры в течение года использовались гармонические модели. Влияние сезонных условий считалось значимым, если этот параметр имел статистически значимую корреляционную связь с линеаризованной первой гармоникой, которая имеет период колебаний один год [3]. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Исследования показали, что у всех элементов системы питания расчетное значение  $t$ -статистики Стьюдента для коэффициента корреляции первой гармоники превышает табличное значение с вероятностью более 0,95. Линеаризованные первые гармоники представлены на рис. 3.

Графики изменения потока отказов элементов системы питания двигателей автомобилей Урал-4320 в течение года представлены на рис. 4.

Таким образом, сделан вывод, что первая гармоника с периодом колебаний в один год статистически значима, следовательно, сезонные изменения являются существенными. Очевидно, что причина сезонных колебаний связана с изменением температуры воздуха.

Таблица 1

Основные статистические характеристики распределений наработок на отказ элементов системы питания двигателей автомобилей Урал-4320

Параметры	Элементы системы питания					
	Турбокомпрессор	Распылитель форсунки	ТНВД	ТННД	Топливная форсунка	Топливный бак
Закон распределения	Закон Вейбулла	Закон Вейбулла	Закон Вейбулла	Закон Вейбулла	Закон Вейбулла	Закон Вейбулла
Объем выборки	247	2457	1135	675	386	504
Наработка на отказ, минимальное/максимальное значение, тыс. км	2,94/619,52	2,04/923,58	2,20/914,16	2,75/886,43	2,39/684,04	4,15/729,06
Выборочное среднее, тыс. км	165,31	194,74	194,71	204,65	167,59	222,12
Среднее квадратическое отклонение среднего	6,74	2,76	3,89	5,02	6,24	5,52
Дисперсия	11208,06	18752,43	17186,54	17026,90	15035,79	15341,11
Среднее квадратическое отклонение	105,87	136,94	131,10	130,49	122,62	123,86
Коэффициент вариации	0,64	0,70	0,67	0,64	0,73	0,56
Коэффициент асимметрии	0,88	1,09	1,33	1,03	1,17	0,99
Коэффициент эксцесса	1,05	1,51	2,58	1,30	1,51	0,84
Статистика Пирсона:						
нормальный закон	5,12	12,78	39,69	19,28	6,57	2,78
логнормальный закон	5,31	1,49	0,78	1,66	2,01	2,33
закон Вейбулла	0,54	0,08	0,31	0,20	0,23	0,53
TR-закон	6723,47	8276,77	8295,37	8182,70	7499,73	8315,77
Вероятность непротиворечия закону распределения	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Параметры закона Вейбулла:						
$\alpha$	1,62	1,47	1,54	1,63	1,41	1,89
$\beta$	4812,89	2662,76	3911,87	7087,88	1533,58	33462,75

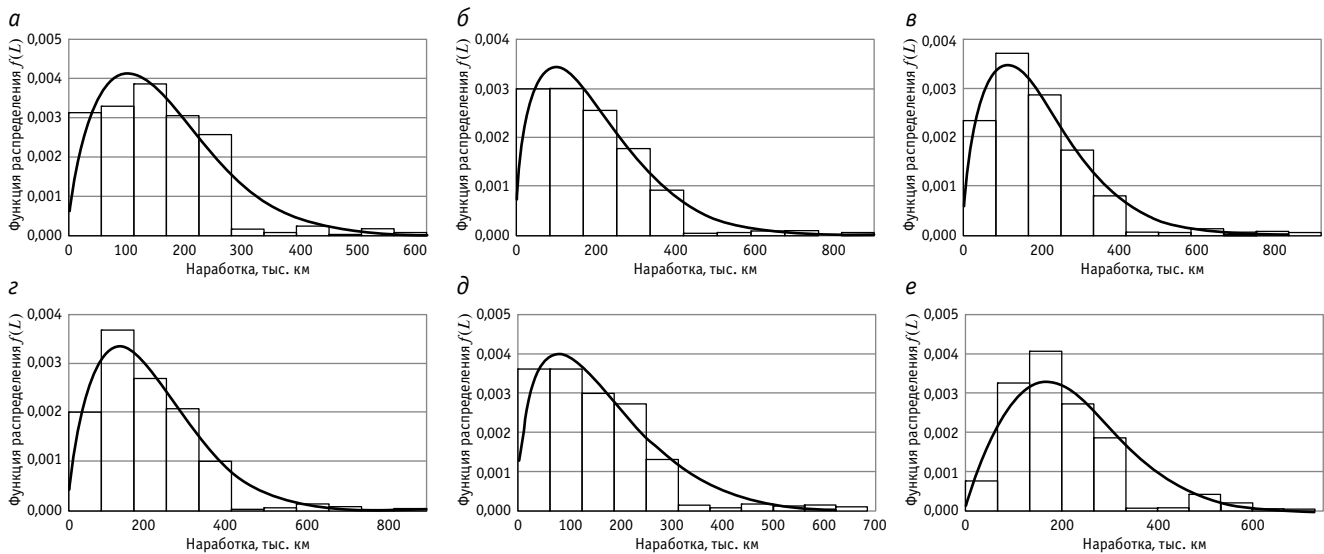


Рис. 2. Распределение наработок на отказ элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320: а — турбокомпрессор; б — распылитель форсунки; в — ТНВД; г — ТННД; д — топливная форсунка; е — топливный бак

Таблица 2

Статистические характеристики линейной модели первой гармоники параметра потока отказов элементов системы питания автомобилей Урал-4320

Элемент	Полуамплитуда колебания $Q_k$	Начальная фаза $T_f$ , мес.	Коэффициент детерминации $r^2$	Коэффициент корреляции $r$	Статистика Стьюдента $t_r$	Табличное значение $t$ -статистики Стьюдента $t_{0,95}$
Турбокомпрессор	0,41	1,11	0,6054	0,7781	3,91	2,23
ТНВД	0,28	0,93	0,5935	0,7704	3,82	2,23
ТННД	0,24	0,91	0,4137	0,6432	2,65	2,23
Распылитель форсунки	0,12	0,79	0,5916	0,7692	3,80	2,23
Топливная форсунка	0,18	1,54	0,4201	0,6482	2,69	2,23
Топливный бак	0,44	0,95	0,5066	0,7118	3,20	2,23

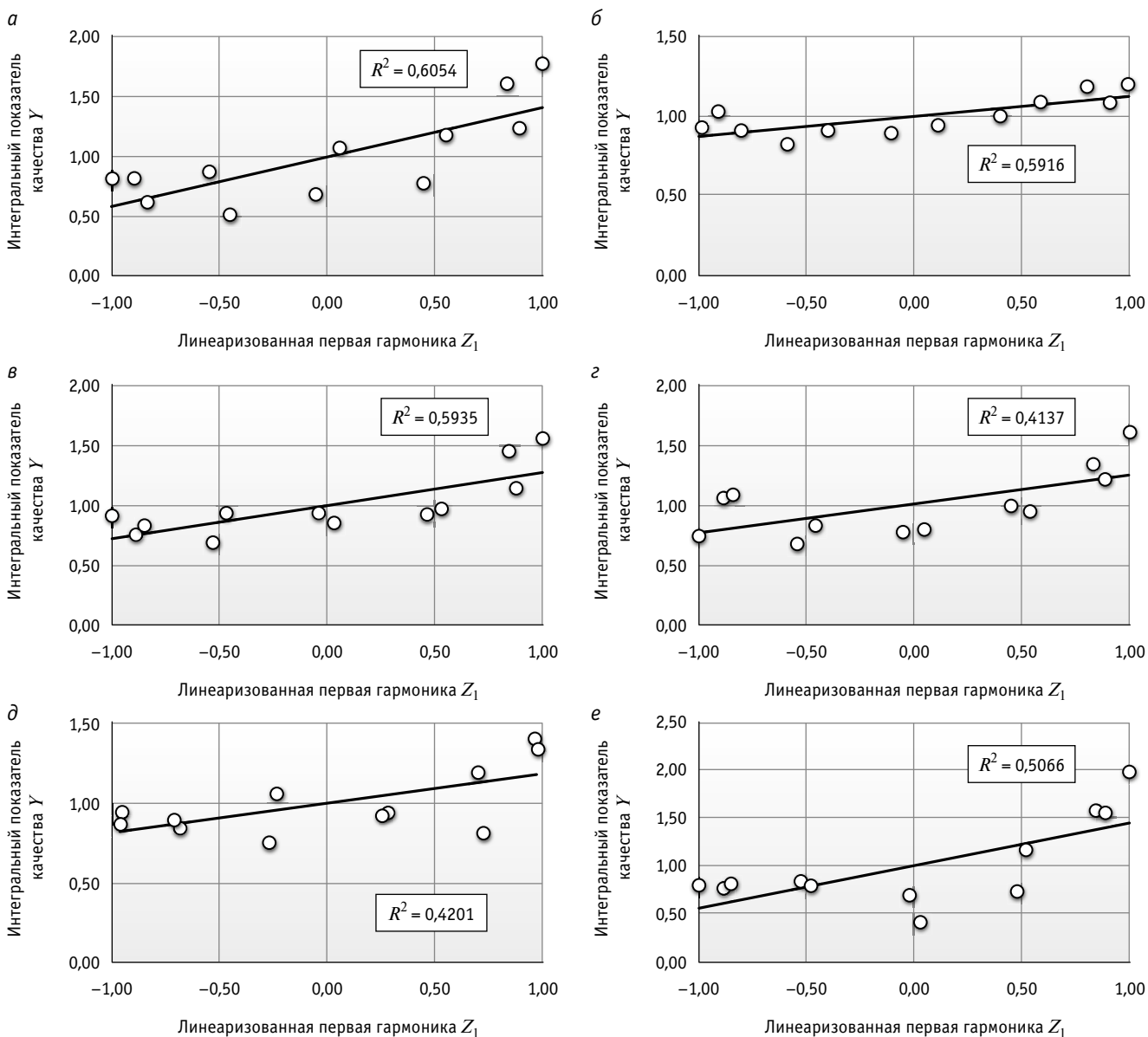
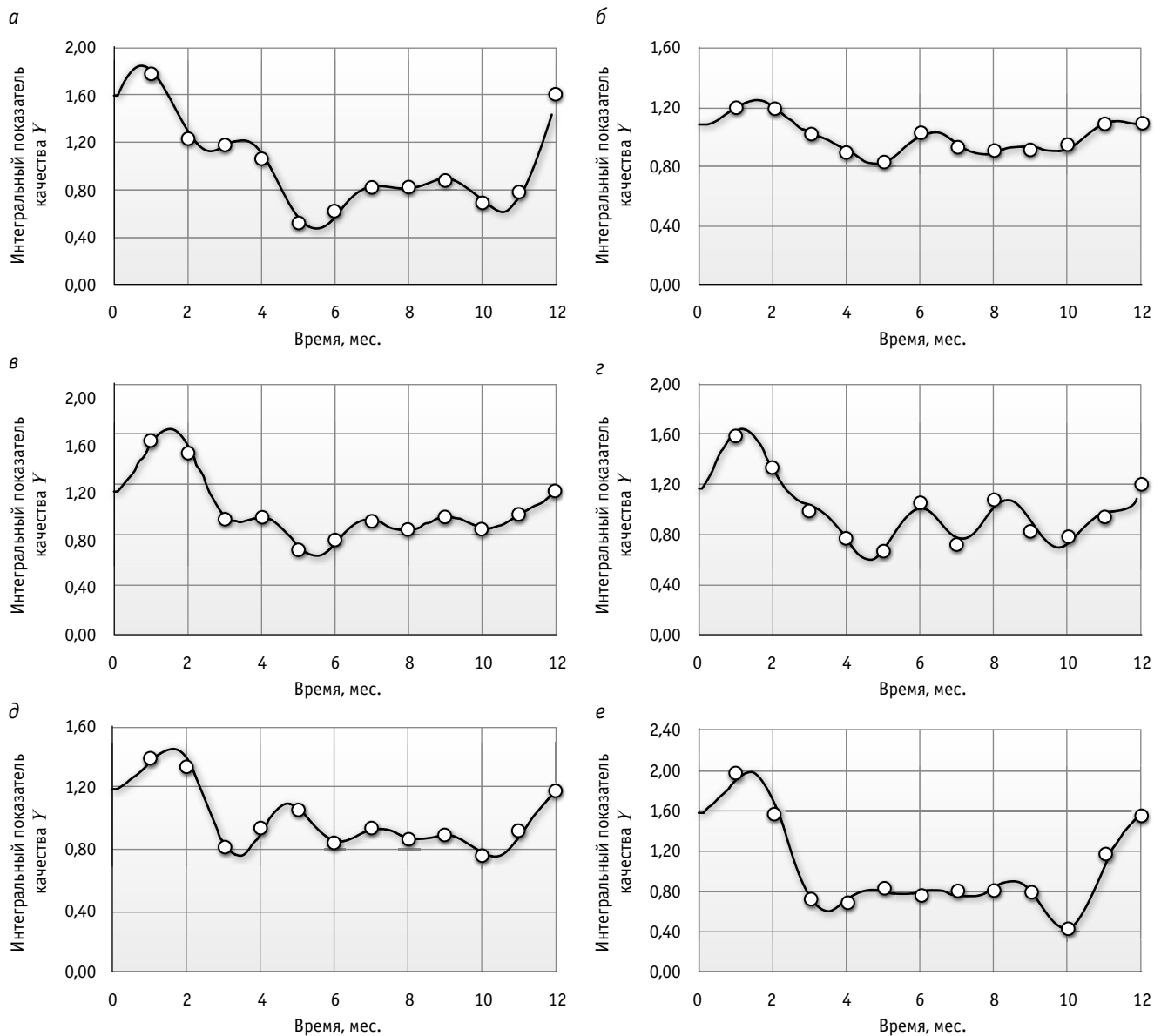


Рис. 3. Линеаризованные первые гармоники модели изменения потока отказов элементов автомобилей Урал-4320 в течение года: а — турбокомпрессор; б — распылитель форсунки; в — ТНВД; г — ТННД; д — топливная форсунка; е — топливный бак



**Рис. 4. Изменение потока отказов элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320 в течение года:**  
 а — турбокомпрессор; б — распылитель форсунки; в — ТНВД; г — ТННД; д — топливная форсунка; е — топливный бак

Далее было установлено влияние температуры окружающего воздуха на поток отказов элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320, что иллюстрируют графики на рис. 5.

Проверка по критерию Фишера показала, что для всех рассмотренных элементов системы питания закономерность влияния температуры воздуха на поток отказов с вероятностью не ниже 0,95 адекватно описывается квадратичными моделями.

На основании результатов, полученных в процессе исследований, предложено учитывать сезонные условия при планировании потребности в запасных частях и расходных материалах топливной аппаратуры, что позволит не только существенно сократить время простоя автомобилей Урал-4320 в зонах технического обслуживания и ремонта, но и повысить надежность их эксплуатации.

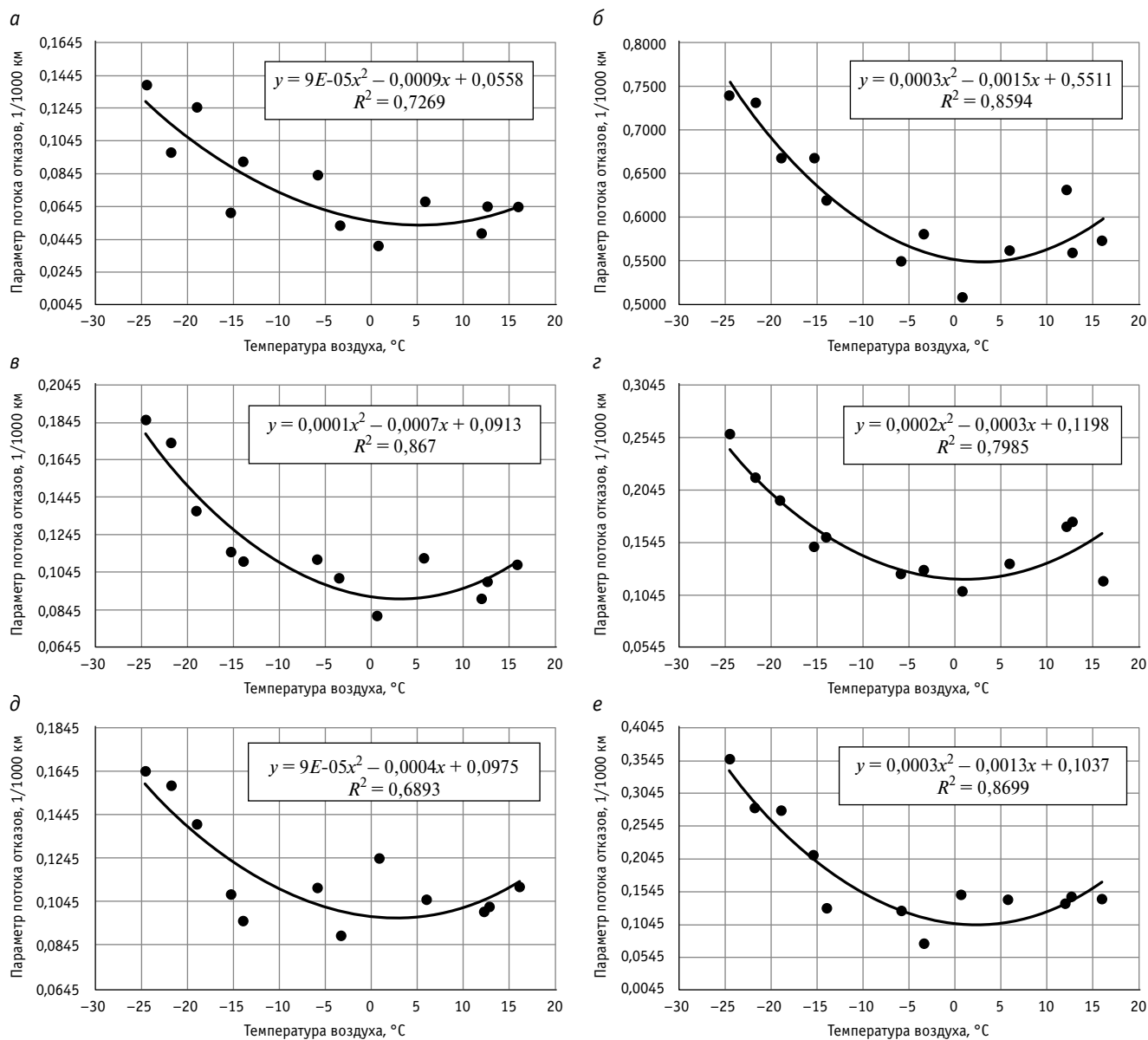
Для этого предлагается ввести коэффициент, при помощи которого учитываются сезонные условия эксплуатации автомобилей для планирования необходимого количества запасных частей в каждом месяце [6]:

$$K = 12 \cdot \frac{n_i(t)}{\sum_{j=1}^{12} n_j(t)},$$

где  $n_i, n_j$  — интенсивности расходования ресурса, рассчитанные по полученным математическим моделям в зависимости от температуры воздуха для  $i$ -го или  $j$ -го месяца.

Значения корректирующего коэффициента с учетом среднемесячной температуры воздуха приведены в табл. 3 [6].





**Рис. 5. Влияние температуры воздуха на поток отказов элементов системы питания автомобилей Урал-4320:**  
 а — турбокомпрессор; б — распылитель форсунки; в — ТНВД; г — ТННД; д — топливная форсунка; е — топливный бак

Таблица 3

Корректирующий коэффициент для планирования необходимого количества запасных частей элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320

Месяц	Значение корректирующего коэффициента
Январь	1,25
Февраль	1,25
Март	1,04
Апрель	0,95
Май	0,81
Июнь	0,76

Месяц	Значение корректирующего коэффициента
Июль	0,72
Август	0,76
Сентябрь	0,81
Октябрь	0,95
Ноябрь	1,14
Декабрь	1,25

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определены основные статистические характеристики распределений наработок на отказ элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320. Показано, что эмпирические распределения подчиняются закону Вейбулла.

2. Доказана значимость сезонных изменений потока отказов элементов системы питания автомобилей Урал-4320.

3. В ходе эксперимента подтверждена гипотеза о виде математических моделей влияния температуры воздуха на поток отказов элементов топливной аппаратуры.

4. Показано, что повысить эффективность эксплуатации автомобилей

Урал-4320 можно при техническом обслуживании и ремонте — за счет сокращения времени простоев в ожидании запасных частей и расходных материалов. Для планирования необходимого количества запасных частей предложено использовать корректирующий коэффициент, учитывающий сезонные условия эксплуатации автомобилей.

## Литература

1. Гусельников А. С., Захаров Н. С. Влияние сезонных условий на параметр потока отказов элементов системы питания двигателей автомобилей КАМАЗ-43118 // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 2. С. 111–120. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-111. ISSN 2077–7175.
2. Захаров Н. С., Абакумов Г. В., Ракитин А. Н. Взаимосвязь между климатическими факторами // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 1. С. 26–29. ISSN 2079-5920.
3. Захаров Н. С. Моделирование процессов изменения качества автомобилей : монография. Тюмень : ТюмГНГУ, 1999. 127 с.
4. Петровский Д. И., Ралко А. Д. Анализ технического состояния топливной аппаратуры дизелей сельскохозяйственных машин. Воронеж : ВГАУ, 2017. С. 141–146.
5. Бурцев А. Ю. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров двигателей внутреннего сгорания // Достижения науки — агропромышленному производству : материалы LII международной научно-технической конференции. Челябинск : ЧГАА, 2013. С. 28–34.
6. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров ТКР-7Н / А. С. Денисов, А. Ф. Малаховецкий, А. Т. Кулаков [и др.] // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 1 (2). С. 69–76. ISSN 1999-8341.
7. Результаты исследования влияния условий функционирования турбокомпрессора на его работоспособность / А. Р. Галимов, И. Г. Галиев, Б. Г. Зиганшин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 2 (62). С. 70–74. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-70-74. ISSN 2073-0462.
8. Исследование изнашивания прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры / А. В. Новичков, Е. В. Новиков, Е. Г. Рылякин [и др.] // Международный научный журнал. 2014. № 3. С. 108–111. ISSN 1995-4638.
9. Исследование причин выхода из строя топливных форсунок современных автомобилей / А. Ю. Малахов, П. А. Юрин, Т. Е. Лихачева [и др.] // Вестник МАДИ. 2017. № 4 (51). С. 38–47. ISSN 2079-1364.
10. Каримходжаев Н., Сайдалиев И. Н. Влияние обводненности топлива на надежность работы топливной аппаратуры // Universum : технические науки. 2022. № 12–3 (105). С. 40–42. ISSN 2311-5122.

## References

1. Guselnikov A. S., Zakharov N. S. Influence of seasonal conditions on the failure rate parameter of elements of the KAMAZ-43118 engine power supply system [Vliyaniye sezonnykh usloviy na parametr potoka otkazov elementov sistemy pitaniya dvigateley avtomobiley KAMAZ-43118]. Intellect. Innovations. Investments. 2023. No.2. Pp. 111–120. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-111. ISSN 2077-7175.
2. Zakharov N. S., Abakumov G. V., Rakitin A. N. Climatic factors correlation [Vzaimosvyaz' mezhdu klimaticheskimi faktorami]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2014. No. 1. Pp. 26–29. ISSN 2079-5920.
3. Zakharov N. S. Modeling the processes of changing the quality of cars [Modelirovaniye protsessov izmeneniya kachestva avtomobiley] : monograph. Tyumen : TSGU, 1999. 127 p.
4. Petrovskiy D. I., Ralko A. D. The analyses of technical condition of diesels fuel system of agricultural motor vehicles [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya toplivnoy apparatury dizeley sel'skokhozyaystvennykh mashin]. Voronezh : VSAU, 2017. Pp. 141–146.
5. Burtsev A. Yu. The increase of the exploitation safety of turbochargers of internal combustion engines [Povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti turbokompressorov dvigateley vnutrennego sgoraniya]. Science achievements — to agricultural production. Materials of LII international scientific-technical conference. Chelyabinsk, 2013. Pp. 28–34.
6. Denisov A. S., Malakhovetskiy A. F., Kulakov A. T. [et al.]. The improvement of the exploitation reliability of the TKR-7N turbo-compressors [Povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti turbokompressorov TKR-7N]. Herald of SSTU. 2004. No. 1 (2). Pp. 69–76. ISSN 1999-8341.
7. Galimov A. R., Galiev I. G., Ziganshin B. G. [et al.]. The results of the study of the influence of the operating conditions of the turbocharger on its performance [Rezultaty issledovaniya vliyaniya usloviy funktsionirovaniya turbokompressora na ego rabotosposobnost']. Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2021. Vol. 16. No. 2 (62). Pp. 70–74. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-70-74. ISSN 2073-0462.
8. Novichkov A. V., Novikov E. V., Rilyakin E. G. [et al.]. Research of wear of precision details of the diesel fuel equipment [Issledovanie iznashivaniya pretsionnykh detaley dizel'noy toplivnoy apparatury]. International Science journal. 2014. No. 3. Pp. 108–111. ISSN 1995-4638.
9. Malakhov A. Yu., Yurin P. A., Likhacheva T. E. [et al.]. Research of the causes of failure of fuel injectors in modern automobile [Issledovanie prichin vykhoda iz stroya toplivnykh forsunok sovremennykh avtomobiley]. Vestnik MADI. 2017. No. 4 (51). Pp. 38–47. ISSN 2079-1364.
10. Karimkhodzhaev N., Saydaliev I. N. Influence of fuel watering on reliability of operation of fuel equipment [Vliyaniye obvodnennosti topliva na nadezhnost' raboty toplivnoy apparatury]. Universum: engineering sciences. 2022. No. 12-3 (105). Pp. 40–42. ISSN 2311-5122.

Объем статьи 0,8 авторских листа

УДК 656.11

**Дмитрий Александрович Захаров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобильного транспорта» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия,**  
**Анатолий Викторович Писцов, заведующий лабораторией Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия**

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ АКТИВНОГО ПРИОРИТЕТА АВТОБУСАМ ПРИ ПРОЕЗДЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ**

**Dmitriy Alexandrovich Zakharov, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Automobile Transport Exploitation Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia,**  
**Anatoliy Viktorovich Pistsov, Head of laboratory, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia**

### **Analysis of the effectiveness of active priority methods for buses when passing through controlled intersections**

#### **Аннотация**

Предложены математические модели зависимости среднего времени в пути на транспорте общего пользования и времени в пути всех участников движения от интенсивности движения автобусов, что позволяет оценить эффективность способов активного приоритета автобусам при проезде перекрестков.

Рассмотрены два варианта приоритета автобусам: продление основного такта (Green Extension) и специальная фаза (Stage Skipping), разработан комбинированный алгоритм, учитывающий оба варианта. Эффект от использования способов активного приоритета определен с помощью транспортной микромодели. Для объективной оценки методов активного приоритета учтены не только эффективность работы транспортных средств, но и среднее количество пассажиров в индивидуальном и общественном транспорте.

**Ключевые слова:** транспорт общего пользования, регулируемый перекресток, транспортная микромодель, автобусы, способы активного приоритета

#### **Abstract**

Mathematical models of the dependence of the average travel time on public transport and the travel time of all traffic participants on the intensity of bus traffic are proposed, which allows to evaluate the effectiveness of using methods of active priority for buses when passing intersections.

Two options for bus priority are considered: extension of the main tact (Green Extension) and a special phase (Stage Skipping), a combined algorithm has been developed that takes into account both options. The effect of using active priority methods is determined by using a transport micromodel. For an objective assessment of active priority methods, not only the operating efficiency of vehicles is taken into account, but also the average number of passengers in individual and public transport.

**Keywords:** public transport, controlled intersection, transport micromodel, buses, active priority methods

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-90-95

**В** последние годы в городах России реализуются проекты комплексного развития территорий, в том числе мероприятия по созданию приоритета движению транспорта общего пользования (ТОП) [1, 2] и по снижению доли поездок на личных автомобилях.

Одним из перспективных направлений является приоритет движению наземного городского транспорта при проезде перекрестков, что обеспечивается за счет адаптивного управления светофорами. Подобные технологии внедряются, например, на обособленных трамвайных маршрутах. С учетом большого парка автобусов и троллейбусов, работающих на городских маршрутах, а также количества городов, не имеющих внеуличного электротранспорта, использование такой технологии для наземного городского транспорта, движущегося по автомобильным дорогам общего пользования, представляется актуальным. Кроме того, необходимость приоритета ТОП тесно связана с желанием населения сократить время поездок на общественном транспорте [3].

По мнению М. Р. Якимова [4], задача организации движения общественного транспорта сводится к формированию эффективной маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования и оптимального с точки зрения транспортных потребностей расписания движения подвижного состава.

В статье [5] показано, что задержки на светофорах для проанализированного троллейбусного маршрута в межпиковый период составляют 26 % от общего времени движения, а в часы пик увеличиваются до 56 %. Такие потери времени существенно снижают технико-эксплуатационные показатели и эффективность работы подвижного состава на маршруте. Авторы статьи отмечают, что для увеличения реальной скорости перемещения жителей необходимо создавать обособленные полосы для пассажирского транспорта и организовывать на регулируемых перекрестках приоритетные условия движению общественного транспорта.

При отклонении от графика движения автобусов на маршруте в утренний и вечерний часы пик проводится корректировка среднесуточной скорости для построения объективного и точного расписания движения. Например, в работе [6] значение поправочного коэффициента среднесуточной скорости движения автобусов в Оренбурге для утреннего периода определено 0,9, для вечернего — 0,95.

Активный приоритет автобусам при проезде регулируемых перекрестков позволяет влиять на скорость сообщения, а следовательно, на интервалы движения автобусов и на расписание.

Сегодня в российских городах развиваются интеллектуальные транспортные системы [7], в том числе автоматизированные системы управления дорожным движением (АСУДД) [8], что создает условия для внедрения активного приоритета ТОП в ближайшей перспективе. Актуальность исследований эффективности методов активного приоритета дополняется относительно небольшими финансовыми затратами, в отличие от вариантов строительства дополнительных полос для маршрутных транспортных средств (ПМТС) при реконструкции автомобильных дорог и увеличения количества полос движения. Кроме того, по сравнению с вариантом создания ПМТС при использовании методов активного приоритета маловероятен риск социального напряжения из-за недовольства автовладельцев, вызванного ограничением движения легковых автомобилей [9].

Эффективность внедрения активного приоритета автобусам при проезде перекрестков определяется стохастичностью транспортного потока, т.е. неравномерностью интенсивности движения во времени [10].

Технологии активного приоритета (приоритет транзитного сигнала, или TSP) ТОП при проезде перекрестков активно изучаются зарубежными учеными. Например, в работах [11, 12] отмечается увеличение времени задержки транспортных средств (ТС), движущихся по второстепенным направлениям, при использовании на основном направлении технологий TSP для общественного транспорта. В работе [13] показано, что безусловный приоритет трамваям при проезде перекрестков приводит к потере времени для всех участников движения, а использование условного приоритета позволяет снизить время задержки ТС.

Технологии TSP применяют в сочетании с обособленной полосой для общественного транспорта, т.е. комбинируется активный и пассивный приоритет маршрутному транспорту. В работе [14] рассматривается введение дополнительного сигнала светофора (предсигнала) на выделенной полосе. В исследовании, помимо интенсивности движения автомобилей и автобусов, учитывается количество пассажиров в общественном транспорте. В работе [15] изучается технология tandem design для приоритета автобусам, движущимся на подходах к перекрестку не только по направлениям, но и по отдельной полосе с левым поворотом.

Авторы статьи [16] выделяют три наиболее распространенных способа приоритета общественному транспорту при проезде перекрестков.

1. Green Extension. Применяется при условии, если движущемуся автобусу не хватает нескольких секунд для пересечения стоп-линии на разрешающий сигнал светофора. В этом

случае фаза продлевается на время, необходимое для проезда автобуса через перекресток.

2. Stage Recall. Применяется, если перед перекрестком при запрещающем сигнале светофора накапливается несколько автобусов. В такой ситуации, чтобы снизить потери времени пассажиров автобуса, разрешающий сигнал включается раньше.

3. Stage Skipping. Применяется в условиях, аналогичных второму способу. Основывается на изменении порядка фаз цикла светофорного регулирования и введении дополнительной фазы для начала движения автобусов по мере накопления перед перекрестком.

Для оценки эффективности применяемых алгоритмов приоритета движения общественному транспорту без сложных экспериментов над участниками дорожного движения в реальных условиях используется имитационное моделирование [17].

Целью исследования, представленного в настоящей статье, является установление зависимости времени в пути и времени задержки автобусов от интенсивности движения транспорта общего пользования при реализации активного приоритета автобусам на перекрестках.

В исследовании рассматривается гипотеза о различной эффективности способов приоритета автобусам при проезде регулируемых перекрестков в зависимости от изменения интенсивности движения индивидуального и общественного транспорта.

С учетом увеличения числа перестроений и остановок, неравномерности скорости и состава транспортного потока при повышении интенсивности движения автобусов выдвигается следующая гипотеза: среднее время автобусов в пути и общее время в пути всех участников движения в зависимости от интенсивности движения автобусов описывается экспоненциальной моделью:

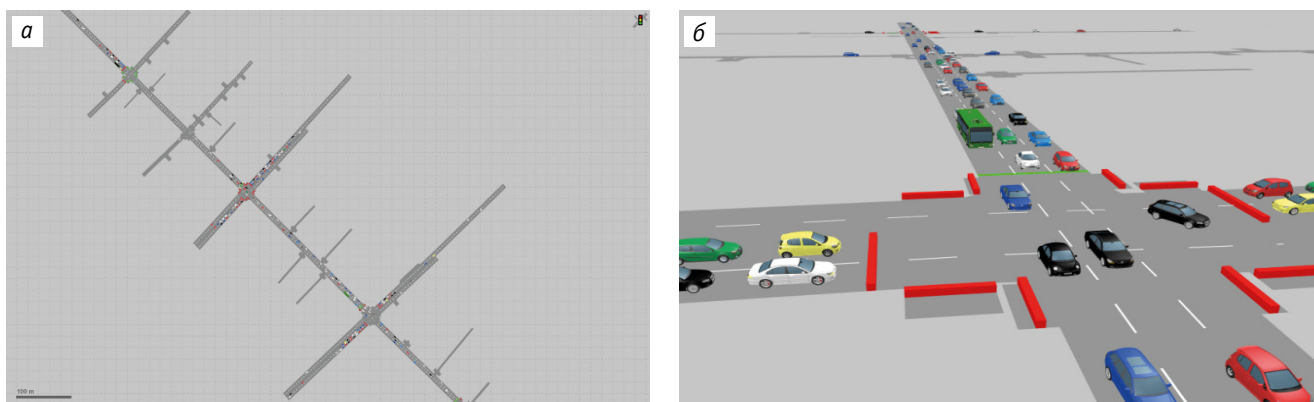
$$t_{\text{ТОП}} = a \cdot e^{b \cdot N_{\text{ТОП}}}; \quad (1)$$

$$T = a \cdot N_{\text{ТОП}}^b, \quad (2)$$

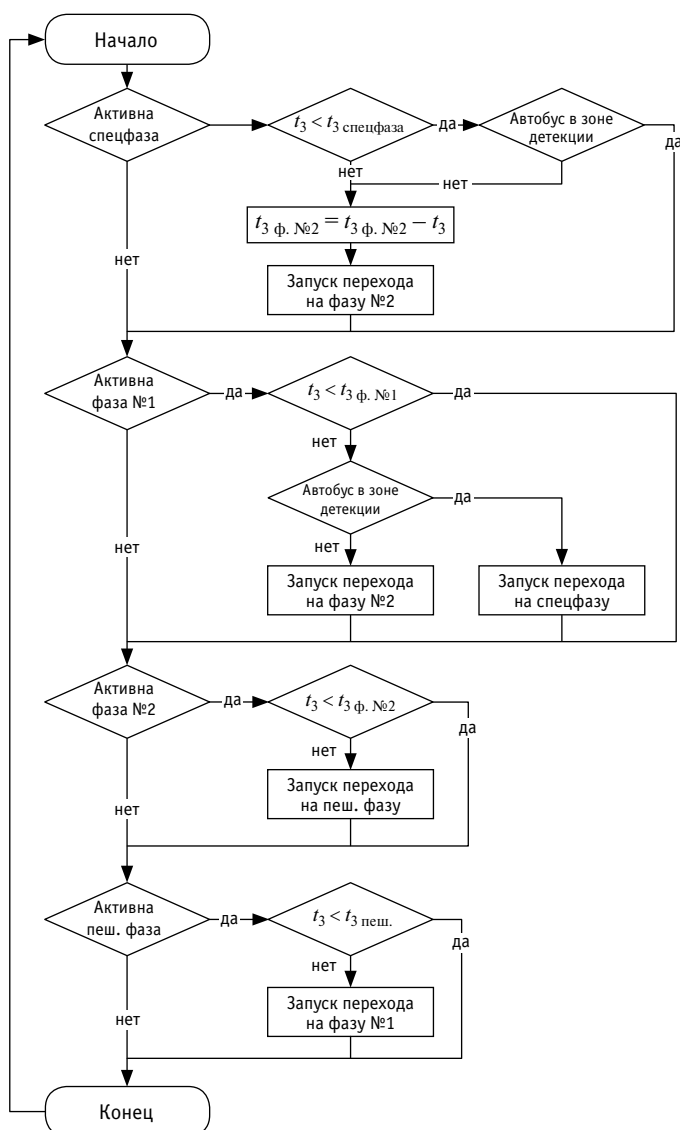
где  $t_{\text{ТОП}}$  — среднее время в пути на транспорте общего пользования, с;  $N_{\text{ТОП}}$  — интенсивность движения автобусов, ТС/ч;  $T$  — общее время в пути всех участников движения на индивидуальном и общественном транспорте по имитационной модели, ч.

Исследование и оценка параметров транспортного потока при реализации способов TSP проводились с использованием имитационной модели в программе PTV Vissim. При этом учитывались следующие фактические данные на участке улично-дорожной сети в границах объекта моделирования:

- интенсивность движения ТС;
- состав транспортного потока по типам ТС (грузовые, легковые, автобусы);
- желаемая и максимальная скорость движения транспортных потоков;
- режимы работы светофорных объектов и пофазные схемы разъезда ТС;
- геометрические параметры перекрестка и схемы организации дорожного движения.



**Рис. 1. Имитационная модель дорожного движения:**  
а — общий вид модели; б — регулируемый перекресток



**Рис. 2. Алгоритм реализации приоритета автобусам при проезде перекрестков (способ продления основного такта)**

При создании имитационной модели движения транспортных потоков в программе PTV Vissim применялись базовые параметры программного обеспечения:

- максимальное ограничение скорости — 60 км/ч;
- максимальное замедление — 4 м/с<sup>2</sup>;
- рабочее (приемлемое) замедление — 1 м/с<sup>2</sup>;
- средняя дистанция между ТС при остановке — 2 м;
- минимальная боковая дистанция при движении — 1 м;
- модель следования автомобиля за лидером — Wiedemann 74 (модель движения в городе).

Имитационная модель (рис. 1) соответствует реальному дорожному городскому объекту и включает участок улицы протяженностью 2 км с односторонним движением ТС по трем полосам. На моделируемом участке расположены три светофорных устройства.

Выбор объекта моделирования обусловлен высокой интенсивностью движения не только в утреннее и вечернее время, но и в межпиковый период. Здесь проходят 16 маршрутов общественного транспорта, в утренние часы пик интенсивности движения достигает 86 ТС/ч. Фактический уровень загрузки автомобильной дороги на перегонах составляет 0,8, а на подходах к регулируемым перекресткам по основному направлению движения ТС транспортный спрос превышает пропускную способность в 1,2 раза.

Алгоритмы реализации приоритета автобусам при проезде регулируемых перекрестков (рис. 2) создавались в программе Lisa+ и импортировались в имитационную транспортную модель.

Поскольку схемы организации дорожного движения на перекрестках с небольшим количеством конфликтных точек относительно простые, то моделирование выполнялось для трех следующих вариантов TSP: продление основного такта (Green Extension), дополнительная фаза (Stage Skipping) и комбинированный алгоритм.

В базовом варианте длительность светофорного цикла на регулируемых перекрестках составляет 130 с, фазовый коэффициент по основному направлению — 0,37. Влияние интенсивности движения автобусов на время в пути и на время задержки для базового варианта и при введении трех способов TSP показано на рис. 3 и 4. Как видно,

все варианты активного приоритета позволяют снизить время в пути и время задержки. Так, при интенсивности движения 60 авт./ч и выше наибольший эффект достигается в варианте дополнительной фазы (Stage Skipping). При интенсивности движения от 40 до 60 авт./ч наименьшие задержки соответствуют способу Green Extension.

Комбинированный способ позволяет снизить задержки при интенсивности движения автобусов до 90 ТС/ч. При дальнейшем увеличении интенсивности движения наибольший эффект достигается за счет введения дополнительной фазы.

Приоритет автобусам влияет на соотношение времени их задержки при проезде перекрестков и общего времени в пути. Снижение доли потерь времени ТОП повышает эффективность пассажирских перевозок. При интенсивности движения автобусов до 90 ТС/ч наименьшая доля потерь времени (с 0,45 до 0,4) достигается при работе TSP на основе комбинированного алгоритма. С ростом интенсивности движения автобусов свыше 90 ТС/ч наибольшее снижение доли потерь времени ТОП (до 0,38) достигается при использовании алгоритма, основанного на применении специальной фазы в светофорном цикле (рис. 5).

Создание приоритета автобусам на основном направлении в алгоритме управления светофором достигается за счет снижения фазового коэффициента для транспортного потока на второстепенном направлении. Поэтому для транспортного потока на второстепенном направлении наблюдается обратная зависимость, и при внедрении комбинированного алгоритма или метода специальной фазы отмечаются наибольшие потери времени для индивидуальных автомобилей (рис. 6). Очень важно, что при использовании метода Green Extension дополнительные потери времени по сравнению с базовым вариантом минимальны.

Сравнение эффективности способов приоритета по параметрам работы транспортных средств является недостаточным, так как объем перевозок пассажиров ТОП в пространстве и во времени, т.е. на маршруте и в течение дня, изменяется значительно.

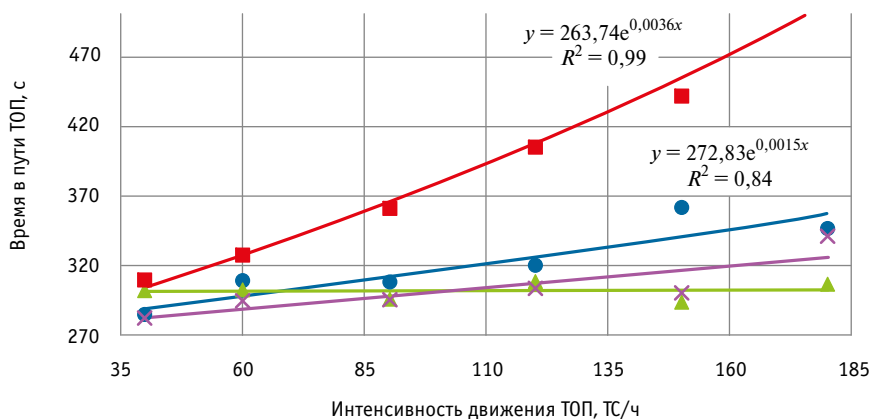


Рис. 3. Влияние интенсивности движения автобусов на время ТОП в пути:

- — продление основного такта; ■ — базовый вариант;
- ▲ — специальная фаза; ✕ — комбинированный алгоритм

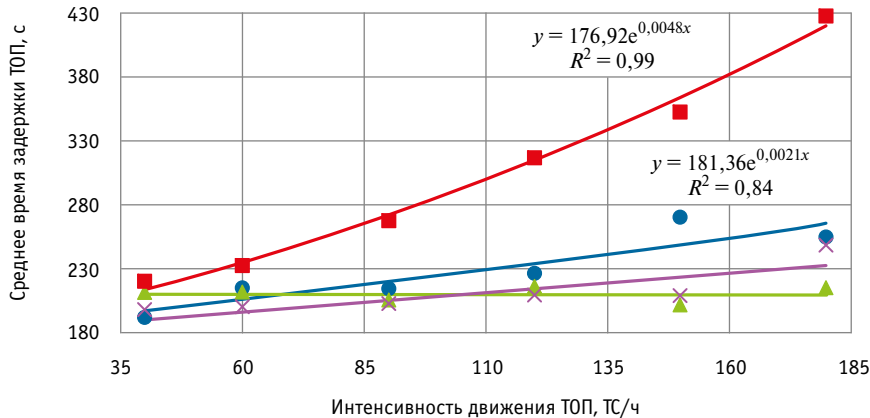


Рис. 4. Среднее время задержки ТОП в целом по модели:

- — продление основного такта; ■ — базовый вариант;
- ▲ — специальная фаза; ✕ — комбинированный алгоритм

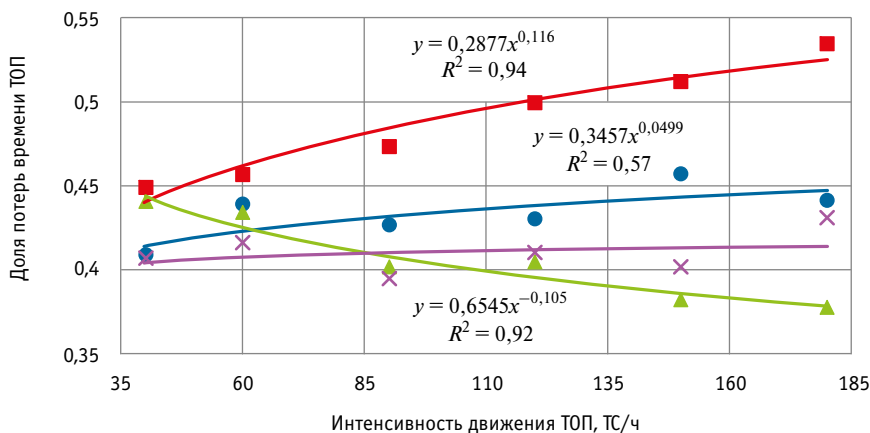


Рис. 5. Влияние интенсивности движения автобусов на долю потерь времени ТОП в общем времени в пути:

- — продление основного такта; ■ — базовый вариант;
- ▲ — специальная фаза; ✕ — комбинированный алгоритм

Если для индивидуальных автомобилей число людей в ТС находится в диапазоне 1,3–1,4, то количество пассажиров в ТОП изменяется в гораздо большем диапазоне. С учетом среднего числа пассажиров в ТС (1,4 чел. в ИТ и 40 чел. в ТОП) построены графики зависимости общего времени задержки всех участников движения от интенсивности движения ТОП (рис. 7).

При невысокой интенсивности движения ТОП, а следовательно, небольшом количестве пассажиров в ТОП использование методов TSP в целом не дает эффекта. При движении на рассматриваемом участке 80 автобусов в час пик применение способа Green Extension позволяет получить наибольший эффект. Это достигается за счет меньших потерь времени для ИТ, движущегося на второстепенных направлениях. С ростом наполняемости автобусов пассажирами эффективность методов TSP повышается.

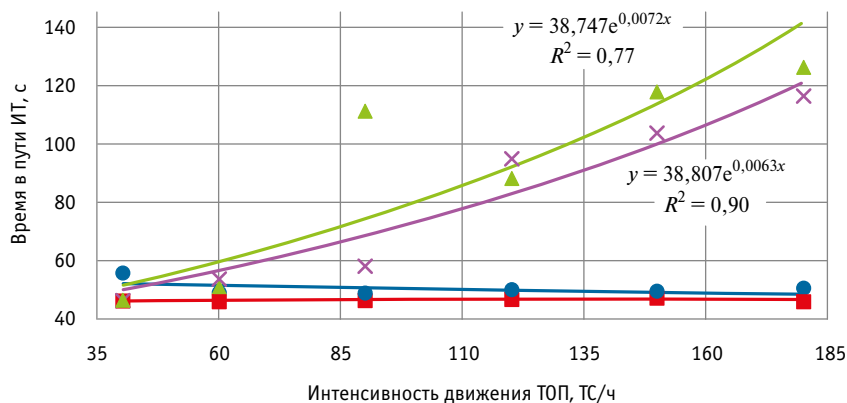
В заключение необходимо отметить, что предложенная математическая модель времени задержки и времени в пути с учетом интенсивности движения автобусов дает возможность:

определить оптимальный способ TSP на участке улично-дорожной сети в заданных условиях;

разработать при необходимости комбинированный алгоритм, включающий все рассмотренные в работе отдельные способы TSP и позволяющий изменять способ приоритета в каждом отдельном цикле с учетом фактических условий;

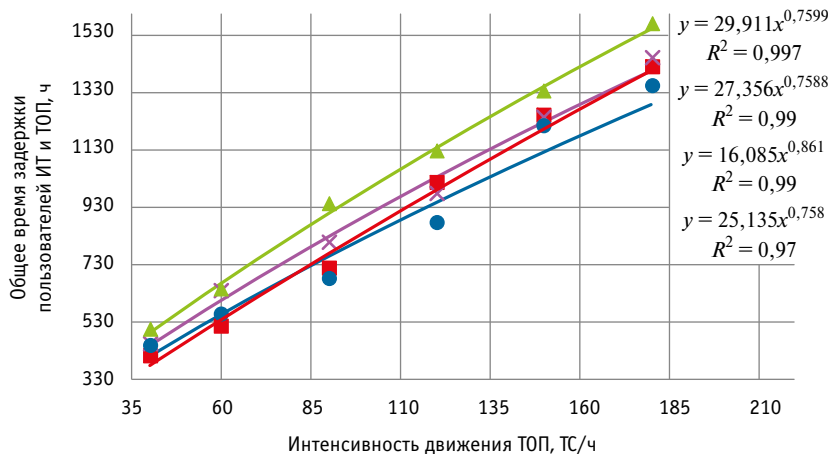
определить область рационального применения способов TSP в заданных условиях.

Направлениями дальнейших исследований станут: оценка эффективности способов TSP на регулируемых перекрестках с другими параметрами, в том числе на автомобильных дорогах с полосой для маршрутных транспортных средств;



**Рис. 6. Влияние интенсивности движения автобусов на время в пути индивидуального транспорта (ИТ) на второстепенном направлении:**

● — продление основного такта; ■ — базовый вариант;  
▲ — специальная фаза; ✕ — комбинированный алгоритм



**Рис. 7. Влияние интенсивности движения автобусов на общее время задержки всех участников движения в транспортной модели:**

● — продление основного такта; ■ — базовый вариант;  
▲ — специальная фаза; ✕ — комбинированный алгоритм

кластеризация перекрестков по критерию эффективности с учетом количества пассажиров в общественном транспорте; создание методики выбора оптимального способа TSP на перекрестке с учетом фактического и проектируемого уровня транспортного обслуживания.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20–48–720006 «Модель трансформации городских транспортных систем с учетом влияния на общество и экономику пандемии коронавируса Covid-19».*

## Литература

- Булавина Л. В., Мухаметгалиева А. Р. Совершенствование автобусного сообщения в городе как средство решения транспортных проблем // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. № 2 (13). С. 73–85. ISSN 2541-9110.
- Занозина Н. М., Шаров М. И. К вопросу о разработке критериев эффективности внедрения приоритета общественного

## References

- Bulavina L. V., Mukhametgalieva A. R. Transit service in the city as a means of solving transport problems improving bus [Sovershenstvovanie avtobusnogo soobshheniya v gorode kak sredstvo resheniya transportnykh problem]. Housing and utilities infrastructure. 2020. No. 2 (13). Pp. 73–85. ISSN 2541-9110.
- Zanozina N. M., Sharov M. I. Working out the efficiency criteria of implementing the priority of public transport at the crossroads [K voprosu

- транспорта в крупных городах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2014. № 6 (11). С. 103–108. ISSN 2227–2917.
3. Якунина Н. В., Нестеренко Д. Х., Арсланов М. А. Факторный анализ направлений повышения активности использования городского пассажирского автомобильного транспорта // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2018. Т. 21. № 4. С. 533–540. ISSN 1560-9278.
  4. Якимов М. Р. Показатели качества организации дорожного движения в городах и методы их оценки // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 90–92. ISSN 1815-9400.
  5. Неволин Д. Г., Цариков А. А., Бондаренко В. Г. Реальная скорость перемещения жителей города на примере пассажирского транспорта Екатеринбурга // Транспорт Урала. 2022. № 4 (75). С. 48–53. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-48-53. ISSN 1815-9400.
  6. Дрючин Д. А., Фаттахова А. Ф., Баловнев С. В. Повышение качества транспортного обслуживания населения на основе анализа скоростных режимов движения на регулярных автобусных маршрутах // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 108–112. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-108-112. ISSN 1815-9400.
  7. Солодкий А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути решения. Новый этап // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 6. С. 10–19. ISSN 2077-7175.
  8. Жанказиев С. В., Воробьев А. И., Бичманов М. Д. Оптимизация адаптивного управления светофорными объектами в рамках директивного управления транспортными потоками // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2016. № 4 (47). С. 138–143. ISSN 2079-1364.
  9. Фадюшин А. А., Захаров Д. А. Влияние параметров полосы для маршрутных транспортных средств на время задержки индивидуального и общественного транспорта // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 169–177. ISSN 1999-5571.
  10. Петров В. В., Кашталинский А. С. Влияние стохастичности на степень насыщения и задержку транспортного потока // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 29–31. ISSN 1815-9400.
  11. Ghanbarikarekani M., Qu X., Zeibots M., Qi W. Minimizing the Average Delay at Intersections via Presignals and Speed Control // Journal of Advanced Transportation. 2018. 4121582. ISSN 0197-6729.
  12. Wahlstedt J. Impacts of bus priority in coordinated traffic signals // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2011. Vol. 16. Pp. 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.478>. ISSN 1877-0428.
  13. Novačko L., Babojelić K., Dedić L., Rožič T. Simulation-based public transport priority tailored to passenger conflict flows: A case study of the city of Zagreb. Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11 (11). 4820. ISSN 2076-3417.
  14. He H., Guler S. I., Menendez M. Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal // Transportation Research Part C : Emerging Technologies. 2016. Vol. 64. Pp. 28–44. ISSN 0968-090X.
  15. Sun Y., Li J., Wei X., Jiao Y. Tandem design of bus priority based on a pre-signal system. Sustainability (Switzerland). 2021. Vol. 13 (18). 10109. ISSN 2071-1050.
  16. Dumbliauskas V., Grigonis V., Vitkienė J. Estimating the effects of public transport priority measures at signal controlled intersections // Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2017. Vol. 12 (3), Pp. 187–192. ISSN 1822-427X.
  17. Desta R., Tóth J. Simulating the performance of integrated bus priority setups with microscopic traffic mockup experiments // Scientific African. 2021. Vol. 11. e00707. ISSN 2468-2276.
  3. Yakunina N. V., Nesterenko D. Kh., Arslanov M. A. Factor analysis of ways to activate using the urban passenger motor transport [Faktornyy analiz napravleniy povysheniya aktivnosti ispol'zovaniya gorodskogo passazhirskogo avtomobil'nogo transporta]. Vestnik of MSTU. Scientific journal of Murmansk State Technical University. 2018. Vol. 21. No. 4. Pp. 533–540. ISSN 1560-9278.
  4. Yakimov M. R. Urban road traffic organization quality and evaluation methods [Pokazateli kachestva organizatsii dorozhnogo dvizheniya v gorodakh i metody ikh otsenki]. Transport of the Urals. 2014. No. 2 (41). Pp. 90–92. ISSN 1815-9400.
  5. Nevolin D. G., Tsarikov A. A., Bondarenko V. G. Real speed of movement of city residents on the example of passenger transport in Ekaterinburg [Real'naya skorost' peremeshheniya zhiteley goroda na primere passazhirskogo transporta Ekaterinburga]. Transport of the Urals. 2022. No. 4 (75). Pp. 48–53. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-48-53. ISSN 1815-9400.
  6. Dryuchin D. A., Fattakhova A. F., Balovnev S. V. Improving the quality of population transport services on the basis of analysing speed modes of movement on scheduled bus routes [Povyshenie kachestva transportno-go obsluzhivaniya naseleniya na osnove analiza skorostnykh rezhimov dvizheniya na regul'yarnykh avtobusnykh marshrutakh]. Transport of the Urals. 2016. No. 4 (51). Pp. 108–112. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-108-112. ISSN 1815-9400.
  7. Solodkiy A. I. Development of Intelligent Transport Systems in Russia: problems and solutions. New stage [Razvitie intellektual'nykh transportnykh sistem v Rossii: problemy i puti resheniya. Novyy etap]. Intellekt. Innovations. Investments. 2020. No. 6. Pp. 10–19. ISSN 2077-7175.
  8. Zhankaziev S. V., Vorobyev A. I., Bichmanov M. D. Optimization of adaptive control of traffic lights within the traffic control [Optimizatsiya adaptivnogo upravleniya svetofornymi ob'ektami v ramkakh direktivnogo upravleniya transportnymi potokami]. Vestnik MADU. 2016. No. 4 (47). Pp. 138–143. ISSN 2079-1364.
  9. Fadyushin A. A., Zakharov D. A. Impact of route vehicles' lane parameters on the delay time of individual and public transport [Vliyaniye parametrov polosy dlya marshrutnykh transportnykh sredstv na vremya zaderzhi individual'nogo i obshchestvennogo transporta]. Bulletin of Civil Engineers. 2021. No. 1 (84). Pp. 169–177. ISSN 1999-5571.
  10. Petrov V. V., Kashtalinsky A. S. Influence of stochasticity on the degree of saturation and delay of traffic flow [Vliyaniye stokhastichnosti na stepen' nasyshheniya i zaderzhu transportnogo potoka]. Transport of the Urals. 2013. No. 4 (39). Pp. 29–31. ISSN 1815-9400.
  11. Ghanbarikarekani M., Qu X., Zeibots M., Qi W. Minimizing the Average Delay at Intersections via Presignals and Speed Control. Journal of Advanced Transportation. 2018. 4121582. ISSN 0197-6729.
  12. Wahlstedt J. Impacts of bus priority in coordinated traffic signals. Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2011. Vol. 16. Pp. 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.478>. ISSN 1877-0428.
  13. Novačko L., Babojelić K., Dedić L., Rožič T. Simulation-based public transport priority tailored to passenger conflict flows: A case study of the city of Zagreb. Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11 (11). 4820. ISSN 2076-3417.
  14. He H., Guler S. I., Menendez M. Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2016. Vol. 64. Pp. 28–44. ISSN 0968-090X.
  15. Sun Y., Li J., Wei X., Jiao Y. Tandem design of bus priority based on a pre-signal system. Sustainability (Switzerland). 2021. Vol. 13 (18). 10109. ISSN 2071-1050.
  16. Dumbliauskas V., Grigonis V., Vitkienė J. Estimating the effects of public transport priority measures at signal controlled intersections. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2017. Vol. 12 (3), Pp. 187–192. ISSN 1822-427X.
  17. Desta R., Tóth J. Simulating the performance of integrated bus priority setups with microscopic traffic mockup experiments. Scientific African. 2021. Vol. 11. e00707. ISSN 2468-2276.



УДК 621.331.3.024

Ирина Анатольевна Юшкова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ МЕЖПОЕЗДНОГО ИНТЕРВАЛА

Irina Anatolyevna Yushkova, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Assessment of energy losses in power supply system at decrease of train-to-train interval

#### Аннотация

Статья посвящена оценке энергетических потерь в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций. При исследовании системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ в условиях движения грузовых поездов унифицированной массы и уменьшения межпоездного интервала выполнено два имитационных эксперимента. Полученные результаты проанализированы на соответствие критериям, ограничивающим пропускную способность по устройствам электроснабжения, дана оценка энергетических потерь в тяговой сети и в трансформаторах тяговых подстанций.

**Ключевые слова:** интервальное регулирование, пропускная способность, постоянный ток, тяговая сеть, межпоездной интервал, энергетические потери

#### Abstract

The paper is devoted to assessment of energy losses in a traction power system and transformers of traction substations. At studying a 3.0 kV DC traction power supply system in conditions of operation of freight trains with unified weight and decrease of a train-to-train interval the author conducted two experiments. Results were analysed for compliance with the criteria that restrain capacity by power supply devices. As a result, the author gives an assessment to energy losses in traction power system and in transformers of traction substations.

**Keywords:** spacing regulation, capacity, direct current, traction power system, train-to-train interval, energy losses

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-96-100

Отсутствие либо недостаток резервов пропускной способности ограничивают движение поездов по сети железных дорог и снижают эффективность управления поездотоками. Повысить пропускную способность можно за счет сокращения межпоездного интервала (МПИ), в том числе на основе внедрения технологии интервального регулирования движения поездов [1–4], позволяющей снизить МПИ с 8–10 до 4–5, а в перспективе и до 2 мин.

Однако ограничивающим фактором для увеличения пропускной способности в данных условиях могут стать устройства электроснабжения. Поэтому возникает необходимость в технико-энергетическом анализе системы тягового электроснабжения (СТЭ) при движении в виртуальной сцепке грузовых поездов унифицированной массы с сокращенными межпоездными интервалами.

С этой целью автором статьи выполнены два имитационных эксперимента. В обоих из них рассматривался двухпутный участок протяженностью 231,9 км, электрифицированный на постоянном токе. На участке расположены 14 постов секционирования, 18 пунктов параллельного соединения и 13 тяговых подстанций (ТП), регулируемых системой БАРН ( $U_{дст} = 3,6$  кВ).

В первом эксперименте сначала моделировался график движения двух одиночных поездов (ОП) унифицированной массы при МПИ от 1 до 40 мин (рис. 1) [5].

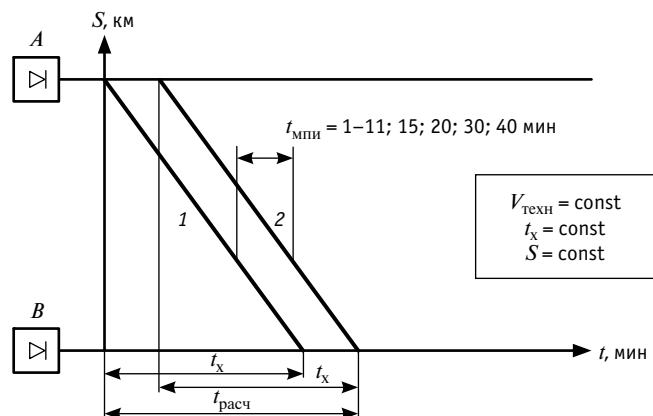


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования графика движения поездов



Затем по методике [6–9] выполнялось моделирование системы тягового электроснабжения. Далее осуществлялась проверка на соответствие ограничивающим критериям из формул (1) и (2) [5, 8, 10–12]:

$$U_{\text{э min}} \leq U_{\text{э}} \leq U_{\text{э max}}; \tag{1}$$

$$\begin{cases} k_{\text{дВт}} = \sum_{i=1}^k k_{\text{дВт}i} \rightarrow \min; \\ k_{\text{дТт}} = \sum_{i=1}^k k_{\text{дТт}i} \rightarrow \min; \\ k_{\text{дПт}} = \sum_{i=1}^k k_{\text{дПт}i} \rightarrow \min; \\ \tau_{\text{min}} \leq \tau \leq \tau_{\text{max}}, \end{cases} \tag{2}$$

где  $U_{\text{э}}$  — уровень напряжения на токоприемнике электровоза, В;  $k_{\text{дВт}}$ ,  $k_{\text{дТт}}$ ,  $k_{\text{дПт}}$  — коэффициенты нагрузки соответственно преобразователя тяговой подстанции, преобразовательного и понижающего трансформаторов;  $\tau$  — ограничивающая температура, °С.

Если результаты расчетов удовлетворяли критериям формул (1) и (2), выполнялась оценка энергетических потерь:

$$\begin{cases} \Delta A_{\text{тс}} = \sum_{i=1}^k \Delta A_{\text{тс}i} \rightarrow \min; \\ \Delta A_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^k \Delta A_{\text{тр}i} \rightarrow \min, \end{cases} \tag{3}$$

где  $\Delta A_{\text{тс}}$  и  $\Delta A_{\text{тр}}$  — соответственно потери электроэнергии (ЭЭ) в тяговой сети и в трансформаторах тяговой подстанции, кВт·ч.

При моделировании системы тягового регулируемого электроснабжения (СТРЭ) [5, 8, 9] в  $\Delta A_{\text{тр}}$  учитывались потери электроэнергии в регулирующем устройстве системы БАРН.

По результатам электрических расчетов выполнена оценка энергетических потерь с построением гистограмм и графиков.

Гистограммы  $\Delta A_{\text{тс}}$  без регулирования (3,5хх) и с регулированием (3,7ст) напряжения при скоростях движения 50–100 км/ч представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при сокращении МПИ энергетические потери в тяговой сети снижаются, причем при регулировании напряжения они меньше, чем без регулирования на ши-

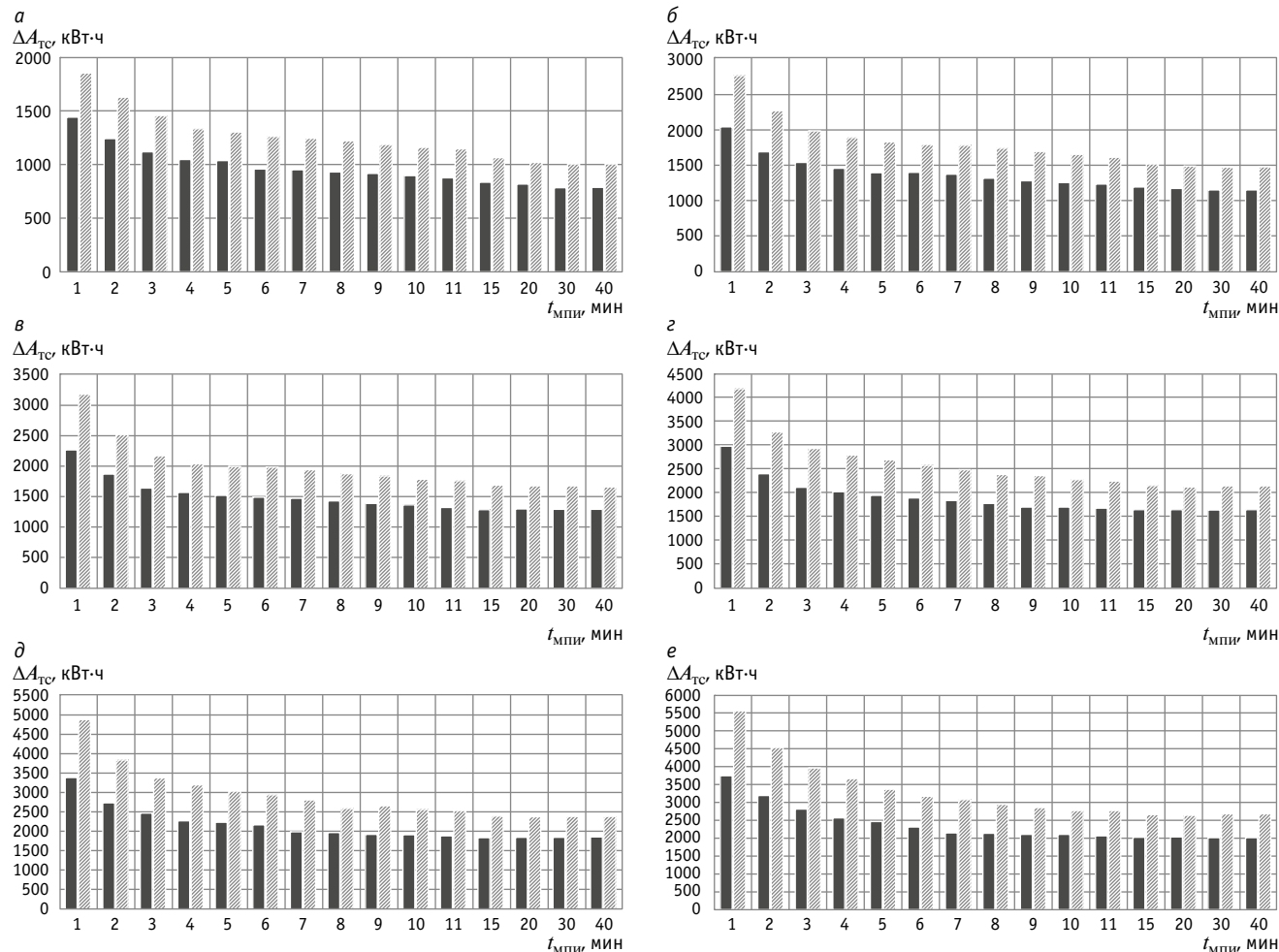


Рис. 2. Потери электроэнергии в тяговой сети:  
а, б, в, г, д, е — при скорости движения 50, 60, 70, 80, 90 и 100 км/ч соответственно; ■ — 3,7 ст; ▨ — 3,5 хх

нах ТП, что подтверждает энергетическую эффективность системы БАРН [13].

На рис. 3 представлены графики  $\Delta A_{\text{тр}}$  без регулирования на шинах тяговых подстанций ( $U_{dxx} = 3,5$  кВ), а на рис. 4 — с регулированием напряжения системой БАРН ( $U_{dct} = 3,7$  кВ).

При увеличении  $t_{\text{МПИ}}$  (см. рис. 3 и 4) нагрузочные потери ЭЭ уменьшаются, а потери холостого хода, наоборот, увеличиваются. Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что при введении устройств регулирования напряжения значения  $\Delta A_{\text{тр}}$  становятся выше. Это связано, как уже отмечалось, с учетом дополнительных потерь ЭЭ в регулирующем устройстве.

Для второго имитационного эксперимента межпоездной интервал внутри пакета поездов был задан равным 5 мин. Масса грузовых поездов 6000, 8000 и 9000 т. Тонно-киломе-

тровая работа на рассматриваемом участке за 12 ч составляет  $8304,2 \cdot 10^4$  т·км.

Эксперимент выполнен в двух вариантах:

без остановок поезда на протяжении всего участка;

с остановками в нечетном направлении на станции Т (10 мин), станции Е (30 мин) и станции Д (60 мин), в четном направлении — на станции Т (10 мин) и станции В (60 мин).

Результаты моделирования СТЭ первого варианта показали, что по двум межподстанционным зонам проверка на соответствие ограничивающим критериям [формулы (1) и (2)] не выполняется:  $U_{d\Delta} = 2679$  В; увеличенная нагрузка понижающего трансформатора на тяговой подстанции;  $\tau_{\text{наг.кс}} = 100$  °С (при допустимой температуре 100 °С);  $\tau_{\text{лин.обр.тока}} = 97$  °С (при допустимой температуре 90 °С).

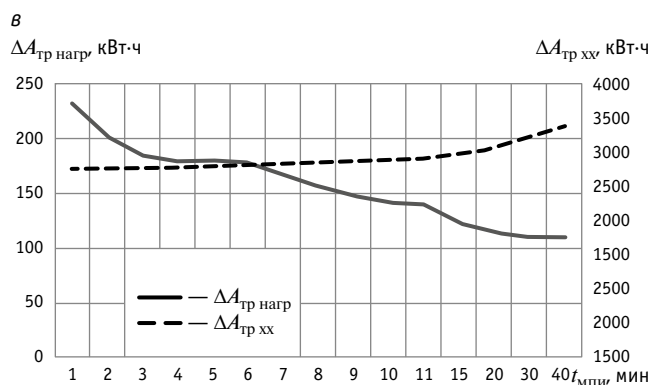
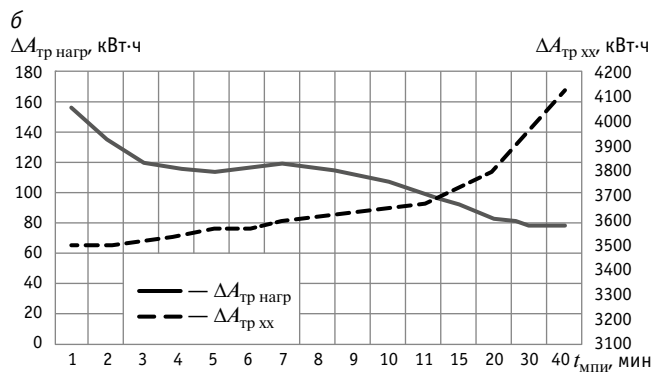
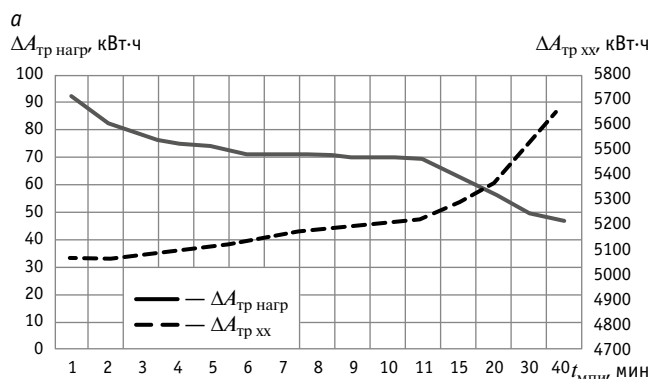
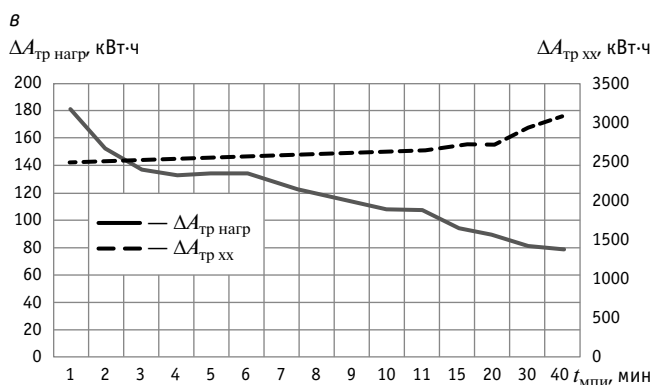
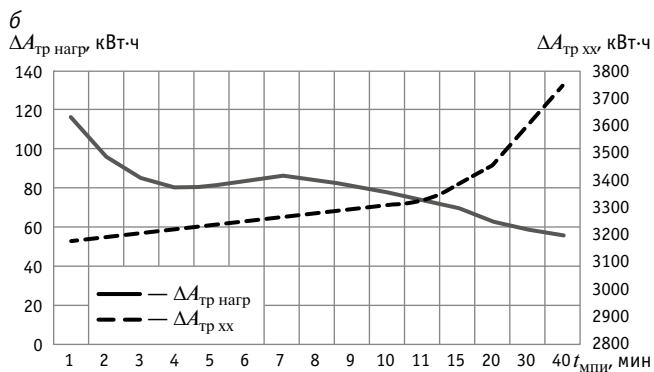
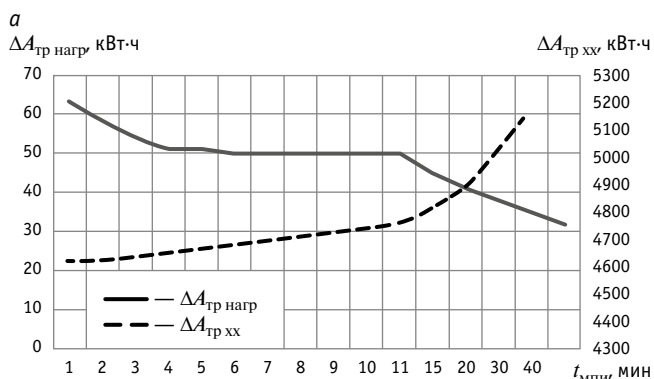


Рис. 3. Потери электроэнергии в трансформаторах тяговой подстанции без регулирования напряжения ( $U_{dxx} = 3,5$  кВ): а, б, в — при скорости 50, 70 и 90 км/ч соответственно

Рис. 4. Потери электроэнергии в трансформаторах тяговой подстанции с регулированием напряжения системой БАРН ( $U_{dct} = 3,7$  кВ): а, б, в — при скорости 50, 70 и 90 км/ч соответственно

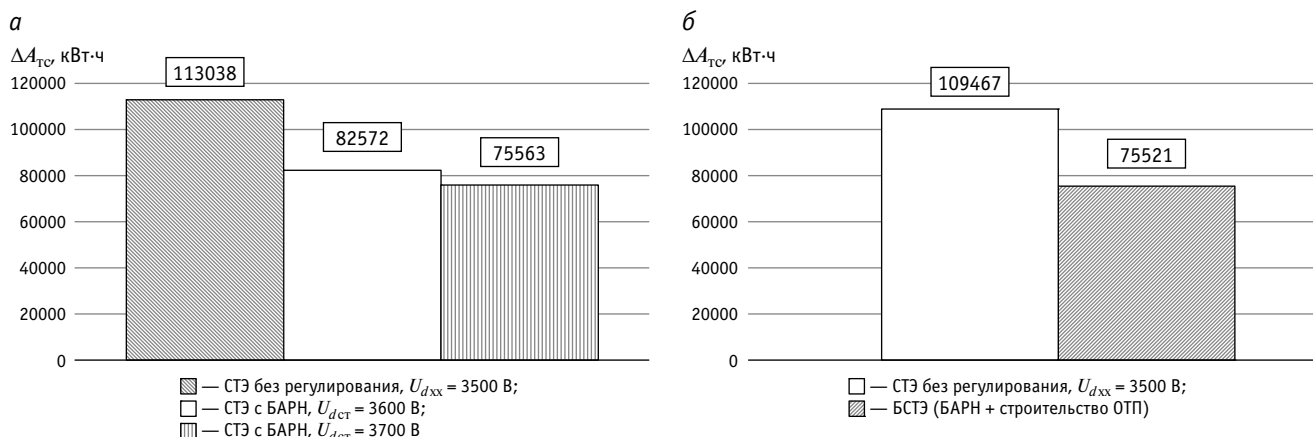


Рис. 5. Снижение потерь электроэнергии в тяговой сети:

а — вариант без остановок; б — вариант с остановками

В эксперименте с регулированием напряжения на шинах ТП на уровне  $U_{dCT} = 3,7$  кВ ограничения отсутствуют, что удовлетворяет требованию пропускной способности по устройствам электроснабжения [9, 10, 13, 14].

Результаты моделирования второго варианта показали, что по существующей СТЭ с  $U_{dCT} = 3,6$  и  $3,7$  кВ расчет невозможен, так как потери напряжения превышают 2000 В. В таких условиях требуется уменьшить нагрузку либо принять меры, снижающие ограничения по устройствам СТЭ. Этого можно добиться, если установить на межподстанционной зоне одноагрегатную тяговую подстанцию (ОТП) с питанием от соседних тяговых подстанций Е — Ф по ЛЭП, так называемую БСТЭ (буферную СТЭ) [13–15]. Этот вариант позволяет обеспечить пропуск рассматриваемого графика движения по-

ездов с остановками и ликвидировать ограничения по формулам (1) и (2).

Далее энергетические потери оценивались в соответствии с формулой (3). При расчете варианта без остановок (рис. 5а) определено, что  $\Delta A_{TC}$  снижаются на 8,5 % (при сравнении  $U_{dCT} = 3,6$  и  $3,7$  кВ). В варианте с БСТЭ (рис. 5б) снижение  $\Delta A_{TC}$  по сравнению с СТЭ без регулирования напряжения составило 31 %.

При дальнейшем снижении МПИ до 2 мин в варианте без остановок число межподстанционных зон с ограничением по формуле (1) составило 12 из 13, не считая ограничений по формуле (2). Следовательно, оценка энергетических потерь по формуле (3) невозможна без реализации мер по усилению СТЭ и без дополнительных капиталовложений.

## Литература

1. Бушуев С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 4. С. 343–353. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353. ISSN 2412-9186.
2. Бушуев С. В., Гундырев К. В., Голочалов Н. С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 1. С. 1–20. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20. ISSN 2412-9186.
3. Управление потоком поездов на основе интеллектуализации локомотива и цифровой радиосвязи : отчет о НИР / УрГУПС : рук. Бушуев С. В. Екатеринбург, 2020. № гос. регистрации АААА-А20-120042190034-0.
4. Бушуев С. В., Ковалев И. А., Пермикин В. Ю. Влияние инфраструктурных ограничений железнодорожного транспорта на пространственное развитие региона // Материалы V всероссийского симпозиума по региональной экономике: в 2 т. Т. 2. Екатеринбург : Институт экономики Уральского отделения РАН, 2019. С. 22–27.
5. Баева И. А. Совершенствование методики расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока на основе устройств

## References

1. Bushuev S. V. Ways to rise carrying capacity of railway sections [Puti povysheniya provoznoy sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog]. Transport automation research. 2022. Vol. 8. No. 4. Pp. 343–353. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353. ISSN 2412-9186.
2. Bushuev S. V., Gundyrev K. V., Golochalov N. S. Increasing the capacity of the railway section with the use of virtual coupling technology [Povyshenie propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoy dorogi s primeneniem tekhnologii virtual'noy stseпки]. Transport automation research. 2021. Vol. 7. No. 1. Pp. 1–20. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20. ISSN 2412-9186.
3. Control of train traffic on the basis of intellectualization of a locomotive and digital radio communications [Upravlenie potokom poezdov na osnove intellektualizatsii lokomotiva i tsifrovoy radiosvyazi]. Report on research. Project chairman Bushuev S. V. Ekaterinburg : USURT, 2020. State registration No. АААА-А20-120042190034-0.
4. Bushuev S. V., Kovalev I. A., Permikin V. Yu. Influence of infrastructure restrictions of railway transport on spacial development of a region [Vliyaniye infrastrukturykh ogranicheniy zheleznodorozhnogo transporta na prostranstvennoye razvitiye regiona]. Proceedings of the 5th All-Russian symposium for Regional Economy. Vol. 2. Ekaterinburg : IE UB RAS, 2019. Pp. 22–27.
5. Baeva I. A. Improvement of method for calculation of direct current power supply system on the basis of voltage regulation devices [Sovershen-

регулирования напряжения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2020. 157 с.

6. Баева И. А. Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения // Известия ПГУПС. 2019. Т. 16. № 1. С. 51–58. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-51-58. ISSN 1815-588X.
7. Аржанников Б. А., Баева И. А. Совершенствование методики электрического расчета СТРЭ в программном комплексе КОРТЭС // Тезисы докладов Десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0». Санкт-Петербург, 9–11 октября 2019 г. Ч. I. Санкт-Петербург : Изд-во ПГУПС, 2019. С. 13.
8. Баева И. А. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения за счет применения устройств регулирования напряжения // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 78–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-78-85. ISSN 1815-9400.
9. Arzhannikov B. A., Baeva I. A., Tarasovskiy T. S. Energy efficiency electrified section with automatic voltage regulation // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 87–97. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_10).
10. Марский В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 40–46. ISSN 2223-9731.
11. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России от 23.06.2022 г. № 250. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1827#8192> (дата обращения: 04.06.2023).
12. Юшкова И. А., Киселева А. И. Проект усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока // Электроэнергетика. Электротехника. Тяговое электроснабжение : материалы VIII региональной научно-технической конференции. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2022. Вып. 2 (246). С. 28–34.
13. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2015. 258 с.
14. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. Москва, 2011. 97 с.
15. Improvement of the system of contactless automatic regulation of voltage of converter traction units of traction substations / B. Arzhannikov, A. Buynosov, I. Baeva, T. Tarasovskiy // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. 2020. P. 012150.
6. Baeva I. A. Calculating procedure for the system of traction power supply of DC 3.0 kV in case of applying voltage regulating devices [Metodika rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV pri vvedenii ustroystv regulirovaniya napryazheniya]. PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2020. 157 p.
7. Arzhannikov B. A., Baeva I. A. Improvement of method for electric calculation of regulated traction power supply system in KORTES program complex [Sovershenstvovanie metodiki elektricheskogo rascheta STRE v programmnoy komplekse KORTES]. Scientific conference abstracts of the 10th International symposium «Eltrans 10.0». St. Petersburg, October 9–11, 2019. Part I. St. Petersburg : Publishing House of PSTU, 2019. P. 13.
8. Baeva I. A. Increase of energy efficiency of traction power supply system by application of voltage regulating devices [Povyshenie energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet primeneniya ustroystv regulirovaniya napryazheniya]. Transport of the Urals. 2021. No. 1 (68). Pp. 78–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-78-85. ISSN 1815-9400.
9. Arzhannikov B. A., Baeva I. A., Tarasovskiy T. S. Energy efficiency electrified section with automatic voltage regulation. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 87–97. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_10/](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_10/).
10. Marskiy V. E. Traffic capacity of railway sections in terms of traction power supply equipment [Opredelenie propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov po ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya]. Russian Railway Science Journal. 2014. No. 1. Pp. 40–46. ISSN 2223-9731.
11. The Russian Federation Railway Operating Rules [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy Federatsii]: approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 23.06.2022 No. 250. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1827#8192> (access date: 04.06.2023).
12. Yushkova I. A., Kiseleva A. I. Project of improvement of direct current traction power supply system [Proekt usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka]. Power industry. Electrical engineering. Traction Power Supply. Proceedings of the 8th regional scientific and technical conference. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2022. Issue 2 (246). Pp. 28–34.
13. Arzhannikov B. A., Naboychenko I. O. A concept for reinforcement of 3.0 kV DC traction power supply system [Kontseptsiya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2015. 258 p.
14. The energy strategy of the holding Russian Railways for the period until 2015 and for the future until 2030 [Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda]. Moscow, 2011. 97 p.
15. Arzhannikov B., Buynosov A., Baeva I., Tarasovskiy T. Improvement of the system of contactless automatic regulation of voltage of converter traction units of traction substations. IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. 2020. P. 012150.

Объем статьи 0,6 авторских листа

**Подписка на 2024 год.**

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

✂

**АБОНЕМЕНТ**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Стоимость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	руб. ____ коп.	

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

### Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

**Назначение платежа:** «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

### Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusnikov-urgups>

<b>Извещение</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2024 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2024 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 4 (79), 2023 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Тел. (343) 221-23-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: [EPupova@usurt.ru](mailto:EPupova@usurt.ru)

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-23-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: [EPupova@usurt.ru](mailto:EPupova@usurt.ru)

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 28.12.2023

Выход в свет 12.01.2024

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–40)

Формат 60×90/8

Цена 618,51 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 39

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2023