ISSN 3034-6681

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА»

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№1
2026

Научный журнал

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Эксплуатация автомобильного транспорта

Логистические транспортные системы

Выходит 4 раза в год
Издается с января 2004 г.

Майкоп
Донецк
2026

ВЕСТНИК
Донецкой академии транспорта

2026 **Научный журнал**

№1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала
И.П. Энглези**,** д-р техн. наук, доц., Донецкая академия транспорта (ДАТ), г. Донецк

И.В. Балабин**,** д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ), г. Москва
А.Н. Блохин, канд. техн. наук, доц., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород
Е.Е. Витвицкий, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск
В.М. Власов**,** д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва
Н.В. Володарец, канд. техн. наук, доц., заместитель главного редактора, ДАТ, г. Донецк
В.А. Глинский**,** канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова (СПбГУГА), г. Санкт-Петербург
С.А. Горожанкин**,** д-р техн. наук, проф., Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета), г. Макеевка
М.В. Грязнов**,** д-р техн. наук, проф., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск
В.В. Данилов**,** д-р техн. наук, проф., Донецкий государственный университет (ДонГУ), г. Донецк
К.Б. Евсеев**,** д-р техн. наук, доц., МГТУ, г. Москва
Д.Б. Ефименко, д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
С.А. Зори, д-р техн. наук, доц., Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), г. Донецк
Д.В. Капский**,** д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
А.Б. Карташов**,** канд. техн. наук, МГТУ, г. Москва
В.Э. Клявин**,** д-р техн. наук, доц., заместитель главного редактора, ДАТ, г. Донецк
О.Н. Ларин**,** д-р техн. наук, проф., Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
К.Н. Маренич, д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, г. Донецк
Л.Б. Миротин**,** д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
Н.И. Мищенко**,** д-р техн. наук, проф., Автомобильно-дорожный институт (филиал Донецкого национального технического университета), г. Горловка
Д.Л. Мойся, канд. техн. наук, ДАТ, г. Донецк
В.Н. Павлыш**,** д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, г. Донецк
Ю.И. Палагин**,** д-р техн. наук, проф., СПбГУГА, г. Санкт-Петербург
Н.В. Паламарчук**,** д-р техн. наук, проф., Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДОНИЖТ), г. Донецк
А.Н. Полетайкин**,** канд. техн. наук, доц., Кубанский государственный университет, г. Краснодар
Ю.В. Прилепский, канд. техн. наук, доц., ответственный секретарь, ДАТ, г. Донецк
В.М. Приходько**,** член-корреспондент Российской академии наук, д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
И.Н. Пугачев**,** д-р техн. наук, доц., Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
В.И. Сарбаев**,** д-р техн. наук, проф., Московский политехнический университет, г. Москва
А.В. Сацюк**,** канд. техн. наук, ДОНИЖТ, г. Донецк
В.В. Сильянов**,** д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
А.И. Солодкий**,** д-р экон. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург
Н.А. Филиппова**,** д-р техн. наук, доц., МАДИ, г. Москва
М.Н. Чепцов**,** д-р техн. наук, проф., ДОНИЖТ, г. Донецк

https://journal.dat-dn.ru

За достоверность фактов, цифр, точность имен и фамилий несут ответственность авторы статей.
Материалы номера печатаются на языке оригинала.

Учредитель:	Адрес учредителя и редакции:
АНОО ВО «Донецкая академия транспорта»	283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7, тел. +7 (949) 3076242; e-mail: rector@dat-dn.ru
Издатель:	Адрес издателя:
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»	385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191
АНОО ВО «Донецкая академия транспорта»	283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7

Издание публикуется с 2004 г.:
2004-2009 гг. – Вестник Донецкого института автомобильного транспорта
с 2010-2024 гг. – Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта
с 2025 г. – Вестник Донецкой академии транспорта

© АНОО ВО «Донецкая академия транспорта», 2026

VESTNIK
Doneckoj Akademii Transporta

2026 **Scientific Journal**

№1

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief
I.P. Englezi**,** Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Donetsk Academy of Transport (DAT), Donetsk

I.V. Balabin, Professor, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow
A.N. Blokhin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod
E.E. Vitvitskiy, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Siberian State Automobile and Road University, Omsk
V.M. Vlasov**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow
N.V. Volodarets, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, deputy editor-in-chief, DAT, Donetsk
V.A. Glinsky**,** Candidate of Engineering Sciences, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov (SPbGUGA), Saint Petersburg
S.A. Gorozhankin**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (a branch of the National Research Moscow State University of Civil Engineering), Makeevka
M.V. Gryaznov**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk
V.V. Danilov**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Donetsk State University (DonGU), Donetsk
K. B. Evseev**,** Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, BMSTU, Moscow
D.B. Efimenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
S.A. Zori, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Donetsk National Technical University (DonNTU), Donetsk
D.V. Kapski**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
A.B. Kartashov**,** Candidate of Engineering Sciences, BMSTU, Moscow
V.E. Klyavin**,** Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, deputy editor-in-chief, DAT, Donetsk
O.N. Larin**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Russian University of Transport (MIIT), Moscow
K.N. Marenich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, DonNTU, Donetsk
L.B. Mirotin**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
N.I. Mishchenko**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Automobile and Road Institute (a branch of the Donetsk National Technical University), Gorlovka
D.L. Moisia, Candidate of Engineering Sciences, DAT, Donetsk
V.N. Pavlysh**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, DonNTU, Donetsk
Y.I. Palagin**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, SPbGUGA, Saint Petersburg
N.V. Palamarchuk**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI), Donetsk
A.N. Poletaikin**,** Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kuban State University, Krasnodar
Y.V. Prilepsky, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, executive secretary, DAT, Donetsk
V.M. Prikhodko**,** Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
I.N. Pugachev**,** Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Pacific State University, Khabarovsk
V.I. Sarbaev**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow
A.V. Satsiuk**,** Candidate of Engineering Sciences, DRTI, Donetsk
V.V. Silyanov**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
A.I. Solodkiy**,** Doctor of Economic Sciences, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg
N.A. Filippova**,** Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, MADI, Moscow
M.N. Cheptsov**,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, DRTI, Donetsk

https://journal.dat-dn.ru

The authors of the articles are responsible for the accuracy of facts, figures, and names.
The materials of the issue are printed in the original language.

The founder:	Address of the founder and editorial office:
Donetsk Academy of Transport	7, Dzerzhinsky ave., Donetsk city, Donetsk city district, Donetsk People's Republic, 283086; tel. +7 (949) 3076242; e-mail: rector@dat-dn.ru
Publisher:	Publisher's address:
Maikop State Technological University	191, Pervomayskaya str., Maykop, Republic of Adygea, 385000
Donetsk Academy of Transport	7, Dzerzhinsky ave., Donetsk city, Donetsk city district, Donetsk People's Republic, 283086

The publication has been published since 2004:

2004-2009	– Bulletin of the Donetsk Institute of Road Transport
2010-2024	– Bulletin of the Donetsk Academy of Road Transport
since 2025	– Bulletin of the Donetsk Academy of Transport

© Donetsk Academy of Transport, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

Володарец Н.В., Шевченко С.В. Проактивная диагностика рисков на нерегулируемых пешеходных переходах на основе интеллектуального анализа видеоданных 8

Гайдаренко А.С., Васендина И.С. Интеллектуальная транспортно-логистическая система учёта круглого леса на основе глубокого обучения и блокчейна 19

Двуреченская Н.А., Жаурова Д.С., Полетайкин А.Н. Комплексная модель интеллектуальной генерации предложений по внесению изменений в ПДД 33

Сацюк А.В., Лесовой Э.В. Анализ проблем затухающих градиентов и умирающих нейронов в глубоких сверточных нейронных сетях 48

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

Мойся Д.Л., Бобров В.В. Нелинейная модель движения сочлененного автобуса и ее применение для оценки вписываемости в габаритный коридор 58

Дик А.Б. Полуэмпирическая модель для описания стационарных характеристик шины 70

Петров А.В. К вопросу о возможности применения энтропийной диагностической модели для описания процесса эксплуатации пожарного автомобиля 84

Савенко Э.С. Анализ развития теоретических концепций динамики подъемных машин 93

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТРАНЫ, ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ

Донченко В.В., Андреев С.А., Калинина В.В. Оценка качества функционирования городских транспортных систем 99

Медрес Е.Е., Евтюков С.А., Васильев Я.В., Солодкий А.И. Метод личностного индекса бистабильности водителей для диагностики их стиля вождения и прогнозирования поведения в условиях насыщенного транспортного потока 129

Семенов Ю.Н., Семенова О.С. Модель оценки водителем дорожной обстановки ... 139

Сорокина Д.Н. Анализ качества обслуживания на городском общественном транспорте в городе Ростове-на-Дону 149

Энглези И.П., Ершова К.А. Совершенствование модели выбора маршрута дорожной перевозки опасных грузов 163

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Джованис С., Сарбаев В.И., Гришин А.С. Адаптивное прогнозирование спроса на запасные части с учетом сезонных факторов на основе методов машинного обучения 174

Чернышов А.В. Проблема повышения аварийности в смешанных транспортных потоках и один из возможных путей ее решения 184

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Глинский В.А. Эвристическая модель маршрутизации в синхромодальной терминальной сети 196

Гюлев Н.У., Дадилов А.С., Шихсаидов Б.И., Абакаров А.А. Повышение эффективности функционирования транспортно-логистической системы на основе оптимизации выбора транспортного средства 214

Степаненко А.С., Шишкина В.Р., Батарагин И.Д. Особенности функционирования интегрированных IT-решений в авиационной логистике 226

Требования к оформлению статей для публикации в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 245

Условия и порядок публикации статей в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 247

Краткая информация о научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 248

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING, STATISTICS

Volodarets N.V., Shevchenko S.V. Proactive risk diagnostics at unsignalized pedestrian crossings based on intelligent video data analysis 8

Gaydarenko A.S., Vasendina I.S. Intelligent transport and logistics system for roundwood tracking based on deep learning and blockchain 19

Dvurechenskaya N.A., Zhaurova D.S., Poletaikin A.N. A Comprehensive model of intelligent generation of proposals for modifying traffic regulations 33

Satsiuk A.V., Lesovoy E.V. Analysis of fading gradients and dying neurons problems in deep convolutional neural networks..... 48

GROUND TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL FACILITIES AND COMPLEXES

Moisia D.L., Bobrov V.V. Nonlinear model of articulated bus motion and its application to swept-path envelope compliance assessment..... 58

Dik A.B. A semi-empirical model for describing stationary characteristics of a tire..... 70

Petrov A. V. On the question of the possibility of using an entropy diagnostic model to describe the operation of a fire truck..... 84

Savenko E.S. Analysis of the development of theoretical concepts of dynamics of lifting machines..... 93

TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF THE COUNTRY, ITS REGIONS AND CITIES, ORGANIZATION OF PRODUCTION IN TRANSPORT

Donchenko V.V., Andreev S.A., Kalinina V.V. Assessment of the quality of functioning of urban transport systems..... 99

Medres E.E., Evtyukov S.A., Vasiliev Y.V., Solodky A.I. The method of the personal index of drivers' bistability for diagnosing their driving style and predicting behavior in conditions of saturated traffic flow 129

Semenov Yu.N., Semenova O.S. A model for assessing the road condition by a driver.... 139

Sorokina D.N. Analysis of the quality of service on urban public transport in the city of Rostov-on-Don..... 149

Englezi I.P., Ershova K.A. Improving the route choice model for road transport of dangerous goods..... 163

OPERATION OF MOTOR TRANSPORT

Giovanis S., Sarbaev V.I., Grishin A. S. Adaptive forecasting of spare parts demand with seasonal factors based on machine learning methods 174

Chernyshov A.V. Safety decreasing problem in mixed traffic flow and potential way to solve IT..... 184

LOGISTIC TRANSPORT SYSTEMS

Glinskiy V.A. Heuristic routing model in synchromodal terminal network 196

Gyulev N.U., Dadilov A.S., Shikhsaidov B.I., Abakarov A.A. Improving the efficiency of the transport and logistics system by optimizing the choice of transport means..... 214

Stepanenko A.S., Shishkina V.R., Bataragin I.D. Introduction of information technologies of air transport logistics processes 226

Requirements for the design of articles for publication in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"..... 245

Conditions and procedure for the publication of articles in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"..... 247

Brief information about the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"... 248

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 656.212 : 004.932

Володарец Н.В., Шевченко С.В.

ПРОАКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА РИСКОВ НА НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИДЕОДАННЫХ

Аннотация. *Статья посвящена решению системной проблемы безопасности пешеходных переходов – критического элемента городской транспортной инфраструктуры. На основе системного анализа выявлены ключевые противоречия между эффективностью транспортного потока и безопасностью участников дорожного движения. Предложена концепция интегрированной системы проактивного управления, основанной на интеллектуальном анализе видеоданных в реальном времени. Разработан и формализован методологический базис системы, включающий иерархическую классификацию конфликтов, адаптированные суррогатные показатели безопасности (mTTC, CAI, ИКО) и процедуру трансляции данных в инженерные решения.*

Ключевые слова: *безопасность дорожного движения, интеллектуальные транспортные системы, проактивное управление, пешеходные переходы, компьютерное зрение, суррогатные показатели безопасности.*

Постановка задачи.

Нерегулируемые пешеходные переходы составляют до 70% всех пешеходных переходов в городской среде и представляют собой зоны повышенного системного риска, особенно вблизи образовательных учреждений, медицинских организаций и транспортных узлов. Согласно данным ВОЗ и исследований FHWA, до 95% потенциально опасных ситуаций на таких переходах остаются «невидимыми» для традиционных систем мониторинга безопасности, поскольку не фиксируются как ДТП, но формируют устойчивые паттерны риска, предшествующие авариям [1, 2, 7].

Существующие подходы к оценке безопасности нерегулируемых переходов опираются преимущественно на ретроспективный анализ ДТП и экспертные оценки, что создаёт фундаментальный дефект: инфраструктурные меры принимаются *после* трагедии, а не *до* её предотвращения. Широко развёрнутое видеонаблюдение используется в основном для фиксации нарушений ПДД (превышение скорости, неуступление), а не для системной диагностики конфликтных ситуаций. Отсутствие объективных данных о «мягких» конфликтах – ситуациях, когда пешеход вынужден резко остановиться в зоне перехода, ускориться или отказаться от перехода из-за агрессивного поведения водителя – приводит к необоснованному или неэффективному выбору решений.

Таким образом, ключевая проблема заключается в диагностическом вакууме: отсутствии методологически выверенного инструмента для количественной оценки латентных рисков на этапе, предшествующем ДТП.

Анализ последних исследований.

Анализ международного и отечественного опыта позволяет выявить системные пробелы в области обеспечения безопасности нерегулируемых пешеходных переходов [3-8, 14, 15]:

1. Доминирование ретроспективного подхода, опирающегося на статистику ДТП, что не позволяет выявить сотни «мягких» конфликтов, предшествующих каждому ДТП [7, 8].

2. Фрагментарность технических решений (радары, индукционные петли), которые фиксируют лишь базовые параметры, но не анализируют семантику взаимодействия и поведенческие паттерны (импульсивность пешехода, агрессивность водителя) [7, 8, 15].

3. Отсутствие связи между диагностикой и проектированием: отсутствие формализованной процедуры перевода о конфликтах в конкретные инженерные решения [7, 8].

4. Недостаточная проработка этико-правовых аспектов внедрения видеоаналитики, связанных с обработкой персональных данных, что сдерживает масштабирование технологий [7, 8].

Преимущество подхода на основе видеоаналитики – в богатстве семантической информации. Современные архитектуры компьютерного зрения (YOLO, BoT-SORT) позволяют не только детектировать участников движения, но и отслеживать их траектории, рассчитывать динамические параметры (скорость, ускорение) и на этой основе рассчитывать суррогатные показатели безопасности (TTC, PET) [9-13]. Критически важно, что такая обработка может осуществляться в полностью анонимизированном режиме.

В российском контексте проблемы также актуальны [3-6, 16, 17, 18], однако вопросы системной диагностики конфликтов с помощью видеоаналитики освещены недостаточно, что и определяет актуальность настоящего исследования, направленного на решение этой проблемы.

Цель работы.

Цель исследования – разработать методологию выявления, классификации и количественной оценки конфликтных ситуаций на нерегулируемых пешеходных переходах с использованием видеоаналитики как инструмента диагностического исследования для обоснования инфраструктурных и организационных мер повышения безопасности.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработка иерархической классификации конфликтных ситуаций на нерегулируемых переходах по трём измерениям: тип конфликта (прямой, косвенный, потенциальный), степень риска (низкая/средняя/высокая/критическая) и поведенческий паттерн участников (импульсивный пешеход, агрессивный водитель, групповой переход). Классификация базируется на диагностических признаках, извлекаемых из видеоданных (динамика скорости ТС за 30 м до перехода, расстояние минимального сближения, изменение траектории пешехода), что обеспечивает её воспроизводимость и применимость для разных локаций [7, 8, 10].

2. Адаптация системы суррогатных показателей безопасности для специфики нерегулируемых переходов:

- введение модифицированного показателя времени до столкновения (mTTC), учитывающего не только расстояние между участниками, но и факт снижения скорости ТС за 20 м до перехода;

- разработка показателя отказа от перехода (Crossing Abandonment Index, CAI) как количественной меры косвенных конфликтов;

- формализация индекса конфликтной опасности (ИКО) с весовыми коэффициентами, отражающими локальную специфику (близость школы, больницы, торгового центра) [7, 8, 15].

3. Методология трансляции диагностических данных в инженерные решения: установление соответствия между доминирующими паттернами риска (выявленными по результатам видеоаналитики) и конкретными инфраструктурными мерами (искусственные неровности, контрастная разметка, островки безопасности, организация регулируемого перехода) с чёткими критериями эффективности для пост-внедренческой оценки. Данная методология устраняет разрыв между теорией и практикой, обеспечивая научную обоснованность выбора мер [4, 15].

4. Интеграция этических принципов в архитектуру системы через проектирование конвейера on-edge обработки с приоритетом анонимизации, обеспечивающей соответствие ФЗ-152 и международным подходам (GDPR) [9, 14].

Данный подход фокусируется на диагностической, а не управленческой функции видеоаналитики, что соответствует парадигме «безопасности через проектирование» (Safe System Approach) [1, 2].

Основная часть.

Методология диагностики конфликтных ситуаций на нерегулируемых пешеходных переходах.

Предлагаемая методология реализует три ключевые функции диагностического исследования:

1. Выявление и классификация конфликтных ситуаций. На основе видеопотока с существующих камер с использованием современных архитектур компьютерного зрения выполняется:

- детекция и классификация участников движения с помощью алгоритмов семейства YOLO [9, 11];
- трекинг траекторий с применением алгоритмов типа BoT-SORT [10, 12, 13];
- идентификация конфликтных пар «пешеход – ТС» по критерию пересечения прогнозируемых траекторий в зоне перехода [7, 8].

Критически важным элементом методологии является иерархическая классификация конфликтов по трём измерениям (см. таблицу 1), позволяющая выявить доминирующие паттерны риска, специфичные для конкретной локации.

Результатом обработки является количественная карта рисков перехода, отражающая частоту, типологию и степень опасности конфликтных ситуаций в разрезе времени суток и внешних условий (см. рисунок 1).

2. Количественная оценка рисков на основе адаптированных суррогатных показателей. Для нерегулируемых переходов предложены модификации классических показателей, учитывающие специфику отсутствия светофорного регулирования [7, 8, 15]:

- Modified TTC (mTTC) учитывает не только расстояние между участниками, но и факт снижения скорости ТС за 20 м до перехода. Если снижение отсутствует при расстоянии < 30 м, значение TTC корректируется в сторону повышения риска:

$$mTTC_{\rho,\upsilon}(t) = TTC_{\rho,\upsilon}(t) \cdot \left[1 + \gamma \cdot I\left(\frac{d\upsilon}{dt_{[-30m,-20m]}} \right| > -0.5^{m}_{s^2} \right) \right] \quad (1)$$

где γ=0.3 – коэффициент коррекции,

$I(\cdot)$ – индикаторная функция отсутствия торможения.

Таблица 1.

Классификация конфликтных ситуаций на нерегулируемых пешеходных переходах

Критерий классификации	Категории	Диагностические признаки (видеоаналитика)
Тип конфликта	1. Прямой: пешеход вынужден резко остановиться или изменить траекторию в зоне перехода из-за приближающегося ТС без снижения скорости. 2. Косвенный: пешеход отказывается от перехода после выхода на проезжую часть из-за агрессивного поведения ТС, не предоставившего преимущество пешеходу. 3. Потенциальный: ТС не снижает скорость при приближении к переходу при наличии ожидающих пешеходов в зоне видимости.	- Динамика скорости ТС за 30 м до перехода (отсутствие снижения при расстоянии < 25 м) - Расстояние между ТС и пешеходом в момент наибольшего сближения (< 5 м) - Изменение траектории пешехода: остановка в зоне перехода, ускорение, отступление за пределы разметки
Степень риска	Низкая / Средняя / Высокая / Критическая	- Значение TTC < 2.5 с → критическая угроза - PET < 1.0 с → высокая угроза - Сочетание с внешними факторами (сумерки, дождь) повышает категорию на один уровень
Поведенческий паттерн	- Импульсивный пешеход (время принятия решения <1 с) - Агрессивный водитель (отсутствие снижения скорости при видимом пешеходе) - Групповой переход (дети, пожилые)	- Время задержки перед выходом на проезжую часть (< 1.5 с) - Отношение скорости ТС к скорости пешехода в зоне конфликта (> 3.0) - Коэффициент вариации скорости пешеходов в группе (> 0.4)

- Показатель отказа от перехода (Crossing Abandonment Index, CAI) количественно оценивает долю косвенных конфликтов:

$$CAI = \frac{N_{отказ}}{N_{начало}} \quad (2)$$

где $N_{\text{отказ}}$ – число пешеходов, начавших переход, но вынужденных остановиться или отступить за пределы разметки;

$N_{\text{начало}}$ – общее число начатых переходов. Высокий CAI (>30%) указывает на системную проблему восприятия приоритета пешехода.



Рис. 1. Структурная схема методологии диагностики конфликтных ситуаций на нерегулируемых пешеходных переходах на основе видеоаналитики

- Индекс конфликтной опасности (ИКО) как агрегированная мера риска с учётом локальной специфики:

$$ИКО(t) = w_1 \cdot f\left(mTTC^{-1}(t)\right) + w_2 \cdot q\left(PET^{-1}(t)\right) + w_3 \cdot h\left(CAI(t)\right) \quad (3)$$

где w_1, w_2, w_3 - весовые коэффициенты ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$), отражающие значимость компонентов;

f, g, h - нормализующие функции, приводящие значения к интервалу [0,1]. Веса корректируются в зависимости от близости социально значимых объектов (школа: w_3 повышается на 40%; больница: w_2 повышается на 30%.

3. Этически выверенная архитектура обработки видеоданных. Обработка осуществляется в on-edge режиме непосредственно на камере или ближайшем шлюзе [14]:

1. Детекция и трекинг → на выходе только обезличенные координатные рамки объектов и векторные траектории [9, 12].

2. Расчёт динамических параметров и суррогатных показателей.

3. Агрегация статистики по категориям конфликтов.

Биометрические данные (лица, силуэты) никогда не извлекаются и не сохраняются. На выходе системы формируются только структурированные данные: временные метки конфликтов, значения показателей, статистика по типам. Такой подход обеспечивает

соответствие требованиям ФЗ-152 и создаёт условия для общественного принятия технологий [9, 14].

Методология обоснования инфраструктурных и организационных мер.

Ключевой вклад – методология трансляции данных о рисках в инженерные решения. Установлено соответствие «паттерн риска – мера – критерий эффективности», основанное на анализе причин ДТП и современных методах обеспечения безопасности [4, 15] (см. таблицу 2).

Таблица 2.

Соответствие выявленных паттернов риска инженерным решениям

Выявленный паттерн риска	Диагностический критерий (видеоаналитика)	Рекомендуемая мера	Критерий эффективности (пост-внедрение)
Высокая доля «отказов от перехода» (>30%) при умеренной интенсивности ТС	Низкий CAI, отсутствие снижения скорости ТС при приближении к переходу (>70% ТС)	Установка искусственных неровностей («лежачих полицейских») на расстоянии 15–25 м до перехода + знак 5.19.1 с табличкой 8.23	Снижение доли отказов до <10%, рост средней скорости снижения ТС до 15 км/ч за 20 м до перехода
Критические TTC (<1.5 с) в сумеречное время	Резкий рост конфликтов с TTC<2.5 с после 17:00 (зимой) / 20:00 (летом)	Дорожная разметка 1.14.1 («зебра») с термопластиком с шариковым световозвращателем + светодиодные маячки активного типа по бокам перехода	Снижение доли конфликтов с TTC<2.5 с в сумерки на 50%
Групповые переходы детей с высоким риском	Пик конфликтов в 08:00–08:30 и 13:00–13:30 у школы, высокая вариация скорости пешеходов в группе (>0.4)	Организация регулируемого перехода в пиковые часы (временный светофор с автоматической активацией) + контрастная разметка с жёлтым цветом	Снижение ИКО в пиковые часы на 60%, устранение критических конфликтов (TTC<1.5 с)
Агрессивное поведение водителей при низкой пешеходной активности	Высокая доля ТС со скоростью >60 км/ч при наличии пешеходов в зоне видимости (>70% ТС)	Сужение проезжей части («прижим») + островки безопасности посередине перехода + вертикальная разметка 2.6	Снижение средней скорости ТС в зоне перехода до 40 км/ч, рост доли уступивших пешеходу ТС до 85%

Подход к валидации результатов.

Предложена трёхэтапная процедура, адаптированная из подходов к оценке эффективности пешеходной и велосипедной инфраструктуры [15] и методов верификации алгоритмов компьютерного зрения [9, 11]:

1. Верификация алгоритмов: проверка корректности работы модулей детекции, трекинга и расчёта показателей на размеченном наборе данных (ground truth) [9, 11].

2. Сравнительный анализ: сопоставление результатов классификации конфликтов, полученных автоматизированной системой, с экспертной оценкой тех же видеосцен для оценки точности и полноты [7, 8].

3. Оценка эффективности решений: моделирование или натурное тестирование рекомендуемых инфраструктурных мер на основе выявленных паттернов с последующей оценкой изменения ключевых показателей риска (ИКО, CAI, доля критических TTC) [4, 15].

Ключевое отличие от подходов к валидации систем управления – фокус не на снижении задержек транспорта, а на снижении количественных показателей риска (ИКО, доля критических конфликтов) как прямого индикатора эффективности инфраструктурных мер.

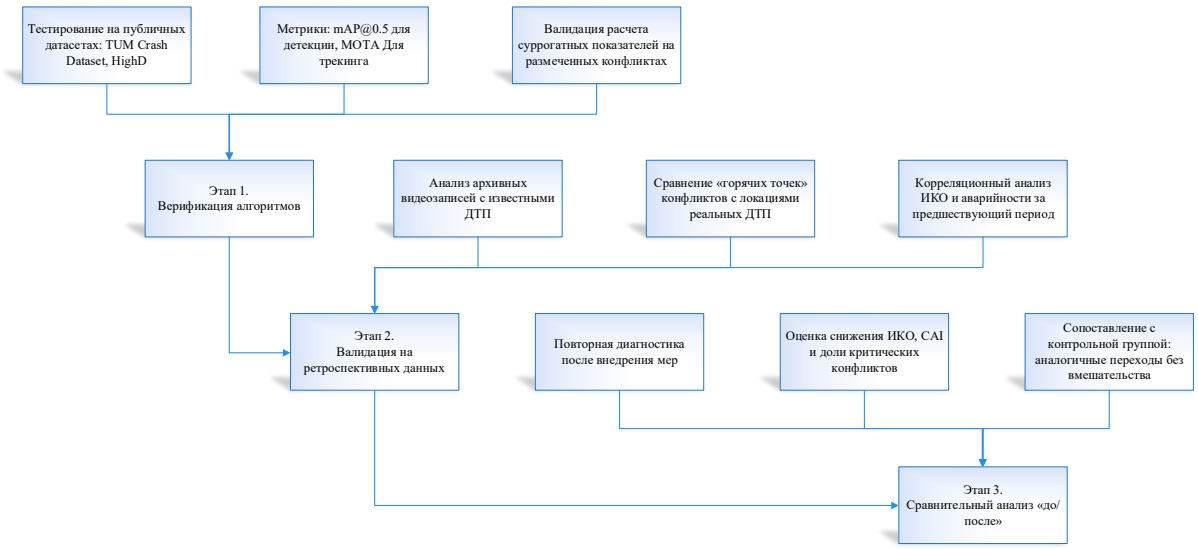


Рис. 2. Трёхэтапная методология валидации диагностической методологии

Выводы

Представленное исследование вносит существенный вклад в преодоление системного кризиса оценки безопасности нерегулируемых пешеходных переходов, предлагая переход от ретроспективного анализа ДТП к проактивной диагностике латентных рисков. Ключевой научный результат – разработка методологии, которая трансформирует видеоаналитику из инструмента фиксации нарушений в диагностический аппарат для обоснования инфраструктурных решений.

Суть новизны заключается не в применении технологий компьютерного зрения как таковых, а в их методологической интеграции в цикл проектирования городской среды через три взаимосвязанных компонента:

1. Формализованную диагностику конфликтов — иерархическая классификация по типу, степени риска и поведенческим паттернам с количественными критериями (модифицированный TTC, индекс отказа от перехода, агрегированный индекс

конфликтной опасности), обеспечивающая воспроизводимость и сопоставимость данных между локациями.

2. Механизм трансляции данных в решения — установление прямого соответствия между выявленными паттернами риска и конкретными инженерными мерами с чёткими критериями эффективности для пост-внедренческой оценки, что устраняет произвольность в выборе инфраструктурных решений.

3. Этическую встроенность — архитектура обработки с приоритетом анонимизации на этапе детекции (on-edge), превращающая потенциальное ограничение (требования ФЗ-152) в конкурентное преимущество для общественного принятия технологий.

Практическая значимость – в ориентации на существующую инфраструктуру видеонаблюдения и обоснование долгосрочных инженерных решений, что повышает реализуемость в условиях российских городов и позволяет перейти от реагирования на аварии к проектированию безопасной среды в соответствии с парадигмой «безопасности через проектирование».

Список литературы

1. Pedestrian Safety Guide and Countermeasure Selection System (PEDSAFE) [Электронный ресурс] / Federal Highway Administration. – URL: https://pedbikesafe.org/PEDSAFE/ (дата обращения: 19.03.2026).

2. Road Safety Annual Report 2018 / International Transport Forum, OECD Publishing. – Paris, 2018. – 248 p. – URL: https://www.itf-oecd.org/road-safety-annual-report-2018 (дата обращения: 19.03.2026).

3. ГОСТ Р 55892-2019. Интеллектуальные транспортные системы. Системы управления дорожным движением умного города. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2019.

4. Луканин В. Н., Сильянов М. В. Безопасность пешеходных переходов: анализ причин ДТП и современные методы обеспечения // Транспорт Российской Федерации. – 2022. – № 1 (98). – С. 45–49.

5. Шевченко С. В., Гурова В. Р. Транспортные развязки больших городов // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2023. – № 3. – С. 28–34. – EDN JBQGSW.

6. Hyder A., Subbarao S. S. V. Navigating safety: pedestrian safety perceptions at uncontrolled crosswalks in Hyderabad, India // Innovative Infrastructure Solutions. – 2025. – Vol. 10, No. 1. – P. 11. – DOI 10.1007/s41062-024-01818-6. – EDN BAMZHW.

7. Zhang Y. Intelligent Transportation Systems: A Review of Computer Vision Applications in Traffic Monitoring and Management // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22, № 6. – P. 3205–3221.

8. Chen Y. et al. Vision-Based Pedestrian Detection and Conflict Prediction at Unsignalized Crosswalks Using Transformer Models // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2023. – Vol. 146. – P. 103989.

9. Dazlee N. M. A., Khalil S. A., Abdul-Rahman Sh., Mutalib S. Object Detection for Autonomous Vehicles with Sensor-based Technology Using YOLO // International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – P. 129–134. – DOI 10.18201/ijisae.2022.276. – EDN SYZIFR.

10. Satsuk A. V., Volodarets N. V., Krupskiy D. I. Acceleration of neural network for UAV operation in real time // Vestnik Doneckoj Akademii Transporta. – 2025. – No. 1. – P. 6–14. – EDN QVUIBK.

11. Сацюк А. В., Володарец Н. В. Модификация модели YOLO для гибридной системы детекции и трекинга в БПЛА с автоматическим наведением // Информационно-управляющие системы. – 2025. – № 4. – С. 36–44. – DOI 10.31799/1684-8853-2025-4-36-44. – EDN YKQVJU.

12. Liang S., Wu H., Zhen Li. et al. Edge YOLO: Real-Time Intelligent Object Detection System Based on Edge-Cloud Cooperation in Autonomous Vehicles // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 12. – P. 25345–25360. – DOI 10.1109/tits.2022.3158253. – EDN XZBXXB.

13. Володарец Н. В., Сацюк А. В. Устойчивый трекинг и коррекция траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях ограниченной видимости с использованием мультисенсорных данных // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, № 3. – С. 1320–1330. – DOI 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330.

14. Guidelines on Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) Deployment / European Commission. – Brussels, 2023.

15. Performance Measures for Pedestrian and Bicycle Transportation / FHWA. – Washington, DC, 2022.

16. Ткачев С. А., Володарец Н. В. Сравнительный анализ технологий V2V, V2P и V2X для улучшения безопасности дорожного движения // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2024. – № 4. – С. 35–39. – EDN BDDOYQ.

17. Володарец Н. В., Маренич А. С., Ткачев С. А. Комплексный анализ современных интеллектуальных систем поддержки принятия решений для транспортных средств // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 4. – С. 22–42. – EDN OQEVND.

18. Ibrahim Ali Q., Mohammed H. M. Enhancing Road Safety and Network Intelligence through Vehicle-to-Everything (V2X) Communication: Architectures, Models, and Performance Analysis // Transportation Development Research. – 2025. – Vol. 3, No. 1. – P. 1–13. – DOI 10.55121/tdr.v3i1.426. – EDN OUUVIR.

References

1. Institute of Transportation Engineers; U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Pedestrian Safety Guide and Countermeasure Selection System (PEDSAFE) [Electronic resource]. – Available at: https://pedbikesafe.org/PEDSAFE/ (Accessed March 19, 2026).

2. International Transport Forum, OECD Publishing (2018), *Road Safety Annual Report 2018*, Paris, 248 p. – Available at: https://www.itf-oecd.org/road-safety-annual-report-2018 (Accessed March 19, 2026).

3. GOST R 55892-2019 (2019), *Intellektual'nye transportnye sistemy. Sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem umnogo goroda. Tekhnicheskie trebovaniya* [Intelligent transport systems. Smart city traffic management systems. Technical requirements], Standartinform, Moscow, Russia.

4. Lukanin, V.N. and Sil'yanov, M.V. (2022), "Bezopasnost' peshekhodnykh perekhodov: analiz prichin DTP i sovremennye metody obespecheniya" [Safety of pedestrian crossings: analysis of accident causes and modern methods of ensuring], *Transport Rossiyskoy Federatsii*, no. 1 (98), pp. 45–49.

5. Shevchenko, S.V. and Gurova, V.R. (2023), "Transportnye razvyazki bol'shikh gorodov" [Transport interchanges of large cities], *Vestnik Donetskoy akademii avtomobil'nogo transporta*, no. 3, pp. 28–34. (EDN JBQGSW)

6. Hyder, A. and Subbarao, S.S.V. (2025), "Navigating safety: pedestrian safety perceptions at uncontrolled crosswalks in Hyderabad, India", *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 10, no. 1, p. 11. DOI: 10.1007/s41062-024-01818-6.

7. Zhang, Y. (2021), "Intelligent Transportation Systems: A Review of Computer Vision Applications in Traffic Monitoring and Management", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 3205–3221.

8. Chen, Y. et al. (2023), "Vision-Based Pedestrian Detection and Conflict Prediction at Unsignalized Crosswalks Using Transformer Models", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 146, p. 103989.

9. Dazlee, N.M.A., Khalil, S.A., Abdul-Rahman, Sh. and Mutalib, S. (2022), "Object Detection for Autonomous Vehicles with Sensor-based Technology Using YOLO", *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 129–134. DOI: 10.18201/ijisae.2022.276.

10. Satsuk, A.V., Volodarets, N.V. and Krupskiy, D.I. (2025), "Acceleration of neural network for UAV operation in real time", *Vestnik Doneckoj Akademii Transporta*, no. 1, pp. 6–14.

11. Satsyuk, A.V. and Volodarets, N.V. (2025), "Modifikatsiya modeli YOLO dlya gibridnoy sistemy detektsii i trekinga v BPLA s avtomaticheskim navedeniem" [Modification of the YOLO model for a hybrid detection and tracking system in UAVs with automatic guidance], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, no. 4, pp. 36–44. DOI: 10.31799/1684-8853-2025-4-36-44.

12. Liang, S., Wu, H., Zhen, Li. et al. (2022), "Edge YOLO: Real-Time Intelligent Object Detection System Based on Edge-Cloud Cooperation in Autonomous Vehicles", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 12, pp. 25345–25360. DOI: 10.1109/tits.2022.3158253.

13. Volodarets, N.V. and Satsyuk, A.V. (2025), "Ustoychivyy treking i korrektsiya traektorii bespilotnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh ogranichennoy vidimosti s ispol'zovaniem mul'tisensornykh dannykh" [Robust tracking and trajectory correction of unmanned aerial vehicles in low-visibility conditions using multisensor data], *Sustainable Development of Mountain Territories*, vol. 17, no. 3, pp. 1320–1330. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330.

14. European Commission (2023), *Guidelines on Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) Deployment*, Brussels.

15. FHWA (2022), *Performance Measures for Pedestrian and Bicycle Transportation*, Washington, DC.

16. Tkachev, S.A. and Volodarets, N.V. (2024), "Sravnitel'nyy analiz tekhnologiy V2V, V2P i V2X dlya uluchsheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya" [Comparative analysis of V2V, V2P and V2X technologies to improve road safety], *Vestnik Donetskoy akademii avtomobil'nogo transporta*, no. 4, pp. 35–39.

17. Volodarets, N.V., Marenich, A.S. and Tkachev, S.A. (2025), "Kompleksnyy analiz sovremennykh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy dlya transportnykh sredstv" [Comprehensive analysis of modern intelligent decision support systems for vehicles], *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, no. 4, pp. 22–42.

18. Ibrahim Ali, Q. and Mohammed, H.M. (2025), "Enhancing Road Safety and Network Intelligence through Vehicle-to-Everything (V2X) Communication: Architectures, Models, and Performance Analysis", *Transportation Development Research*, vol. 3, no. 1, pp. 1–13. DOI: 10.55121/tdr.v3i1.426.

Volodarets N.V., Shevchenko S.V.

PROACTIVE RISK DIAGNOSTICS AT UNSIGNALIZED PEDESTRIAN CROSSINGS BASED ON INTELLIGENT VIDEO DATA ANALYSIS

Abstract. *The article addresses the systemic issue of pedestrian crossing safety – a critical element of urban transport infrastructure. Through systems analysis, key contradictions between traffic flow efficiency and road user safety are identified. A concept for an integrated proactive management system based on real-time intelligent video data analysis is proposed. The methodological foundation of the system has been developed and formalized, including a hierarchical conflict classification, adapted surrogate safety measures (mTTC, CAI, Conflict Risk Index), and a procedure for translating data into engineering solutions.*

Keywords: *road safety, intelligent transportation systems, proactive management, pedestrian crossings, computer vision, surrogate safety measures.*

Сведения об авторах:

Володарец Никита Витальевич
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия
проректор по научной работе и инновационному развитию,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru

Шевченко Светлана Вячеславовна
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия
аспирант,
e-mail: lana.shevchenko.dat@yandex.com

Information about the authors:

Volodarets Nikita Vitalevich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport," Donetsk, Russia
Vice-Rector for Research and Innovative Development,
PhD in Engineering, Associate Professor,
e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru

Shevchenko Svetlana Vyacheslavovna
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport," Donetsk, Russia
Postgraduate Student,
e-mail: lana.shevchenko.dat@yandex.com

УДК 303.732.4

Гайдаренко А.С., Васендина И.С.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УЧЁТА КРУГЛОГО ЛЕСА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И БЛОКЧЕЙНА

Аннотация. *В статье рассматривается подход к созданию интеллектуальной транспортно-логистической системы учёта круглого леса, объединяющей методы глубокого обучения и технологии распределённых реестров. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения прозрачности и достоверности данных о движении древесины от места заготовки до конечного потребителя. Предложена архитектура, в которой модуль компьютерного зрения автоматически идентифицирует древесину по изображениям торцов, формируя цифровой паспорт, а блокчейн обеспечивает неизменность и верифицируемость учетной информации. Система ориентирована на интеграцию с существующими государственными платформами лесного мониторинга и информационными ресурсами предприятий транспортно-логистической отрасли. Проведена апробация прототипа на выборке транспортных операций, что позволило подтвердить применимость подхода для повышения точности учёта и оптимизации логистических процессов. Разработанная методика может служить основой для построения цифровой экосистемы лесной логистики, обеспечивающей прослеживаемость, контроль и устойчивое развитие отрасли.*

Ключевые слова: *учёт древесины, глубокое обучение, блокчейн, транспортная логистика, прослеживаемость, цифровые паспорта древесины, интеллектуальные системы.*

Постановка задачи

Учёт древесины и контроль её перемещения от заготовки до покупателя — важная задача лесного хозяйства и логистики. С ростом объёмов торговли древесиной всё больше требуется прозрачность, точность и скорость обработки данных. Надёжные сведения о происхождении древесины помогают выполнять природоохранные нормы, упрощают перевозку, снижают расходы и повышают доверие к системе учёта.

В России учёт древесины по-прежнему ведётся в основном с помощью бумажных документов и отдельных цифровых баз, где часто встречаются ошибки и отсутствует защита от изменений. Это затрудняет проверку законности происхождения древесины, особенно при экспорте. Применяемые способы идентификации — маркировка, бирки, QR-коды — частично решают задачу, но остаются уязвимыми и затратными [1].

Поэтому необходимы новые методы учёта, сочетающие автоматизацию и защиту данных. Перспективным решением является использование нейросетей и компьютерного зрения для распознавания древесины по её внешним признакам, а также блокчейна для безопасного хранения и проверки информации [2,3,4].

Анализ последних исследований

Учёт древесины и контроль её перемещения на практике до настоящего времени во многих случаях осуществляются с использованием бумажных первичных документов и средств физической маркировки. В Российской Федерации основой таких процедур остаются товарно-транспортные накладные, акты заготовки и сопроводительные документы, сведения из которых передаются в государственные информационные системы учёта древесины. С 2025 года функции централизованного контроля выполняет Федеральная государственная информационная система лесного комплекса (ФГИС ЛК), пришедшая на смену системе ЛесЕГАИС. При этом значительная часть информации по-прежнему формируется с участием ручного ввода, что приводит к ошибкам, создаёт предпосылки для искажения данных и затрудняет оперативную проверку законности происхождения древесины на местах [5].

Во многих странах применяются более современные решения. Распространены системы маркировки древесины с RFID-метками, штрихкодами и QR-кодами. В Финляндии и Канаде бревна получают цифровой идентификатор ещё при заготовке и отслеживаются по всей цепочке поставок. Также используется GPS-мониторинг транспорта, перевозящего древесину. Эти методы делают процесс прозрачнее, но зависят от сохранности меток, которые можно повредить или заменить [5, 6].

Учёные также исследуют биометрические способы распознавания древесины по форме торца, структуре колец, цвету и текстуре поверхности. Такие методы показывают высокую точность, но пока редко применяются на практике из-за отсутствия универсальных алгоритмов обработки изображений и проверки данных [6,7].

Цифровые системы учёта древесины развиваются в сторону интеграции с блокчейн-технологиями для прослеживаемости от лесосеки до потребителя [3,4,8,9,10].

Главная проблема существующих решений — разрозненность и уязвимость данных. Даже при использовании электронных реестров не всегда обеспечивается защита данных от несанкционированного изменения и последующей корректировки информации. Поэтому требуется создание системы, объединяющей автоматическое распознавание древесины с технологиями надёжного и неизменяемого хранения информации.

Цель работы

Цель исследования — разработать и проверить на практике метод учёта круглого леса с применением глубокого обучения и блокчейна. Предложенный подход позволяет создавать цифровые паспорта древесины, которые сохраняют данные без изменений, делают их доступными для госорганов, предприятий и таможни, а также повышают точность учёта и эффективность логистики.

Основная часть

Предлагаемый способ учёта круглого леса использует компьютерное зрение, нейросети и блокчейн. Методика позволяет автоматически идентифицировать древесину, создавать цифровой паспорт каждого бревна и записывать данные в распределённый реестр без возможности изменения. Архитектура метода учета круглого леса изображена на рисунке 1.

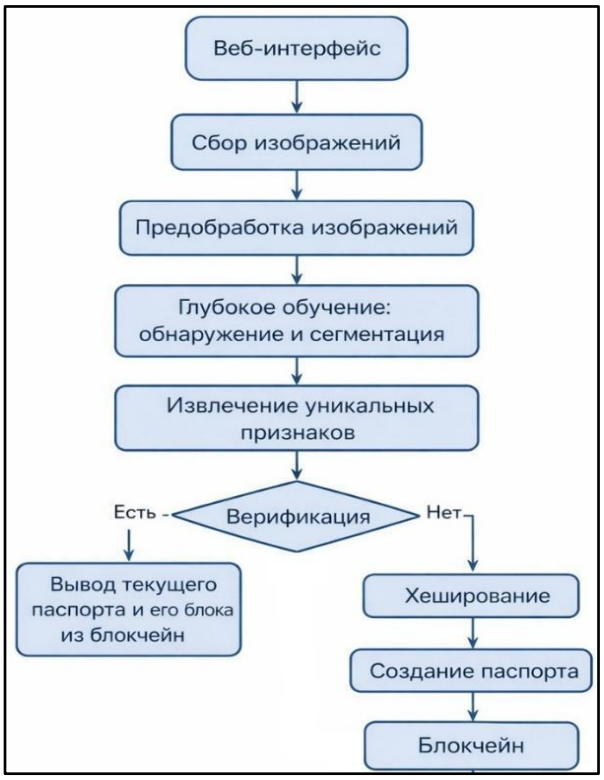


Рис. 1. Архитектура метода учёта

Предлагаемый метод учёта древесины основан на анализе внешних характеристик сортиментов, получаемых по цифровым изображениям торцов. На этапе обработки данных с применением нейросетевых алгоритмов выполняется извлечение индивидуальных признаков объекта, на основе которых формируется уникальный цифровой хеш [11,12,13]. Сформированный хеш используется для проведения процедуры верификации и последующего сопоставления с ранее зарегистрированными записями. Информация о цифровом паспорте фиксируется в распределённом реестре на основе блокчейн-технологии, что обеспечивает целостность данных и исключает возможность их несанкционированного изменения.

В рамках предлагаемого метода в блоке глубокого обучения формируется нейросетевая модель, предназначенная для автоматического анализа изображений торцов круглого леса. Модель решает задачи детекции бревен на изображении, сегментации торцевых поверхностей и извлечения информативных признаков, используемых для последующей идентификации и верификации объектов. Результатом работы модели является набор признаков, описывающих геометрические и текстурные характеристики торца, на основе которых формируется уникальное представление объекта в цифровом виде.

Для сбора изображений используются два метода. В производственных условиях камеры фиксируют древесину во время ее перемещения по транспортеру или степфидеру, что позволяет осуществлять учёт на начальном этапе. Во время инспекций фотографии выполняются сотрудниками таможенных и контрольных органов для мониторинга перевозки и хранения [14].

После того, как торцы древесины зафиксированы, начинается этап обработки изображений. Нейросетевые алгоритмы осуществляют идентификацию и выделение бревен, после чего выполняется сегментация торца и нормализация изображения. Затем вычисляются ключевые точки и дескрипторы текстурных характеристик древесины, на основе которых создаётся вектор признаков, предназначенный для последующей

верификации.

Для обучения использовался самостоятельно созданный датасет, который включает фотографии торцов круглого леса (ель и сосна). Все изображения были сделаны на территории лесобазы 25 Лесозавода при поддержке ГК «Титан». В общей сложности было собрано 525 фотографий, а после применения аугментации количество изображений возросло до 1244. Аннотации датасета включают 6356 разметок торцов бревен и использовались для задач детекции и сегментации. Для задачи детекции применялись ограничивающие прямоугольники (bounding boxes), охватывающие каждый торец древесины. Для задачи сегментации использовались пиксельные маски, точно повторяющие форму торца. Все аннотации относятся к одному обобщённому классу «log» без разделения по породам древесины, поскольку целью исследования являлась идентификация уникальных визуальных характеристик торцов, а не классификация по биологическим признакам. Разметка применялась в рамках экспериментальной версии датасета под рабочим обозначением «v3».

При аугментации данных применялись следующие методики: горизонтальное и вертикальное отражение, обрезка с минимальным масштабом 0% и максимальным 20%, а также изменение насыщенности в диапазоне от -25% до +25%. Аннотированные изображения содержат различные количества аннотаций: 1 аннотация на 8 изображениях, 2–12 аннотаций на 308 изображениях, от 13 до 23 аннотаций на 163 изображениях, 24–34 аннотации на 31 изображении, от 35 до 45 аннотаций на 13 изображениях, и 46–56 аннотаций на 3 изображениях.

Выбор облегчённой версии модели YOLOv8s обусловлен необходимостью обеспечения баланса между точностью распознавания и скоростью обработки изображений [11,13]. Предполагается использование системы в производственных условиях, где вычислительные ресурсы могут быть ограничены, а обработка данных должна выполняться без значительных задержек. Более крупные варианты архитектуры YOLOv8 (m, l, x), а также более поздние версии семейства YOLO, ориентированы преимущественно на повышение точности за счёт увеличения числа параметров модели, что сопровождается ростом требований к аппаратному обеспечению и увеличением времени обработки. В рамках данной работы сравнительный анализ архитектур не являлся целью исследования, а выбранная модель YOLOv8s показала достаточный уровень точности для практического применения. Использование более новых версий архитектуры YOLO рассматривается как направление дальнейших исследований. Также YOLO хорошо справляется с низким разрешением изображений, что полезно для камер низкого качества или для снимков, сделанных с дистанции [11,15].

Модель YOLOv8s была обучена на изображениях разных разрешений: 640x640, 1280x1280 и 1920x1920 пикселей. Обучение проводилось в 12 экспериментах, и наилучшие результаты были получены на 41 эпохе для детекции и 30 эпохах для сегментации. Время обучения составило 1.43 часа на GPU Tesla K80 с 13 Гб видеопамяти. Для оценки производительности модели использовались ключевые метрики, такие как точность классификации (precision), а также дополнительные метрики для сегментации и детекции (recall, mAP, mAP50) [11,12]. Результаты тестирования показали, что модель обладает высокой точностью: для классификации mAP составил 97.6%, precision — 92.7%, а recall — 95.4%. Для сегментации mAP был равен 96.2%, precision — 92.6%, и recall — 88.3%, что подтверждает высокую эффективность модели в обеих задачах. Метрики обучения моделей можно увидеть на рисунках 2 и 3 соответственно.

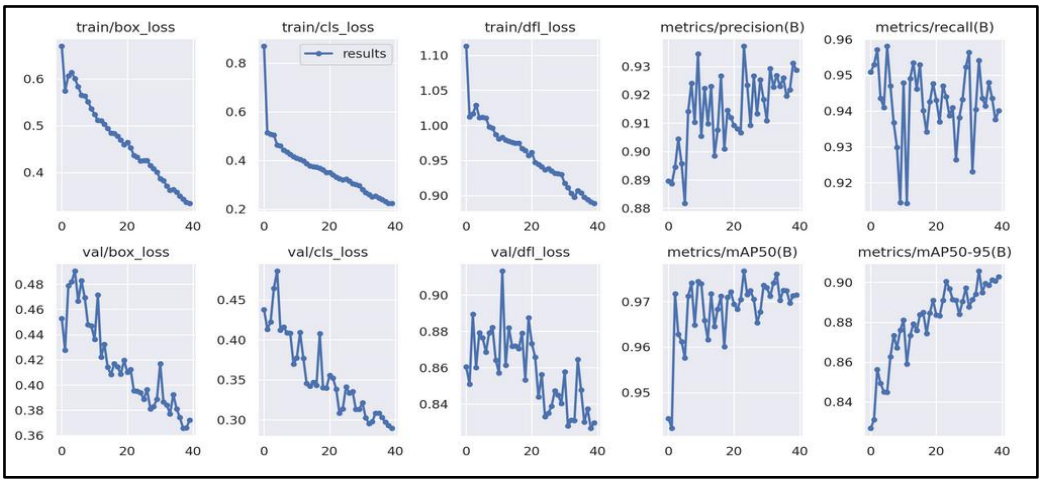


Рис. 2. Обучение классификации (40 эпох)

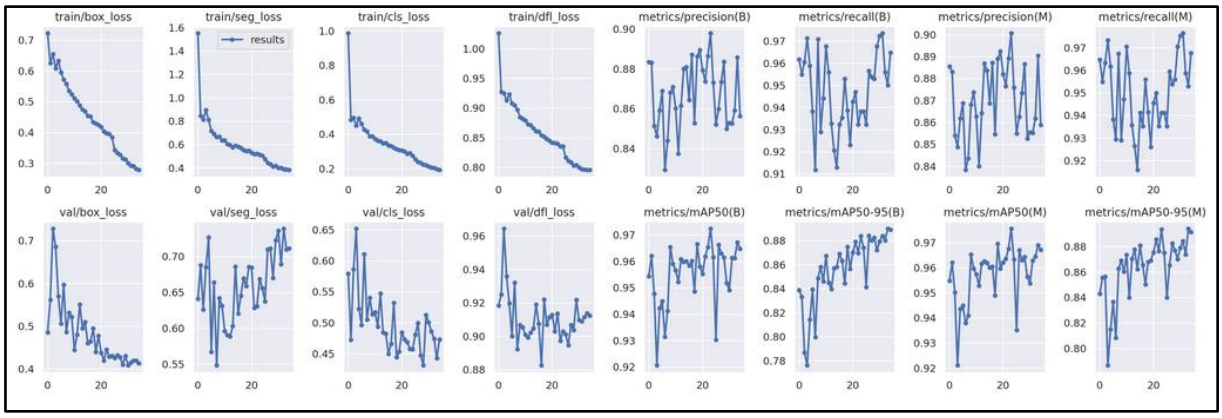


Рис. 3. Обучение сегментации (30 эпох)

Процесс обработки одного изображения занимает от 0,7 до 1 секунды при выполнении вычислений в облачной среде Google Colab с использованием графического ускорителя NVIDIA Tesla K80 (13 Гб видеопамяти). Указанные значения времени обработки носят оценочный характер и зависят от конфигурации вычислительной среды. Достигнутая производительность позволяет обеспечивать контроль потоков до 200 бревен в час на одной производственной линии без возникновения задержек на этапе анализа изображений.

На следующем этапе осуществляется верификация: вычисленные признаки сопоставляются с уже имеющимися цифровыми паспортами, которые хранятся в блокчейн-системе. Если степень совпадения превышает 90%, система распознает объект как ранее зарегистрированный и извлекает соответствующий цифровой паспорт вместе с историей его перемещений. В случае, если совпадения не обнаружено во время проверки, система выдаёт сигнал. В производственных условиях в таком случае генерируется уникальный цифровой хеш, и создаётся новый цифровой паспорт, который затем добавляется в блокчейн.

Цифровой паспорт формируется на основании хеша и содержит ключевые точки, оригинальное изображение торца, данные о владельце, координаты и время фиксации, а также дополнительные метаданные. Все сформированные паспорта сортиментов записываются в цепочку блокчейн и содержат информацию целостности, что позволяет отслеживать происхождение и защищает их от фальсификации [14]. При верификации

система сравнивает существующие паспорта и проверяет целостность цепочки блокчейна.

Визуализация и анализ – главные аспекты системы. Интерактивная карта с географией лесопромышленных компаний, модуль активности пользователей системы в лице представителей государственного контроля и лесопромышленных компаний – такие инструменты помогают формировать цифровую экосистему, которая объединяет всех участников и помогает снизить риск потерь лесных ресурсов, подделки сопроводительной документации, повышает прозрачность движения древесины.

Платформа WoodBlock была создана для проверки предложенной методики. Разработка шла поэтапно, что позволило постепенно добавлять функционал и тестировать ключевые части. В версии 1.0.2 улучшена функциональность, и система стала ближе к промышленному использованию. Платформа основана на Python, Django и MariaDB, что обеспечивает стабильную работу. Реализованы регистрация пользователей, создание цифровых паспортов древесины с изображениями и метаданными, ведение реестров компаний и проверка изображений с точностью до 96%. Также ведется мониторинг работы через журналы и отчёты.

Во второй версии улучшен процесс создания паспортов: загружаются фотографии торцов, нейросеть генерирует хеш и записывает паспорт в блокчейн. При повторной проверке изображения сравниваются с сохранёнными данными, что помогает обнаружить повторный учёт.

Переход от версии 1.0.1 к 1.0.2 показал возможность интеграции с государственными системами учёта древесины. Первый прототип проверил алгоритмы, второй предложил дополнительные функции и интерфейс для пользователей. Эксперименты подтвердили работоспособность методики в реальных условиях. Система успешно выполняла сегментацию изображений, выделение торцов бревен и подготовку изображений для анализа. На основе снимков формировались уникальные цифровые хеши, которые сохранялись в блокчейне. При повторной загрузке изображений система точно идентифицировала уже зарегистрированные бревна с точностью более 90% и извлекала их цифровые паспорта; в случае отсутствия совпадений создавался новый паспорт.

На текущем этапе была проведена серия экспериментов, направленных на валидацию методологии. Основное внимание уделялось проверке точности работы нейросетей при анализе изображений круглого леса и тестированию надежности хранения данных в блокчейн-системе, как показано на рисунке 4. Для повышения объективности и воспроизводимости результатов была сформирована таблица, содержащая параметры, ожидаемые результаты, фактические измерения и выводы по каждому тесту.

В ходе проведённых экспериментов были обучены несколько версий моделей с разнообразными параметрами, включая конфигурации датасетов, разрешение изображений и стратегии аугментации. Обширные конфигурации экспериментов позволили добиться точности классификации моделей до 95% и 96,2% для сегментации. С целью повышения надёжности хранения информации в системе был реализован механизм проверки целостности данных на основе блокчейн-технологии. Дополнительно разработан модуль мониторинга работы нейросетевых моделей, используемых для анализа изображений. Данный модуль применяется для отслеживания состояния алгоритмов в процессе эксплуатации и фиксации возможных ошибок, возникающих при обработке данных. В ходе тестирования было установлено, что разработанное решение обеспечивает стабильные значения точности при анализе изображений, а также корректность хранения и последующей проверки данных. Это

позволяет рассматривать предложенный подход как применимый для задач учёта круглого леса в условиях практического использования.

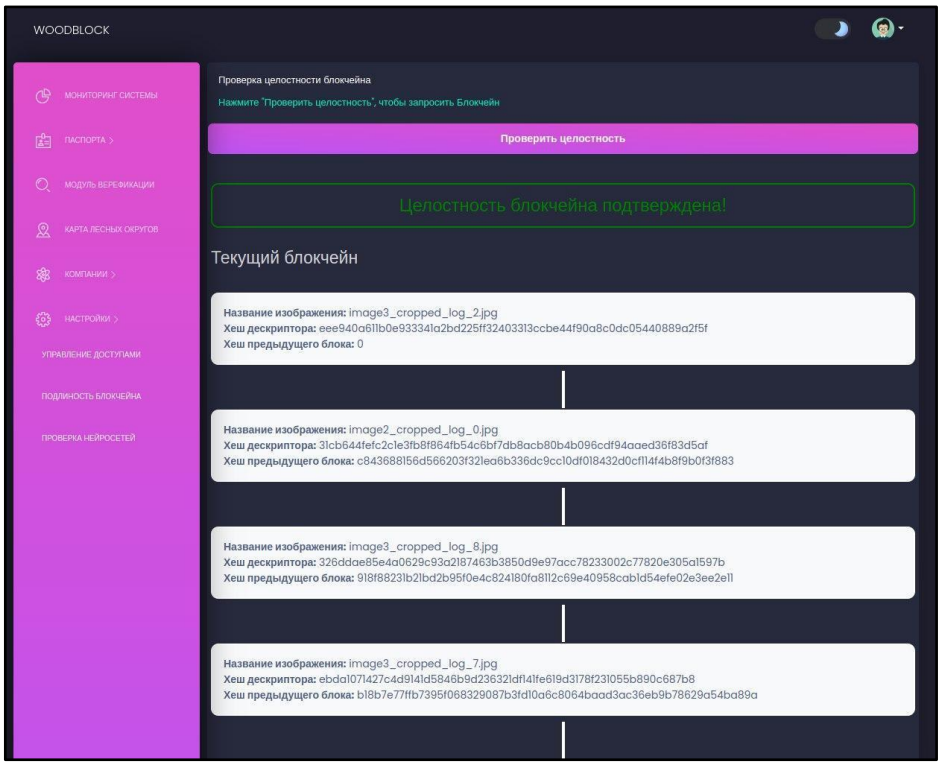


Рис. 4. Проверка целостности блокчейна

Программно-аппаратная реализация информационной системы ориентирована на использование типовой серверной и облачной инфраструктуры без требований к специализированным вычислительным комплексам. Серверная часть системы развёртывается в среде Linux и реализована с использованием фреймворка Django и СУБД MariaDB. Для выполнения задач детекции и сегментации изображений используются нейросетевые модели, работающие на графических ускорителях с поддержкой CUDA.

Экспериментальная апробация алгоритмов обработки изображений проводилась в облачной среде Google Colab с использованием графического ускорителя NVIDIA Tesla K80 с объёмом видеопамяти 13 ГБ. Указанная конфигурация обеспечивала выполнение полного цикла обработки одного изображения, включающего детекцию, сегментацию и извлечение признаков, в среднем за 0,7–1,0 секунды. Данный показатель позволяет обрабатывать до 200 бревен в час на одной производственной линии при последовательной подаче изображений.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вычислительной производительности используемой аппаратной платформы достаточно для стабильной работы нейросетевых моделей в задачах учёта древесины. При развертывании системы в промышленных условиях допускается масштабирование вычислительных ресурсов за счёт применения более производительных GPU или распределённой обработки, что позволяет адаптировать решение под различные объёмы входных данных и требования к скорости обработки.

Таблица 1

Тестирование интеллектуальной транспортно-логистической системы

№	Объект тестирования	Параметры	Ожидаемый результат	Полученный результат	Вывод
1	Нейросеть для детекции бревен	Модель YOLOv8s для детекции объектов на изображениях с разрешением 1920×1920. Параметры: датасет без аугментации	Точность ≥ 90%	91.4%	Удовлетворительный уровень точности
2	Нейросеть с аугментацией	Модель YOLOv8s с аугментацией (горизонтальное и вертикальное отражение, обрезка, изменение насыщенности) с разрешением 1920×1920	Повышение точности на 2–5%	95.0%	Аугментация повышает устойчивость модели
3	Сегментация торцов	Segment Anything + кастомная маска	Точность сегментации ≥ 95%	96.2%	Высокая точность подтверждает надежность
4	Блокчейн: проверка целостности	Вставка, удаление, подмена блоков	Отклонение некорректных записей	Ошибка при подмене / отклонение	Система устойчиво предотвращает искажения
5	Верификация хеша	Повторная загрузка изображения одного и того же бревна	Совпадение хешей	Совпадение 100%	Алгоритм хеширования стабилен
6	Проверка нейросетевых сбоев	Введение шумов и искажений на входных изображениях	Снижение точности, уведомление	Снижение до 88%, алерт активен	Система мониторинга эффективно работает
7	Скорость работы блокчейна	Запись 100 паспортов подряд	< 2 сек. на запись	1.7 сек	Система справляется с промышленной нагрузкой

Разработанная система может помочь надзорным службам отслеживать деятельность компаний и использоваться на лесозаводах и сортировочных линиях, на которых камеры фиксируют торцы сортимента. Данная информация обрабатывается нейросетями, формируются цифровые паспорта, которые сохраняются в блокчейне без необходимости ручного ввода. Компании и перевозчики могут создавать цифровой пакет паспортов для каждой партии, который сопровождает древесину и передаётся в государственные системы учёта, что снижает риск подмены данных. Таможенные службы используют систему для проверки снимков торцов с базой паспортов, что позволяет подтверждать законность происхождения древесины или выдавать предупреждения о несоответствиях. Государственные органы, через модуль визуализации, могут осуществлять контроль за распределением древесины по регионам, а данные из блокчейна могут интегрироваться в федеральные системы для анализа [8].

Проведённые испытания показали, что разработанная система в целом устойчива к возникновению ошибок и способна обрабатывать значительные объёмы данных без заметных задержек. Использование блокчейн-технологии обеспечивает неизменность хранимой информации, тогда как нейросетевые модели позволяют выявлять индивидуальные признаки древесины с достаточной точностью для практических задач.

Процесс формирования цифровых паспортов автоматизирован и не требует значительных временных затрат, что упрощает применение системы в производственных и контрольных условиях.

При сравнении с традиционными подходами следует отметить, что использование бумажной документации связано с повышенной вероятностью ошибок и возможностью подделки, а процедуры проверки данных, как правило, занимают больше времени. Маркировочные системы, несмотря на относительную простоту внедрения, подвержены утрате или повреждению меток и требуют дополнительных затрат на обслуживание. Ряд зарубежных решений основан на централизованных базах данных, что потенциально снижает уровень защищённости информации. В предлагаемом подходе используется децентрализованное хранение и верификация данных на основе блокчейна, что позволяет обеспечить прозрачность и прослеживаемость цепочки поставок.

Ключевые преимущества предложенной методики включают неизменяемость и проверяемость данных, автоматизированную регистрацию древесины, подтверждение уникальности с помощью цифрового хеша, возможность использования как на производстве, так и при проверках, прослеживаемость от заготовки до вывоза, а также масштабируемость и интеграцию с государственными системами. Однако существуют и ограничивающие факторы, такие как необходимость установки камер на производстве, зависимость качества распознавания от условий съёмки и необходимость доработки алгоритмов для работы с большими объёмами данных. Перспективные направления развития включают увеличение устойчивости нейросетей, расширение функционала блокчейна и подключения к федеральным и международным системам учёта. Разработанная система обеспечивает прозрачный учёт древесины, устраняет недостатки традиционных методов и закладывает основу для цифровой трансформации учёта лесных ресурсов. Техническая архитектура средств системы показана на рисунке 5.

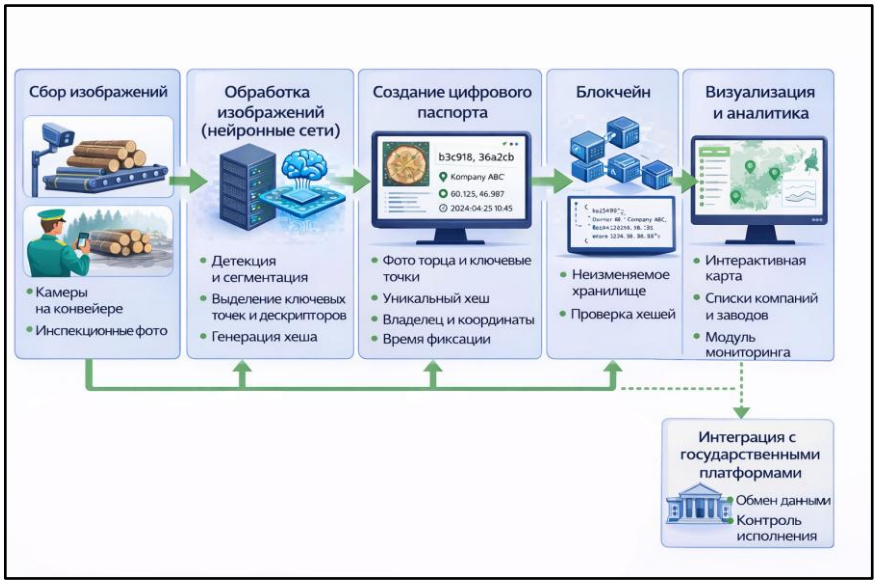


Рис. 5. Архитектура системы

Модуль для сбора изображений включает в себя камеры, установленные на конвейере, которые фиксируют древесину в процессе ее перемещения, а также фотоснимки, сделанные инспекторами для контроля на всех стадиях транспортировки и хранения. Обработка изображений, выполняемая нейросетями, занимается детекцией и сегментацией объектов, извлечением ключевых точек и дескрипторов древесины, а также созданием уникальных хешей для каждого объекта. Модуль генерации цифрового

паспорта создаёт паспорт на основе хеша, включая изображение торца, ключевые точки, данные о владельце и местоположении, а также время фиксации, что позволяет точно идентифицировать бревно. Блокчейн используется для безопасного хранения данных и проверки хешей, обеспечивая их защиту и возможность верификации [8]. Модуль визуализации включает интерактивную карту с местоположением предприятий, списки участников системы и мониторинг для анализа операций. Вся информация интегрируется с государственными платформами для обмена данными и контроля соблюдения законодательства.

Выводы

В рамках данной работы разработан и экспериментально проверен метод учёта круглого леса, основанный на совместном использовании методов глубокого обучения и блокчейн-технологии. Целью исследования являлась разработка и практическая проверка программно-аппаратного решения, обеспечивающего формирование цифровых паспортов древесины и сохранение связанных с ними данных в неизменяемом виде. Предложенный подход позволяет формировать цифровые паспорта древесины, обеспечивающие неизменяемость данных и их доступность для государственных органов, лесозаготовительных предприятий и таможенных структур, а также повышает эффективность контроля логистических операций.

Разработанный прототип системы был апробирован на выборке, сформированной на основе данных о транспортных операциях с древесиной. В ходе экспериментов была достигнута точность распознавания объектов на уровне более 90 %, что является достаточным для практического применения. Полученные показатели точности распознавания напрямую влияют на корректность формирования цифровых паспортов и, как следствие, на повышение точности учёта древесины в системе. Также была проверена возможность интеграции системы с существующими государственными учётными платформами, при этом подтверждена корректная передача и верификация данных.

Экспериментальные результаты показали, что цифровые паспорта древесины, сформированные системой, сохраняют целостность на протяжении всего жизненного цикла и не подвержены изменениям после записи в блокчейн. Информация о перемещении древесины может быть проверена в процессе эксплуатации, что повышает прозрачность учёта и снижает вероятность ошибок, связанных с ручной обработкой данных.

Следует отметить, что используемые алгоритмы обработки изображений, включая сегментацию и формирование хеш-значений, продемонстрировали стабильную работу в ходе тестирования. Это позволяет рассматривать предложенное решение как применимое для использования в реальных условиях с учётом дальнейшей доработки и масштабирования.

В ходе развития программного прототипа (версия WoodBlock 1.0.2) были реализованы дополнительные функции, в том числе механизмы регистрации пользователей, формирования цифровых паспортов древесины, а также средства визуализации и мониторинга данных. Повторные испытания подтвердили стабильность работы системы и возможность её дальнейшей интеграции с государственными и промышленными информационными системами.

В качестве направлений дальнейших исследований рассматривается расширение функциональности системы за счёт масштабирования инфраструктуры и использования смарт-контрактов для фиксации операций с древесиной. Кроме того, предложенный подход может быть адаптирован для применения в рамках международных проектов,

связанных с цифровизацией лесного хозяйства и задачами устойчивого управления природными ресурсами.

Список литературы

1. Коновалова Ю. С., Бурцев Д. С. Управление цифровой трансформацией предприятий: оценка её уровня в компаниях деревообрабатывающей промышленности // Управленческие науки = Management Sciences. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 90–104. – DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-4-90-104.

2. Гишлакаев С. У., Джангаров А. И., Шахбанова З. И. Цифровая экономика и устойчивое развитие: роль цифровых технологий в решении экологических и социальных проблем // Региональная и отраслевая экономика. – 2023. – № 2. – С. 169–177. – DOI: 10.47576/2949-1916_2023_2_169.

3. Stopfer L., Kaulen A., Purfürst T. Potential of blockchain technology in wood supply chains // Computers and Electronics in Agriculture. – 2024. – Vol. 216. – Art. 108496. – DOI: 10.1016/j.compag.2023.108496.

4. Damaševičius R., Mozgeris G., Kurti A. Digital transformation of the future of forestry: blockchain, IoT, and AI for Forest 4.0 // Forests and Global Change. – 2024. – Vol. 7. – Art. 1424327. – DOI: 10.3389/ffgc.2024.1424327.

5. Мураев И. М., Сушко О. П. Анализ результатов пилотного внедрения Федеральной государственной информационной системы лесного комплекса (ФГИС ЛК) в Архангельской области // BIO Web of Conferences. – 2024. – Т. 145. – Ст. 04003. – DOI: 10.1051/bioconf/202414504003.

6. Васенёв М. Ю. Информационная система управления лесозаготовками в рамках концепции «Индустрия 4.0»: структура и оценка эффективности // Экономика. Информатика. – 2022. – Т. 49, № 2. – С. 383–393. – DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-383-393.

7. Silva [et al.]. A Systematic Review of Timber Tracking and Tracing in Forest and Timber Industry Supply Chain // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2026.

8. Федоров В. Ю., Халяпин Д. Р. Blockchain для леса: обеспечение прослеживаемости древесины от делянки до потребителя // Лесное хозяйство в условиях глобальных вызовов: новые парадигмы устойчивого развития : материалы Международного лесного форума, приуроченного к празднованию 95-летия ВГЛТУ, Воронеж, 30 сентября 2025 г. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2025. – С. 690–699. – DOI: 10.58168/Forestry2025_690-699.

9. Voronezh State University of Forestry Technologies. Blockchain for forest: ensuring traceability of wood from plot to consumer // Материалы Международного лесного форума; Воронеж, 2025. – С. 690–699. – DOI: 10.58168/Forestry2025_690-699.

10. Blockchain for sustainable forest management: how digital technologies help control logging // Proceedings: Energy-Saving and Environmentally Safe Timber Technologies, 2025. – С. 171–174. – DOI: 10.58168/E-SESTTI2025_171-174.

11. Марков Н. Г. Модели и методы глубокого обучения для решения задач дистанционного мониторинга лесных ресурсов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 6. – С. 55–74. – DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600.

12. Song T., Duong V.-D., Le T.-P., Ta T. V. Deep learning for automated identification of Vietnamese timber species // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2503. 12345 [cs.CV]. – URL: https://arxiv.org/abs/2503.12345 (дата обращения: 15.03.2026).

13. Nieradzik L., Stephani H., Sieburg-Rockel J. et al. WoodYOLO: A novel object detector for wood species detection in microscopic images // arXiv preprint. – 2024. –

arXiv:2410.12345 [cs.CV]. – URL: https://arxiv.org/abs/2410.12345 (дата обращения: 15.03.2026).

14. Грибунов О. П., Косых В. А. Информационные технологии в системе противодействия незаконному обороту леса // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. – 2023. – № 4 (107). – С. 143–156. – DOI: 10.55001/2312-3184.2023.44.62.013.

15. Wielgosz M., Puliti S., Xiang B. et al. SegmentAnyTree: Deep learning model for tree segmentation from LiDAR data // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2411.12345 [cs.CV]. – URL: https://arxiv.org/abs/2411.12345 (дата обращения: 15.03.2026).

References

1. Konovalova, Yu.S. and Burtsev, D.S. (2023), "Upravlenie tsifrovoy transformatsiey predpriyatiy: otsenka eye urovnya v kompaniyakh derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti" [Managing the digital transformation of enterprises: assessing its level in woodworking industry companies], *Management Sciences*, vol. 13, no. 4, pp. 90–104. DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-4-90-104.

2. Gishlakaev, S.U., Dzhangarov, A.I. and Shakhbanova, Z.I. (2023), "Tsifrovaya ekonomika i ustoychivoe razvitie: rol' tsifrovykh tekhnologiy v reshenii ekologicheskikh i sotsial'nykh problem" [Digital economy and sustainable development: the role of digital technologies in solving environmental and social problems], *Regional'naya i otraslevaya ekonomika*, no. 2, pp. 169–177. DOI: 10.47576/2949-1916_2023_2_169.

3. Stopfer, L., Kaulen, A. and Purfürst, T. (2024), "Potential of blockchain technology in wood supply chains", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 216, art. 108496. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108496.

4. Damaševičius, R., Mozgeris, G. and Kurti, A. (2024), "Digital transformation of the future of forestry: blockchain, IoT, and AI for Forest 4.0", *Forests and Global Change*, vol. 7, art. 1424327. DOI: 10.3389/ffgc.2024.1424327.

5. Muraev, I.M. and Sushko, O.P. (2024), "Analiz rezul'tatov pilotnogo vnedreniya Federal'noy gosudarstvennoy informatsionnoy sistemy lesnogo kompleksa (FGIS LK) v Arkhangel'skoy oblasti" [Analysis of the results of the pilot implementation of the Federal State Information System of the Forest Complex (FSIS FC) in the Arkhangelsk region], *BIO Web of Conferences*, vol. 145, art. 04003. DOI: 10.1051/bioconf/202414504003.

6. Vasenev, M.Yu. (2022), "Informatsionnaya sistema upravleniya lesozagotovkami v ramkakh kontseptsii 'Industriya 4.0': struktura i otsenka effektivnosti" [Information system for logging management within the framework of the "Industry 4.0" concept: structure and efficiency assessment], *Ekonomika. Informatika*, vol. 49, no. 2, pp. 383–393. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-383-393.

7. Silva et al. (2026), "A Systematic Review of Timber Tracking and Tracing in Forest and Timber Industry Supply Chain", *Croatian Journal of Forest Engineering*.

8. Fedorov, V.Yu. and Khalyapin, D.R. (2025), "Blockchain dlya lesa: obespechenie proslezhivaemosti drevesiny ot delyanki do potrebitelya" [Blockchain for the forest: ensuring traceability of wood from the cutting area to the consumer], *Lesnoe khozyaystvo v usloviyakh global'nykh vyzovov: novye paradigmy ustoychivogo razvitiya* [Forestry in the context of global challenges: new paradigms of sustainable development], proceedings of the International Forest Forum dedicated to the 95th anniversary of VGLTU, Voronezh, September 30, 2025, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia, pp. 690–699. DOI: 10.58168/Forestry2025_690-699.

9. Voronezh State University of Forestry Technologies (2025), "Blockchain for forest: ensuring traceability of wood from plot to consumer", *Proceedings of the International Forest Forum*, Voronezh, Russia, pp. 690–699. DOI: 10.58168/Forestry2025_690-699.

10. (2025), "Blockchain for sustainable forest management: how digital technologies help control logging", *Proceedings: Energy-Saving and Environmentally Safe Timber Technologies*, pp. 171–174. DOI: 10.58168/E-SESTTI2025_171-174.

11. Markov, N.G. (2024), "Modeli i metody glubokogo obucheniya dlya resheniya zadadch distantsionnogo monitoringa lesnykh resursov" [Models and methods of deep learning for solving problems of remote monitoring of forest resources], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. 335, no. 6, pp. 55–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600.

12. Song, T., Duong, V.-D., Le, T.-P. and Ta, T.V. (2025), "Deep learning for automated identification of Vietnamese timber species", *arXiv preprint*, arXiv:2503.12345 [cs.CV]. Available at: https://arxiv.org/abs/2503.12345 (Accessed 15 March 2026).

13. Nieradzik, L., Stephani, H., Sieburg-Rockel, J. et al. (2024), "WoodYOLO: A novel object detector for wood species detection in microscopic images", *arXiv preprint*, arXiv:2410.12345 [cs.CV]. Available at: https://arxiv.org/abs/2410.12345 (Accessed 15 March 2026).

14. Gribunov, O.P. and Kosykh, V.A. (2023), "Informatsionnye tekhnologii v sisteme protivodeystviya nezakonnomu oborotu lesa" [Information technologies in the system of combating illegal timber trafficking], *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii*, no. 4 (107), pp. 143–156. DOI: 10.55001/2312-3184.2023.44.62.013.

15. Wielgosz, M., Puliti, S., Xiang, B. et al. (2024), "SegmentAnyTree: Deep learning model for tree segmentation from LiDAR data", *arXiv preprint*, arXiv:2411.12345 [cs.CV]. Available at: https://arxiv.org/abs/2411.12345 (Accessed 15 March 2026)

Gaydarenko A.S., Vasendina I.S.

INTELLIGENT TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM FOR ROUNDWOOD TRACKING BASED ON DEEP LEARNING AND BLOCKCHAIN

Abstract. *This paper presents an approach to creating an intelligent transport and logistics system for tracking roundwood, combining deep learning methods and distributed ledger technologies. The relevance of the work is determined by the need to increase transparency and reliability of data on the movement of timber from harvesting sites to end consumers. The proposed architecture includes a computer vision module that automatically identifies timber from end-face images, generating a digital passport, while blockchain ensures immutability and verifiability of the recorded information. The system is designed for integration with existing governmental forest monitoring platforms and the information resources of transport and logistics enterprises. The prototype was tested on a sample of transport operations, which confirmed the applicability of the approach for improving accounting accuracy and optimizing logistics processes. The developed methodology can serve as a foundation for building a digital ecosystem for forest logistics, ensuring traceability, control, and sustainable industry development.*

Keywords: *timber tracking, deep learning, blockchain, transport logistics, traceability, digital timber passports, intelligent systems.*

Сведения об авторах:

Гайдаренко Александр Сергеевич
Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия
Аспирант
e-mail: gajdarenkosasha@gmail.com

Васендина Ирина Сергеевна
Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия
Кандидат технических наук, доцент
e-mail: i.vasendina@narfu.ru

Information about the authors:

Gaidarenko Alexander Sergeevich
Northern (Arctic) Federal University named after Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
Postgraduate Student
e-mail: gajdarenkosasha@gmail.com
Vasendina Irina Sergeevna
Northern (Arctic) Federal University named after Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: i.vasendina@narfu.ru

УДК 004.89 : 343.346.2

Двуреченская Н.А., Жаурова Д.С., Полетайкин А.Н.

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ВНЕСЕНИЮ ИЗМЕНЕНИЙ В ПДД

Аннотация. *Рассматривается построение комплексной математической модели, оценивающей влияние ключевых факторов ДТП и генерацию предложений по модификации ПДД. Модель комплексирует интеллектуальные подмодели на основе методов интеллектуального анализа данных. Реализация алгоритмов выполнена с использованием языка программирования Python и его специализированных открытых программных библиотек. Предусмотрена интеграция с внешними источниками данных, такими как официальный сайт ГИБДД и ресурсы регионального Министерства транспорта. Результатом работы является перечень проблем и предложений для модификации ПДД. Научная новизна заключается в комплексном применении методов класса Data Mining для определения ключевых факторов возникновения и тяжести ДТП и выработки предложений по модификации ПДД. Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанной модели в рамках аппаратно-программного комплекса «Безопасный город», предназначенного для повышения безопасности дорожного движения.*

Ключевые слова*: Data Mining, безопасность дорожного движения, ключевые факторы ДТП, интеллектуальная генерация решений, комплексная модель, модификация ПДД.*

Постановка задачи

Безопасность дорожного движения (БДД) по-прежнему остается одной из приоритетных задач государства и общества. С каждым годом во всем мире увеличивается разработка интеллектуальных систем, реализация проектов, связанных с обустройством дорог, и вносятся изменения в законодательство, но уровень аварийности продолжает расти. Например, в Новосибирской области, по данным на сентябрь 2025 года, зарегистрировано 2026 дорожно-транспортных происшествий (ДТП), что на 13,8% больше по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Поэтому необходимо применять методы интеллектуального анализа данных для выявления ключевых (наиболее значимых) факторов, влияющих на возникновение и тяжесть ДТП.

Следует отметить, что классические статистические методы анализа не позволяют в полной мере выявлять скрытые закономерности, взаимодействия признаков и сложные нелинейные зависимости. В связи с этим возникает необходимость применения методов класса Data Mining, позволяющих определять ключевые факторы, влияющие на возникновение и тяжесть ДТП, а также формировать рекомендации по корректировке Правил дорожного движения (ПДД).

Анализ последних исследований подтверждается существенным ростом числа публикаций за последние четыре года, которые посвящены применению машинного обучения для анализа ДТП. Исследователи привносят новые эксперименты, результаты,

охватывающие широкий круг вопросов: выявление факторов аварийности, прогнозирование вероятности возникновения и тяжести последствий, анализ поведенческих моделей участников движения, оценку эффективности действующих норм ПДД и др. Так, во всем мире активно применяют алгоритмы машинного обучения, демонстрирующие высокую эффективность в анализе ДТП. В зарубежных работах [1, 2] лучшие результаты показали модели логистической регрессии и случайного леса соответственно, а в обзорах [3, 4] подчеркивается метод случайного леса, способствующий повышению БДД. В отечественных работах предпочтение также отдается случайному лесу. В статье [5] наилучший результат при прогнозировании тяжести ДТП показал метод случайного леса. Однако отмечается, что для улучшения модели нужно учитывать транспортный поток. В работе [6] авторы отмечают применимость линейной регрессии как простого и интерпретируемого подхода. В исследованиях [7, 8] авторы применяют случайный лес и выделяют важность факторов дорожного покрытия, недостатки организации дорожного движения и нарушения ПДД.

Тем не менее, несмотря на рост научных публикаций в данной области, вопросы интеграции систем интеллектуального анализа данных в процессы поддержки принятия решений в области обеспечения БДД остаются недостаточно проработанными.

Цель работы

Целью исследования является повышение безопасности дорожного движения в Новосибирской области за счет создания и применения интеллектуальных моделей анализа данных об аварийности и поддержки принятия решений.

Основная часть

1. Источник данных для анализа

В Российской Федерации безопасность дорожного движения регулируется совокупностью нормативно-правовых актов, которые направлены на снижение аварийности, защиту жизни и здоровья участников движения. Одним из ключевых документов является Федеральный Закон от 10.12.1995 № 196–ФЗ «О безопасности дорожного движения», который устанавливает правовые основы обеспечения безопасности на дорогах. Этот закон направлен на предупреждение ДТП, создание системы управления безопасностью, ведение учета, анализа аварийности и определение полномочий органов власти. Существенную роль играет Федеральный закон от 30.12.2001 № 195–ФЗ «Кодекс РФ об административных правонарушениях», призванный регулировать административную ответственность в части БДД. Также значимое место занимает Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090 (ред. от 16.07.2025) «О Правилах дорожного движения», которое определяет требования к поведению водителей, пассажиров и пешеходов и формирует правовую основу для оценки нарушений, являющихся частыми причинами ДТП.

Особое значение для данного исследования имеет программа АПК «Безопасный город», которая разработана в целях обеспечения оперативного реагирования и взаимодействия всех служб, ответственных за обеспечение безопасности, в том числе и транспортной [9]. Проблема транспортной безопасности, включая ДТП, стоит первой в перечне основных техногенных угроз в соответствии с постановлением [10].

В рамках данной программы для организации БДД используются государственные информационные системы (ГИС). Например, в Новосибирской области (НСО) в реестре зарегистрировано около 43 ГИС [11], из которых наибольший интерес для достижения цели исследования представляет ГИС «ИТС НСО» (Интеллектуальная транспортная система НСО), которая предназначена для сбора и анализа данных о дорожном движении, фиксации нарушений, управления транспортными потоками и информирования участников движения. Данная ГИС представляет собой комплексное

решение для мониторинга и управления транспортным потоком. Методологическое сопровождение системы, защиту данных и контроль интеграции с другими ИС обеспечивает Минцифры НСО. Фактический сбор данных, их первичную обработку, хранение и анализ, а также информирование участников дорожного движения выполняет оператор системы – государственное казенное учреждение НСО «Центр организации дорожного движения» [11].

В ГИС «ИТС НСО» формируется значительный объем данных, поступающих из разных источников, которые можно охарактеризовать как большие данные: ежечасно формируются тысячи элементов данных о транспортных потоках, ДТП, нарушениях ПДД, состоянии инфраструктуры, которые включают в себя изображения и видеопотоки, координаты, а также структуры данных в файлах различных форматов. Несмотря на развитую инфраструктуру оператора ГИС, сохраняются проблемы, типичные для систем обработки больших данных:

1) разнородность данных осложняет объединение и анализ, снижая точность прогнозирования транспортных потоков;

2) низкая скорость обработки больших массивов данных ограничивает возможности оперативного управления дорожной системой;

3) высокая нагрузка на операторскую инфраструктуру приводит к задержкам в принятии решений.

Эти ограничения уменьшают эффективность управленческих мер, принимаемых Минтрансом НСО и Минцифры НСО, и влияют на результативность функционирования АПК «Безопасный город». Очевидно, что столь объемные и разнообразные данные требуют применения технологий Big Data и Data Mining. Реализация этих технологий в ИТС позволит получить следующий эффект:

– повышение безопасности на дорогах за счет своевременного выявления нарушений и ДТП;

– оперативное управление дорожным движением и дорожными объектами;

– минимизация ДТП за счет выявления паттернов, связанных с пробелами в ПДД, и внесения соответствующих поправок в соответствующие пункты в рамках проекта АПК «Безопасный город»;

– улучшение информирования участников движения и органов власти;

– повышение общей эффективности функционирования транспортной системы региона.

2. Описание процесса Data Mining

В силу разнообразия данных и множества задач их многоступенчатого анализа процесс обработки данных включает три этапа. На всех этапах используется язык программирования Python и множество его специализированных библиотек. Для долговременного хранения обрабатываемых данных используется СУБД PostgreSQL.

Этап 1. Извлечение данных из источников. На этом этапе данные очищаются от дубликатов, пропусков и ошибок, а также проходят необходимую фильтрацию с использованием библиотек Pandas и NumPy.

Этап 2. Предварительный анализ данных. Выполняется идентификация и оценивание с помощью показателей (факторов) дорожного движения и ДТП и их корреляции, прогнозирование вероятности наступления ДТП и их классификация.

Этапы 1 и 2 были реализованы в рамках авторского исследования [12], где отражена разработка и апробация соответствующих моделей.

Этап 3. Генерация предложений по внесению изменений в ПДД. Выявление устойчивых взаимосвязей между факторами ДТП и нарушениями ПДД, вероятностное и нечеткое моделирование обработки неопределенности вносимых изменений в ПДД.

Схема процесса Data Mining представлена на рисунке 1. Конечный этап процесса заключается в предоставлении аналитических отчетов и визуализаций для ЛПР.

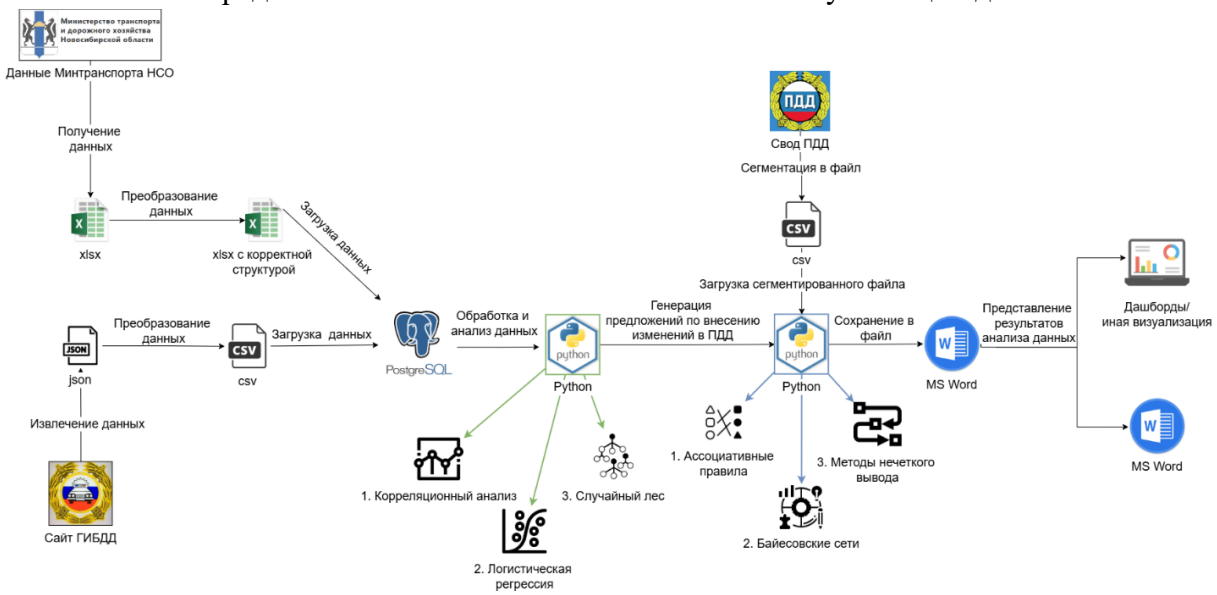


Рис. 1. Схема процесса Data Mining

Для комплексной оценки эффективности всех применяемых моделей используются различные метрики. Для методов классификации применяются Accuracy, Precision, Recall, F1-score, ROC-AUC, а также учитывается вклад признаков. Для метода ассоциативных правил используются Support, Confidence и Lift, а байесовские и нечеткие методы оцениваются по степени корректности и интерпретируемости сформированных правил.

Выбор математических методов

Во всем мире активно применяют алгоритмы машинного обучения, демонстрируя высокую эффективность. В зарубежных работах лучшие результаты показали модели логистической регрессии и случайного леса. Так, в исследовании [2] модель логистической регрессии показывает высокую устойчивость при прогнозировании возникновения ДТП, поскольку линейная структура обеспечивает стабильные коэффициенты и статистически значимые веса факторов, что позволяет проводить качественную интерпретацию вклада каждого признака. В работе [3] лучшим методом выступает случайный лес, который обеспечивает более высокую точность при прогнозировании тяжести ДТП, поскольку способен корректно работать с нелинейными зависимостями, категориальными признаками и взаимодействиями факторов. В обзорах [1, 4] подчеркивается метод случайного леса, способствующий повышению БДД. Он превосходит классические алгоритмы в задачах прогнозирования тяжести последствий и возникновения ДТП за счет оценки важности признаков, устойчивости к шуму и способности работать с несбалансированными данными.

В отечественных работах приоритет отдается также случайному лесу. В статье [5] наилучший результат показывает метод случайного леса, но отмечается, что для улучшения модели нужно знать плотность движения, количество полос движения и тип движения. В исследовании [6] отмечают линейную регрессию как простой и понятный метод, где легко интерпретируются результаты, но для задач классификации она уступает логистической регрессии. А в работе [8] авторы демонстрируют эффективность

алгоритма случайного леса для степени тяжести, при этом одной из главных причин возникновения ДТП является нарушение ПДД.

В рамках сопоставления факторов с положениями ПДД зарубежные исследования применяют различные методы интеллектуального анализа. В работе [3] используется метод ассоциативных правил, который позволяет определять комбинации факторов, влияющих на вероятность получения травм различной тяжести. В статье [13] применяются байесовские сети, позволяющие учитывать пространственные и временны́е зависимости данных и моделировать сложные взаимосвязи между факторами риска. В работе [14] применяется метод нечеткого вывода, который демонстрирует эффективность учета количественных и качественных факторов, включая интенсивность движения, дорожные и погодные условия.

В статье [15] с использованием метода ассоциативных правил выявляются факторы, влияющие на рост тяжести ДТП. В работе [16] байесовские сети применяются для комплексной оценки рисков и анализа совокупного влияния факторов на БДД. В исследовании [17] метод нечеткого вывода позволяет учитывать неопределенность исходных данных и формализовать экспертные знания для оценки уровня опасности ДТП. Таким образом, методы и инструментальные средства, используемые на этапах процесса Data Mining согласно схеме на рисунке 1, показаны в таблице 1.

Таблица 1

Методы и инструментальные средства процесса Data Mining

№	Содержание этапа	Используемые методы	Используемые библиотеки
1	Автоматизированная загрузка и структурирование данных о ДТП и транспортных потоках	POST-запросы к источникам данных, статистический анализ	json, argparse, requests, os, sys, re, pandas, psycopg2, openpyxl, numpy, sqlalchemy
2	Обработка и интеллектуальный анализ данных	Корреляционный анализ, логистическая регрессия, случайный лес	pandas, sqlalchemy, seaborn, matplotlib, statsmodels, scikit-learn, numpy, seaborn
3	Формирование предложений по внесению изменений в ПДД	Ассоциативные методы, байесовские сети, нечеткая логика	pandas, mlxtend, scikit–learn, numpy, pgmpy, pyAgrum, scikit–fuzzy

Разработка комплексной модели

Разрабатываемая модель является комплексной, поскольку существует несколько взаимосвязанных математических методов, каждый из которых решает собственную задачу анализа факторов ДТП и сопоставления их с пунктами ПДД. Структура модели показана на рисунке 2. Рассмотрим ее компоненты и их взаимодействия друг с другом.

Исходные данные о ДТП поступают с официального сайта ГИБДД в формате json, а данные о транспортных потоках – из ГИС «ИТС НСО» в формате xlsx.

Первой моделью в цепи преобразований данных является модель предобработки данных на основе корреляционного анализа. Этот метод применяется для оценки связи и направления между числом ДТП и транспортными потоками на городских и областных дорогах отдельно: скорость, интенсивность, плотность, загруженность, средняя дистанция между объектами (городские параметры) и количество машин, проехавших в прямом и обратном направлении (областные параметры). На основе этой модели рассчитываются абсолютный и относительный вклады каждого параметра в изменение вероятности возникновения ДТП. Проверка адекватности модели проводится путем анализа знака и величины коэффициента корреляции Пирсона.

Следующим методом является логистическая регрессия. Модель используется для бинарной классификации наличия ДТП на заданном участке с учетом множества факторов и применяется отдельно для городских и областных дорог:

$$Y = \begin{cases} 1, если\ хотябыодно\ ДТП\ произошло; \\ 0, иначе. \end{cases}$$

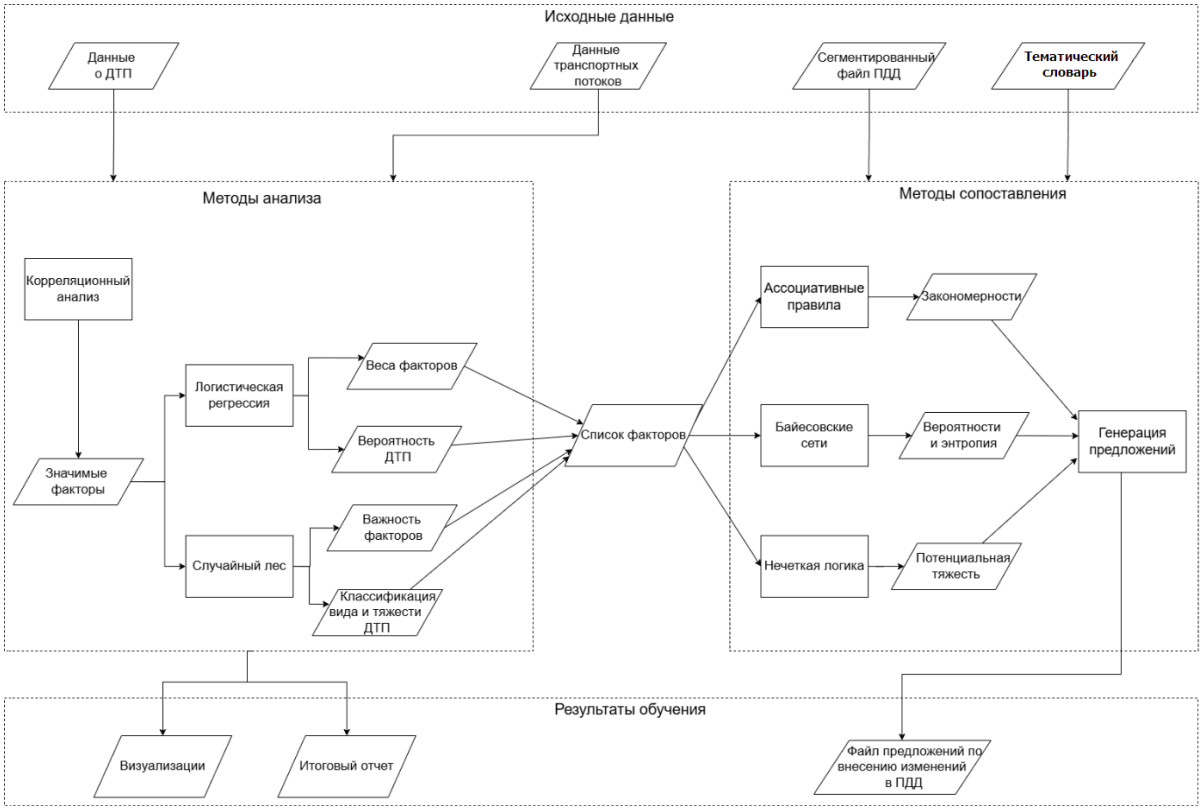


Рис. 2. Функционально-структурная схема комплексной модели

Веса факторов w_i определяются через задачу минимизации суммарной ошибки: $W = (X^T X)^{-1} X^T Y$, где X – матрица факторов, Y – вектор целевых значений. Веса отражают, как изменение каждого фактора влияет на логарифм шансов наступления ДТП [18]. Положительные веса увеличивают риск ДТП при росте признака, а отрицательные – снижают. Для проверки адекватности и достоверности результатов моделирования предусмотрены следующие метрики:

1) Accuracy – доля правильно классифицированных наблюдений;
2) Precision – доля верно предсказанных положительных случаев;
3) Recall – доля корректно выявленных положительных случаев;
4) F1-score – баланс между пунктами 2 и 3;
5) ROC-AUC – площадь под ROC-кривой, характеризующая способность модели различать два класса.

Для классификации видов ДТП и для регрессии тяжести ДТП используется метод случайного леса. Итоговый классификатор для задачи классификации определяется голосованием большинства, а для задачи регрессии – средним. Для задачи регрессии дополнительно используется взвешенное обучение, при котором наблюдения с высокой тяжестью ДТП получают больший вес, что позволяет модели лучше учитывать редкие, но выразительные случаи. Важность признаков формируется иначе, чем веса в логистической регрессии: она рассчитывается на основе уменьшения неопределенности

при разбиениях в узлах деревьев. Для классификации в качестве меры неопределенности используется критерий Джини, вычисляемый как $G(p) = 1 - \sum p_i^2$ где p_i – вероятность класса *i* в узле [19].

Проверка качества случайного леса зависит от типа задачи: для классификации используются Accuracy, Precision, Recall, F1-score и ROC-AUC, а для регрессии – среднеквадратическая ошибка (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2).

Этап 3 открывает модель на основе ассоциативных правил. Алгоритм ассоциативных правил направлен на поиск групп элементов, которые часто встречаются в больших наборах данных [20]. В классической постановке транзакцией называется множество событий, произошедших одновременно. В данной работе транзакция понимается как множество факторов ДТП, зафиксированных одновременно. Результаты сопоставлений сохраняются в PDD_coincidence.csv, а сами правила – в assocPR.csv. Далее применяется метод байесовских сетей. Для оценки информативности факторов используется энтропия, которая характеризует степень неопределенности распределения целевой переменной при заданных значениях признаков. Формируется файл Bayes_importance.csv, который содержит веса факторов ДТП с пунктами ПДД в разрезе тяжести ДТП по данному соответствию.

Заключительным методом является нечеткий вывод, который позволяет учитывать неполноту и неопределенность данных при работе с факторами ДТП и формировании адекватных рекомендаций по изменению ПДД. При анализе факторов ДТП значение каждого фактора может быть оценено экспертно или на основе статистики, где ему ставится в соответствие определенная функция принадлежности. На этапе нечеткого вывода задаются правила вида: «Если фактор_1 принадлежит терму A_1 и фактор_2 принадлежит терму A_2, то риск ДТП принадлежит терму B_1. Проверка качества нечеткого вывода осуществляется с помощью степени согласованности, которая характеризуется средней степенью активации правил системы на данных. В результате формируется файл Fuzzy_PDD.csv.

Блок генерации предложений выполняет сопоставление выявленных факторов ДТП с пунктами ПДД, а также формирует рекомендации по корректировке нормативного документа. Все факторы методов анализа данных собираются в файл df_rules.csv, фрагмент которого показан на рисунке 3, а. Параллельно на вход модели поступает сегментированный файл ПДД PDD_rules.csv, фрагмент которого показан на рисунке 3, б. Далее выполняется разметка текста ПДД факторами из df_rules.csv, которая включает несколько этапов:

1) лемматизация текста ПДД средствами pymorphy2 для приведения слов к нормальной форме;

2) лемматизация названий признаков df_rules.csv;

3) сопоставление факторов с пунктами ПДД на основе совпадения лемм;

4) присвоение тем (погодные условия, освещение и др.) согласно предварительно сформированному тематическому словарю (относится к исходным данным).

На рисунке 3, в представлен фрагмент размеченного файла razmetPF.csv.

а

```
latitude,longitude,fatality_count,injury_count,accident_type,district,severity_score,accident_type_grouped,region_type,log_log_coef_street_category_Поселк
вые дороги,log_log_coef_street_category_Второстепенные улицы в жилой застройке (переулки),log_log_coef_street_category_Основные улицы в жилой
застройке,log_log_coef_street_category_Магистральные дороги,log_log_coef_street_category_Иные места,log_log_coef_street_category_Улицы и дороги местного
значения в жилой застройке,log_log_coef_street_category_Магистральные улицы районного значения,log_log_coef_street_category_Магистральные улицы
общегородского
значения,log_log_coef_density,log_log_coef_driving_experience,log_log_coef_alco,log_log_coef_speed,log_log_coef_g_v,log_log_coef_average_distance_between_
bjects,obl_obl_coef_street_category_Вне НП,obl_obl_coef_weather_condition_Ясно,"obl_obl_coef_lighting_condition_В темное время суток, освещение
включено",obl_obl_coef_street_category_Магистральные улицы общегородского значения,"obl_obl_coef_lighting_condition_В темное время суток, освещение
отсутствует",obl_obl_coef_road_condition_Заснеженное,obl_obl_coef_outward,obl_obl_coef_weather_condition_Снегопад,obl_obl_coef_road_condition_Сухое,obl_ob
_coef_road_condition_Мокрое,obl_obl_coef_street_category_Магистральные улицы районного
значения,obl_obl_coef_weather_condition_Пасмурно,obl_obl_coef_street_category_Иные места,obl_obl_coef_road_condition_Обработанное противогололедными
материалами,obl_obl_coef_street_category_Поселковые
дороги,obl_obl_coef_lighting_condition_Сумерки,obl_obl_coef_weather_condition_Дождь,obl_obl_coef_street_category_Улицы и дороги местного значения в жилой
застройке,obl_obl_coef_traffic_rules_Режим движения не изменялся,obl_obl_coef_traffic_rules_Движение частично перекрыто,"obl_obl_coef_lighting_condition_В
темное время суток, освещение не
включено",obl_obl_coef_return_,rand_rf_bin_longitude,rand_rf_bin_latitude,rand_rf_bin_g_v,rand_rf_bin_driving_experience,rand_rf_bin_street_category_Вне
НП,rand_rf_bin_alco,rand_rf_bin_lighting_condition_Светлое время суток,rand_rf_bin_street_category_Магистральные улицы общегородского
значения,"rand_rf_bin_t_ts_B-класс (малый) до 3,9 м","rand_rf_bin_t_ts_C-класс (малый средний, компактный) до 4,3
м",rand_rf_bin_weather_condition_Пасмурно,"rand_rf_bin_lighting_condition_В темное время суток, освещение отсутствует",rand_rf_bin_street_category_Улицы и
дороги местного значения в жилой застройке,rand_rf_bin_deficiencies_Неисправное освещение,rand_rf_bin_street_category_Магистральные улицы районного
значения,rand_rf_bin_deficiencies_Недостатки зимнего содержания,rand_rf_bin_weather_condition_Ясно,rand_rf_bin_deficiencies_Отсутствие
освещения,rand_rf_bin_deficiencies_Отсутствие тротуаров (пешеходных дорожек),rand_rf_bin_t_ts_Прочие легковые
```

б

```
id,chapter,chapter_name,paragraph,subparagraph,text,keywords
1,1,Общие положения,1.1,,"Настоящие Правила дорожного движения (в дальнейшем - Правила) устанавливают единый порядок дорожного движения на всей территории
Российской Федерации. Другие нормативные акты, касающиеся дорожного движения, должны основываться на требованиях Правил и не противоречить им.",
2,1,Общие положения,1.2,,В Правилах используются следующие основные понятия и термины:,
3,1,Общие положения,1.3,,"Участники дорожного движения обязаны знать и соблюдать относящиеся к ним требования Правил, сигналов светофоров, знаков и
разметки, а также выполнять распоряжения регулировщиков, действующих в пределах предоставленных им прав и регулирующих дорожное движение установленными
сигналами.",
4,1,Общие положения,1.4,,На дорогах установлено правостороннее движение транспортных средств.,
5,1,Общие положения,1.5,,"Участники дорожного движения должны действовать таким образом, чтобы не создавать опасности для движения и не причинять вреда.",
6,1,Общие положения,1.6,,"Лица, нарушившие Правила, несут ответственность в соответствии с действующим законодательством.",
7,2,Общие обязанности водителей,2.1,,Водитель механического транспортного средства обязан:,
8,2,Общие обязанности водителей,2.1,,"1. Иметь при себе и по требованию сотрудников полиции передавать им, для проверки: Документы, предусмотренные
настоящими Правилами, в случае их оформления в электронном виде в соответствии с законодательством Российской Федерации предъявляются в виде электронного
документа или его копии на бумажном носителе.",
9,2,Общие обязанности водителей,2.1.1,водительское удостоверение на право управления транспортным средством соответствующей категории или подкатегории;,
10,2,Общие обязанности водителей,2.1.2,"регистрационные документы на данное транспортное средство (кроме мопедов), а при наличии прицепа - и на прицеп
(кроме прицепов к мопедам);",
```

в

```
7,Водитель механического транспортного средства обязан:,"rand_rf_bin_t_ts_Оснащённые специализированным оборудованием  автотранспортные средства для коммунального хозяйства и  содержания
дорог, rand_rf_bin_technical_faults_Наличие конструктивных изменений по сравнению с серийным ТС, сведения о которых отсутствуют в регистрационных документах | Коэффициент светопропускания
стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя, rand_rf_bin_technical_faults_Коэффициент светопропускания
стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя, rand_rf_bin_t_ts_Иные мототранспортные средства,
rand_rf_bin_t_ts_Автокраны и транспортные средства, оснащенные кранами-манипуляторами, rand_rf_bin_technical_faults_Коэффициент светопропускания стекол менее нормативного, установлены
дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя | Иные неисправности, rand_rf_bin_t_ts_Транспортные средства для перевозки нефтепродуктов,
rand_rf_bin_t_ts_Транспортные средства для перевозки денежной выручки и ценных грузов, rand_rf_sev_t_ts_Автокраны и транспортные средства, оснащенные кранами-манипуляторами,
rand_rf_sev_technical_faults_Коэффициент светопропускания стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя,
rand_rf_sev_t_ts_Иные мототранспортные средства, rand_rf_sev_technical_faults_Наличие конструктивных изменений по сравнению с серийным ТС, сведения о которых отсутствуют в регистрационных
документах | Коэффициент светопропускания стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя,
rand_rf_sev_t_ts_Оснащённые специализированным оборудованием  автотранспортные средства для коммунального хозяйства и  содержания дорог, rand_rf_sev_technical_faults_Коэффициент
светопропускания стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя | Иные неисправности,
rand_rf_sev_t_ts_Транспортные средства для перевозки денежной выручки и ценных грузов, rand_rf_sev_t_ts_Транспортные средства для перевозки нефтепродуктов,
rand_rf_type_technical_faults_Коэффициент светопропускания стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя,
rand_rf_type_t_ts_Иные мототранспортные средства, rand_rf_type_technical_faults_Наличие конструктивных изменений по сравнению с серийным ТС, сведения о которых отсутствуют в
регистрационных документах | Коэффициент светопропускания стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя,
rand_rf_type_t_ts_Оснащённые специализированным оборудованием  автотранспортные средства для коммунального хозяйства и  содержания дорог, rand_rf_type_t_ts_Автокраны и транспортные
средства, оснащенные кранами-манипуляторами, rand_rf_type_technical_faults_Коэффициент светопропускания стекол менее нормативного, установлены дополнительные предметы или нанесены
покрытия, ограничивающие обзорность с места водителя | Иные неисправности, rand_rf_type_t_ts_Транспортные средства для перевозки нефтепродуктов, rand_rf_type_t_ts_Транспортные средства для
перевозки денежной выручки и ценных грузов",Другое
8,"1. Иметь при себе и по требованию сотрудников полиции передавать им, для проверки: Документы, предусмотренные настоящими Правилами, в случае их оформления в электронном виде в
соответствии с законодательством Российской Федерации предъявляются в виде электронного документа или его копии на бумажном носителе.","log_log_coef_street_category_Второстепенные улицы в
жилой застройке (переулки), log_log_coef_street_category_Основные улицы в жилой застройке, log_log_coef_street_category_Улицы и дороги местного значения в жилой застройке,
obl_obl_coef_lighting_condition_В темное время суток, освещение включено, obl_obl_coef_lighting_condition_В темное время суток, освещение отсутствует, obl_obl_coef_street_category_Улицы и
дороги местного значения в жилой застройке, obl_obl_coef_lighting_condition_В темное время суток, освещение не включено, rand_rf_bin_t_ts_B-класс (малый) до 3,9 м, rand_rf_bin_t_ts_C-класс
```

г

д

Предложения по внесению изменений в ПДД

Ассоциативные правила

1) PDD 14: Пункт ПДД 14: 1.2.При управлении грузовым автомобилем или автобусом, в отношении которых в рамках осуществления федерального государственного контроля (надзора) на автомобильном транспорте, городском наземном элект... Связанные факторы: rand_rf_bin_district_г. Бердск, rand_rf_bin_district_г.Обь, rand_rf_sev_district_г. Бердск, rand_rf_sev_district_г.Обь, rand_rf_type_district_г. Бердск, rand_rf_type_district_г.Обь. Рекомендация: уточнить формулировку пункта или добавить примеры/требования, учитывая перечисленные факторы. (Темы: Освещение, Тип ТС, Состояние дороги)

2) PDD 118: Пункт ПДД 118: Круглый бело-лунный мигающий сигнал, расположенный на железнодорожном переезде, разрешает движение транспортных средств через переезд. При выключенных мигающих бело-лунном и красном сигналах движение ... Связанные факторы: rand_rf_bin_district_Железнодорожный район, rand_rf_sev_district_Железнодорожный район, rand_rf_type_district_Железнодорожный район. Рекомендация: уточнить формулировку пункта или добавить примеры/требования, учитывая перечисленные факторы. (Темы: Освещение, Тип ТС)

3) PDD 130: Пункт ПДД 130: перед железнодорожным переездом - в соответствии с пунктом 15.4 Правил;... Связанные факторы: rand_rf_bin_district_Железнодорожный район, rand_rf_sev_district_Железнодорожный район, rand_rf_type_district_Железнодорожный район. Рекомендация: уточнить формулировку пункта или добавить примеры/требования, учитывая перечисленные факторы. (Темы: Освещение, Тип ТС, Состояние дороги)

Итоговый отчет анализа ДТП

1. Корреляционный анализ

1.1. Городские дороги

Матрица корреляции представлена на графике ниже. Ключевые коэффициенты

- Корреляция между плотностью потока и ДТП: r = 0.43
- Корреляция между дистанцией между объектами и ДТП: r = -0.27

Среднее ДТП: 0.46, std ДТП: 0.78
Δплотности: -7.50 → ΔДТП: -0.29 шт. (~-63.6%)
Δдистанции: -2.0 м → ΔДТП: +0.00 шт. (~0.2%)

Матрица корреляции для городских признаков

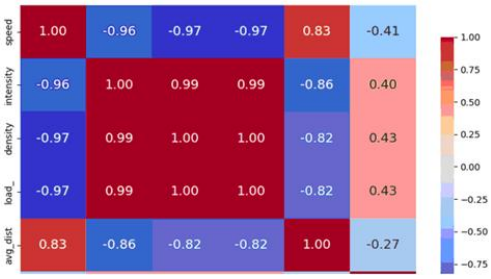


Рис. 3. Фрагменты файлов исходных и результатных данных: а – df_rules.csv; б – PDD_rules.csv; в – razmetPF.csv; г – PDD_Recomd.docx; д – Report.docx

Поскольку полученные выше файлы модельных данных сформированы в едином факторном пространстве, возможен каскад нечетких max-min композиций бинарных нечетких отношений (БНО), полученных сопоставлением данных описанных файлов: *PDD_Risk.csv = razmetPF.csv* ⊗ [{*PDD_coincidence.csv* × *assocPR.csv*} ⊗ {*Bayes_importance.csv* × *Fuzzy_PDD.csv*}]. Результатное БНО PDD_Risk.csv отражает рисковый фон ПДД, для минимизации которого и формируется перечень рекомендаций. На выходе модели формируется итоговый документ в формате docx, фрагмент которого представлен на рисунке 3, г. Также блок анализа данных формирует результаты анализа в виде диаграмм в формате png и в итоговом отчете Report.docx. Фрагмент итогового отчета представлен на рисунке 3, д. Полученные шаблонные рекомендации требуют дальнейшей интерпретации лицом, принимающим решения (подробнее см. раздел «Анализ результатов»).

Анализ результатов

Наибольшую практическую ценность для формирования предложений по корректировке ПДД показали ассоциативные правила и нечеткая логика. Ассоциативные правила позволяют напрямую устанавливать связи вида «фактор ДТП – пункт ПДД», формируя понятные и обоснованные рекомендации, а нечеткая логика дополняет их, позволяя количественно оценивать степень опасности нарушений в типичных дорожных условиях. В свою очередь, байесовские сети строят корректные вероятностные зависимости, но выводы получаются слишком общими, поэтому нужно самостоятельно просматривать ПДД для внесения корректировок.

Анализ сгенерированных моделью решений показал, что на основе сопоставления значений факторов ДТП с положениями ПДД в разрезе компонентов системы ВАДС («водитель – автомобиль – дорога – среда») для снижения возникновения и тяжести ДТП в НСО следует принять следующие меры:

1. Учет совокупного влияния факторов среды и дороги (С–Д):

a. Внести положения в главу «Обязанности водителей», регламентирующие поведение водителя при одновременном наличии неблагоприятных погодных условий и состояния дорожного покрытия.

b. Закрепить обязательное снижение скорости движения при сочетании факторов «скользкая дорога – недостаточная освещенность», уточнив п. 10.3.

c. Установить четкие требования к боковому интервалу движения в условиях неблагоприятной среды (п. 9.10), а также предусмотреть четкую цифру для определения средней дистанции между транспортными средствами.

2. Регулирование движения тяжелых транспортных средств (А–Д–С):

a. Ввести дополнительные ограничения для движения грузовых ТС при неблагоприятных погодных условиях, дополнив требования пп. 10.1 и 10.3 ПДД с учетом повышенного риска тяжелых последствий ДТП.

b. Дополнить п. 10.4 требованиями, предусматривающими обязательное снижение скорости и ограничение маневров тяжелых транспортных средств на дороге с повышенным риском ДТП вблизи перекрестков, пешеходных переходов, в особенности при плохой видимости.

3. Дифференциация требований ПДД по типу территории (В–Д):

a. В дополнение к п. 10.2 ПДД о скоростном лимите в населенных пунктах (не более 60 км/ч в общем случае) следует ввести более четкое разграничение скоростных режимов для крупных городов, пригородных и сельских территорий, исходя из плотности движения, уровня аварийности и особенностей транспортной среды.

b. Усилить контроль за соблюдением скоростного режима в районах с высокой аварийностью, опираясь на действующие положения ПДД и практику их правоприменения.

4. Формализация обязанностей водителя по факторам среды (B–C):

a. Усилить нормативную формулировку ПДД, касающуюся обязанности водителя учитывать погодные и световые условия при управлении ТС, то есть п. 10.1 отдельно улучшить и вынести в главу «Обязанности водителей».

b. Исключить рекомендательный характер отдельных положений, заменив их обязательными требованиями к адаптации скорости и стиля вождения в рамках раздела 10 ПДД.

c. Включить в ПДД перечень факторов компонента «Среда», которые должны учитываться водителем при выборе режима движения.

Выводы

Разработана комплексная модель для анализа ДТП и поддержки принятия решений по внесению изменений в ПДД. Реализация модели позволяет интегрировать данные с официального сайта ГИБДД и ГИС «ИТС НСО», автоматически обрабатывать их, выявлять ключевые факторы ДТП и формировать предложения по корректировке нормативной базы. Следует отметить, что рассмотренные результаты генерации рекомендаций, полученные посредством комплексирования результатов применения методов анализа и сопоставления (см. рис. 2), оказываются возможны именно вследствие системного применения соответствующих подмоделей и фактически являют собой свойство эмерджентности комплексной модели. Полученная комплексная модель обладает научной новизной, в достаточной степени регуляризована и может быть применена по назначению. В частности, модель обеспечивает выделение скрытых закономерностей, прогнозирование вероятности ДТП и анализ динамики транспортных потоков. Внедрение модели в АПК «Безопасный город» позволит устранить существующие ограничения и вывести систему управления транспортной безопасностью Новосибирской области на новый уровень.

В ходе анализа результатов моделирования выявлены следующие недостатки и ограничения: зависимость точности прогнозов от полноты исходных данных, необходимость регулярного обновления справочников и классификаторов, а также ограничения при обработке больших объемов данных оперативной памятью. Нагрузочное тестирование показало стабильную работу модели в условиях параллельной обработки модельных данных на 30 вычислительных потоках, что соответствует высокой нагрузке. Дискуссионными являются вопросы параметризации подмоделей и подбора методов обработки нечеткой неопределенности на этапах нечеткого логического вывода. Задача поиска наилучших значений указанных параметров представляет собой предмет дальнейшего исследования полученной модели в условиях, близких к реальным. Кроме того, для совершенствования модели рекомендуется расширение методов анализа, исследование дополнительных моделей прогнозирования, автоматизация интеграции новых источников данных и улучшение визуализации результатов. В связи с этим актуальной видится проблема эффективного комплексирования моделей макро- и микроуровней абстракции, различных классов и

разделов математики. Дальнейшее исследование данной проблемы поможет определить функциональную полноту комплексной модели, позволит оценить её целостность и завершенность. Тем самым сделает возможной оптимальное управление составом и структурой комплексной модели за счет классовой диверсификации ее компонентов, компенсирования недостатков одних моделей преимуществами других, определения и устранения избыточности в структуре комплексной модели, а также оптимизацию ее открытости и, как следствие, загруженности каналов связи.

Ценность выполненной работы заключается в разработке комплексной модели, позволяющей не только анализировать данные о ДТП, но и формировать рекомендации для корректировки ПДД. Модель может быть использована в рамках государственного проекта «Безопасный город», а подготовленные материалы и результаты анализа предоставляют основу для дальнейших исследований и практического применения в сфере безопасности дорожного движения.

Благодарность/Финансирование

Авторы выражают благодарность рецензенту журнала за сделанные замечания.

Исследование проведено в рамках Государственного задания Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, утвержденного Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, соглашение № 071-03-2026-011, 29.01.2026.

Acknowledgments/Funding

The authors express their gratitude to the journal's reviewer for his comments.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation for Siberian State University of Telecommunications and Information Science (reg. no 071-03-2026-011, 29.01.2026).

Список литературы

1. Çelik A., Sevli O. Predicting Traffic Accident Severity Using Machine Learning Techniques // Türk Doğa ve Fen Dergisi. – 2022. – Vol. 11, № 3. – P. 79–83. – DOI: 10.46810/tdfd.1136432.

2. Vanitha R., Swedha M. Prediction of Road Accidents Using Machine Learning Algorithms // Middle East Journal of Applied Science & Technology (MEJAST). – 2023. – Vol. 6, № 2. – P. 64–75.

3. Al-Mistarehi B. W., Alomari A. H., Imam R., Mashaqba M. Using Machine Learning Models to Forecast Severity Level of Traffic Crashes by R Studio and ArcGIS // Frontiers in Built Environment. – 2022. – Vol. 8. – P. 1–14. – DOI:10.3389/fbuil.2022.860805.

4. Bulut S. Harnessing Machine Learning to Enhance Global Road Safety: A Comprehensive Review // Politeknik Dergisi. – 2023. – Vol. 27, № 6. – P. 2127–2137. – DOI: 10.2339/politeknik.1348075.

5. Донченко Д. С., Садовникова Н. П., Парыгин Д. С. Прогнозирование степени тяжести последствий ДТП с использованием методов машинного обучения // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2019. – № 4 (31). – С. 176–180.

6. Лебедева М. Р., Лобашов А. О., Семченков С. С. Методы анализа данных и прогнозирования аварийности на примере города Минска // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 1 (51). – С. 70–76.

7. Справцева Е. В., Кешенкова В. Г., Шупиков И. Л. Влияние различных факторов на тяжесть последствий ДТП в Брянской области // Научный альманах Центрального Черноземья. – 2022. – № 1–7. – С. 130–134.

8. Савченко Н. А., Соловьев М. В., Соколов Д. А. Моделирование факторов, влияющих на тяжесть дорожно-транспортных происшествий, с использованием алгоритма случайного леса // Друкеровский вестник. – 2024. – № 5 (61). – С. 323–331.

9. Распоряжение Правительства РФ от 03.12.2014 № 2446–р (ред. от 05.04.2019) «Об утверждении Концепции построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_ (дата обращения: 18.09.2025).

10. Постановление Правительства Новосибирской области от 14.12.2016 № 403-п «Об утверждении государственной программы Новосибирской области «Построение и развитие аппаратно-программного комплекса «Безопасный город» в Новосибирской области» (в ред. от 28.05.2024) [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/465715173 (дата обращения: 18.09.2025).

11. Реестры государственных информационных систем Новосибирской области [Электронный ресурс] // Официальный сайт Правительства Новосибирской области. – URL: https://gis-registry.nso.ru (дата обращения: 18.09.2025).

12. Жаурова Д.С., Полетайкин А.Н. ИАД-система для поддержки принятия управленческих решений по снижению дорожно-транспортной аварийности // Научные записки НГУЭУ. – 2025. – № 2. – С. 62–76.

13. Shoari N., Heydari S., Blangiardo M. A decade of child pedestrian safety in England: a bayesian spatio-temporal analysis // BMC Public Health. – 2023. – Vol. 23. – P. 215. – DOI: 10.1186/s12889-023-15110-2.

14. Mogyorósi P., Szénási S., Laufer E. Fuzzy-Based Road Accident Risk Assessment // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 8. – P. 1144. – DOI: 10.3390/math12081144.

15. Якупова Г. А., Макарова И. В., Буйвол П. А., Мухаметдинов Э. М. Метод ассоциативных правил при анализе дорожно–транспортных происшествий // Транспорт: наука, техника, управление. – 2020. – № 11. – С. 40–44.

16. Shevtsova Y., Demchuk D., Poletaikin A., Demchuk K. Application of artificial intelligence methods in estimation the risk of transporting a patient by road // Proc. of the International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia : E3S Web of Conf. – 2023. – Vol. 402. – Art. 03009. – DOI: 10.1051/e3sconf/202340203009.

17. Pechatnova E., Kuznetsov V., Safronov K. Fuzzy modeling of the road traffic hazard level // MATEC Web of Conferences. – 2021. – Vol. 341. – P. 00023.

18. Logistic Regression in Machine Learning [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/machine–learning/understanding–logistic–regression (дата обращения: 07.11.2025).

19. Gini Coefficient [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/gini-coefficient (дата обращения: 16.11.2025).

20. Apriori Algorithm [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/apriori-algorithm/ (дата обращения: 08.11.2025).

References

1. Çelik, A. and Sevli, O. (2022), "Predicting Traffic Accident Severity Using Machine Learning Techniques", *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, vol. 11, no. 3, pp. 79–83. DOI: 10.46810/tdfd.1136432.

2. Vanitha, R. and Swedha, M. (2023), "Prediction of Road Accidents Using Machine Learning Algorithms", *Middle East Journal of Applied Science & Technology (MEJAST)*, vol. 6, no. 2, pp. 64–75.

3. Al-Mistarehi, B.W., Alomari, A.H., Imam, R. and Mashaqba, M. (2022), "Using Machine Learning Models to Forecast Severity Level of Traffic Crashes by R Studio and ArcGIS", *Frontiers in Built Environment*, vol. 8, pp. 1–14. DOI:10.3389/fbuil.2022.860805.

4. Bulut, S. (2023), "Harnessing Machine Learning to Enhance Global Road Safety: A Comprehensive Review", *Politeknik Dergisi*, vol. 27, no. 6, pp. 2127–2137. DOI: 10.2339/politeknik.1348075.

5. Donchenko, D.S., Sadovnikova, N.P. and Parygin, D.S. (2019), "Prognozirovanie stepeni tyazhesti posledstviy DTP s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obucheniya" [Predicting the severity of traffic accident consequences using machine learning methods], *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy*, no. 4 (31), pp. 176–180.

6. Lebedeva, M.R., Lobashov, A.O. and Semchenkov, S.S. (2025), "Metody analiza dannykh i prognozirovaniya avariynosti na primere goroda Minska" [Methods of data analysis and accident forecasting on the example of Minsk], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki*, no. 1 (51), pp. 70–76.

7. Spravtseva, E.V., Keshenkova, V.G. and Shupikov, I.L. (2022), "Vliyanie razlichnykh faktorov na tyazhest' posledstviy DTP v Bryanskoy oblasti" [Influence of various factors on the severity of traffic accidents in the Bryansk region], *Nauchnyy al'manakh Tsentral'nogo Chernozem'ya*, no. 1–7, pp. 130–134.

8. Savchenko, N.A., Solovyev, M.V. and Sokolov, D.A. (2024), "Modelirovanie faktorov, vliyayushchikh na tyazhest' dorozhno-transportnykh proisshestviy, s ispol'zovaniem algoritma sluchaynogo lesa" [Modeling factors affecting the severity of road accidents using the random forest algorithm], *Drukerovskiy vestnik*, no. 5 (61), pp. 323–331.

9. Government of the Russian Federation (2019), "Ob utverzhdenii Kontseptsii postroeniya i razvitiya apparatno-programmnogo kompleksa 'Bezopasnyy gorod'" [On approval of the Concept for the construction and development of the hardware and software complex "Safe City"], Order No. 2446-r dated 03.12.2014 (as amended on 05.04.2019). Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_ (Accessed 18 September 2025) (in Russian).

10. Government of the Novosibirsk Region (2024), "Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Novosibirskoy oblasti 'Postroenie i razvitie apparatno-programmnogo kompleksa "Bezopasnyy gorod" v Novosibirskoy oblasti'" [On approval of the state program of the Novosibirsk region "Construction and development of the hardware and software complex 'Safe City' in the Novosibirsk region"], Decree No. 403-p dated 14.12.2016 (as amended on 28.05.2024). Available at: https://docs.cntd.ru/document/465715173 (Accessed 18 September 2025) (in Russian).

11. "Reestry gosudarstvennykh informatsionnykh sistem Novosibirskoy oblasti" [Registers of state information systems of the Novosibirsk region] (2025), Official site of the Government of the Novosibirsk Region. Available at: https://gis-registry.nso.ru (Accessed 18 September 2025) (in Russian).

12. Zhaurova, D.S. and Poletaikin, A.N. (2025), "IAD-sistema dlya podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy po snizheniyu dorozhno-transportnoy avariynosti" [IAD system to support managerial decision-making to reduce road traffic accidents], *Nauchnye zapiski NGUEU*, no. 2, pp. 62–76.

13. Shoari, N., Heydari, S. and Blangiardo, M. (2023), "A decade of child pedestrian safety in England: a bayesian spatio-temporal analysis", *BMC Public Health*, vol. 23, p. 215. DOI: 10.1186/s12889-023-15110-2.

14. Mogyorósi, P., Szénási, S. and Laufer, E. (2024), "Fuzzy-Based Road Accident Risk Assessment", *Mathematics*, vol. 12, no. 8, p. 1144. DOI: 10.3390/math12081144.

15. Yakupova, G.A., Makarova, I.V., Buivol, P.A. and Mukhametdinov, E.M. (2020), "Metod assotsiativnykh pravil pri analize dorozhno–transportnykh proisshestviy" [Method of associative rules in the analysis of road accidents], *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, no. 11, pp. 40–44.

16. Shevtsova, Y., Demchuk, D., Poletaikin, A. and Demchuk, K. (2023), "Application of artificial intelligence methods in estimation the risk of transporting a patient by road", *Proc. of the International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia*, E3S Web of Conf., vol. 402, art. 03009. DOI: 10.1051/e3sconf/202340203009.

17. Pechatnova, E., Kuznetsov, V. and Safronov, K. (2021), "Fuzzy modeling of the road traffic hazard level", *MATEC Web of Conferences*, vol. 341, p. 00023.

18. "Logistic Regression in Machine Learning" (2025), GeeksforGeeks. Available at: https://www.geeksforgeeks.org/machine–learning/understanding–logistic–regression (Accessed 7 November 2025).

19. "Gini Coefficient" (2025), GeeksforGeeks. Available at: https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/gini-coefficient (Accessed 16 November 2025).

20. "Apriori Algorithm" (2025), GeeksforGeeks. Available at: https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/apriori-algorithm/ (Accessed 8 November 2025).

Dvurechenskaya N.A., Zhaurova D.S., Poletaikin A.N.

A COMPREHENSIVE MODEL OF INTELLIGENT GENERATION OF PROPOSALS FOR MODIFYING TRAFFIC REGULATIONS

***Abstract**. The paper considers the construction of a complex mathematical model that evaluates the impact of key factors in road accidents and generates proposals for modifying traffic regulations. The model combines intelligent submodels based on data mining methods. The algorithms are implemented using the Python programming language and its specialized open-source software libraries. The paper also includes integration with external data sources, such as the official website of the State Inspection for Traffic Safety and the resources of the regional Ministry. The paper concludes with a list of issues and proposals for modifying traffic regulations. The scientific novelty lies in the complex application of data mining methods to determine the key factors of the occurrence and severity of traffic accidents and to develop proposals for modifying traffic regulations. The practical significance of the research lies in the possibility of using the developed model as part of the hardware and software complex "Safe City", which is designed to improve road safety.*

***Keywords:** Data Mining, road safety, key accident factors, intelligent decision generation, comprehensive model, modification of traffic regulations.*

Сведения об авторах:

Двуреченская Надежда Александровна
Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия,
старший преподаватель кафедры теоретической физики,
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,

г. Новосибирск, Россия,
старший преподаватель кафедры физики,
e-mail: n.dvurechenskaya@g.nsu.ru

Жаурова Дарья Сергеевна
Новосибирский государственный университет экономики и управления,
г. Новосибирск, Россия,
студентка IV курса факультета цифровых технологий,
e-mail: zhaurova.d@mail.ru

Полетайкин Алексей Николаевич
Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия,
доцент кафедры информационных технологий,
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Россия,
доцент кафедры математического моделирования и цифрового развития бизнес-систем,
кандидат технических наук, доцент
e-mail: alex.poletaykin@gmail.com

Information about the authors:

Dvurechenskaya Nadezhda A.
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia,
Senior Teacher, Department of Theoretical Physics
Siberian State University of Telecommunications and Information Science,
Novosibirsk, Russia,
Senior Teacher, Department of Physics
e-mail: n.dvurechenskaya@g.nsu.ru

Zhaurova Daria S.
Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russia,
Forth year student, Faculty of Digital Technologies,
e-mail: zhaurova.d@mail.ru

Poletaikin Aleksei N.
Kuban State University, Krasnodar, Russia,
Associate Professor, Department of Information Technologies,
Siberian State University of Telecommunications and Information Science,
Novosibirsk, Russia,
Associate Professor, Department of Mathematical Modeling and Digital Development of Business Systems,
Candidate of Engineering Sciences, Docent,
e-mail: alex.poletaykin@gmail.com

УДК 004.032.26

Сацюк А.В., Лесовой Э.В.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЗАТУХАЮЩИХ ГРАДИЕНТОВ И УМИРАЮЩИХ НЕЙРОНОВ В ГЛУБОКИХ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ

Аннотация. *В работе проведён сравнительный анализ функций активации, применяемых в скрытых слоях глубоких нейронных сетей, с акцентом на проблемы «затухающего градиента» и «умирающих нейронов». Рассмотрены аналитические выражения и производные функций ReLU, Sigmoid, ELU, SeLU и PeLU, исследованы их свойства в положительной и отрицательной областях аргумента, а также влияние на устойчивость и скорость обучения. Выявлены преимущества и ограничения каждой функции с точки зрения распространения градиента, вычислительной сложности и способности поддерживать информативность сигнала в глубоких архитектурах.*

Ключевые слова: *функции активации; глубокие нейронные сети; затухающий градиент; умирающие нейроны; ReLU; ELU; Sigmoid, SeLU, PeLU.*

Введение

Как известно, в последнее время во всех сферах жизни человека все чаще применяется искусственная нейронная сеть (ИНС). Не исключением является и транспортная отрасль, в которой активно внедряются инструменты машинного зрения [1-3].

Одним из основных структурных элементов любой ИНС является функция активации, которая вносит нелинейность в модель и позволяет сети аппроксимировать сложные, нелинейно разделимые зависимости между входными и выходными данными [4].

Особый научный и технический интерес вызывает сверточная нейронная сеть (CNN), которая преимущественно применяется в машинном зрении [5]. Она также имеет в своей структуре функцию активации. В этом случае функция активации в CNN идет сразу после операции свертки [6].

Стоит заметить, что для задач в масштабе реального времени нередко требуется высокая скорость вычислений. С этой целью зачастую применяют «дешевую» функцию активации ReLU (Rectified Linear Unit). Данная функция обеспечивает высокую вычислительную эффективность за счёт простой математической формы и отсутствия сложных нелинейных операций [7]. Она хорошо зарекомендовала себя в глубоких сверточных нейронных сетях, где из-за сложной структуры вычислительный ресурс крайне важен.

Однако, для ReLU существует известная проблема «умирающего нейрона» [8]. Этот эффект обуславливается попаданием входных значений в отрицательную область: его градиент становится равным нулю, и нейрон перестаёт обновлять свои веса в процессе обратного распространения ошибки (обучения) [9]. Если такое состояние закрепляется, нейрон фактически выходит из обучения и больше не вносит вклад в модель, а вычислительная сложность остаётся неизменной. Одним из способов решения этой проблемы является модификация функции активации, а именно ее отрицательных зон определения.

Вторым способом решения вопроса «умирающих нейронов» является замена RelU на функцию Sigmoid, которая лишена проблемы «умирающего нейрона» за счет своей гладкой S-образной нелинейной функции. Однако возникает другая проблема, связанная с «затухающим градиентом». Она обусловлена тем, что производная сигмоиды принимает очень малые значения при больших по модулю входных данных (в областях насыщения, близких к 0 или 1). В процессе обратного распространения ошибки градиенты последовательно перемножаются по слоям, из-за чего они экспоненциально уменьшаются, и веса ранних слоёв почти не обновляются. Это явление существенно замедляет или даже останавливает процесс обучения в глубоких сетях.

В связи с выявленными ограничениями классических функций активации целесообразно рассмотреть альтернативные варианты, способные минимизировать указанные недостатки. Особый интерес представляют функции активации, которые одновременно снижают риск затухания градиента и предотвращают эффект «умирающих нейронов». Таким образом, является необходимым рассмотреть существующие функции активации, которые способны решить рассмотренные проблемы.

Цель работы

Целью работы является сравнительный анализ наиболее популярных свойств функций активации, которые применяются в скрытых слоях: ReLU, Sigmoid, ELU, SeLU и PeLU в сверхточных нейронных сетях с точки зрения их влияния на распространение градиента и устойчивость обучения глубоких нейронных сетей.

Для достижения поставленной цели формулируются следующие задачи:

- проанализировать аналитические выражения функций и их производных;
- исследовать поведение активаций в отрицательной и положительной областях аргумента;
- выдвинуть гипотезу о преимуществах выбранных функций активации в предотвращении деградации активности;
- провести валидацию на специальном программном обеспечении для проверки сформулированных предположений.

Основная часть

Функция выпрямленного линейного блока ReLU служит в скрытых нейронных слоях как функция активации нейрона. Её основная задача – вводить нелинейность в модель, что позволяет сети обучаться сложным зависимостям в данных. Благодаря простому вычислению и отсутствию проблемы затухающего градиента ReLU широко применяется в глубоких нейронных сетях. Она определяется математическим выражением:

$$f'_{\mathrm{Re}LU}(x) = \max(0, x), \tag{1}$$

где: x – вход нейрона (x=w×z+b);

w – вектор весовых коэффициентов;

z – входной вектор значений;

b – смещение.

Как видно на рис. 1, функция обеспечивает линейный рост при положительных значениях аргумента и нулевой отклик при отрицательных [7]. Простота вычисления данной функции делает её стандартным выбором для большинства современных архитектур за счет высокой скорости вычисления.

Проблема является следствием негладкости и односторонней линейности функции и напрямую связана с механизмом обратного распространения ошибки.

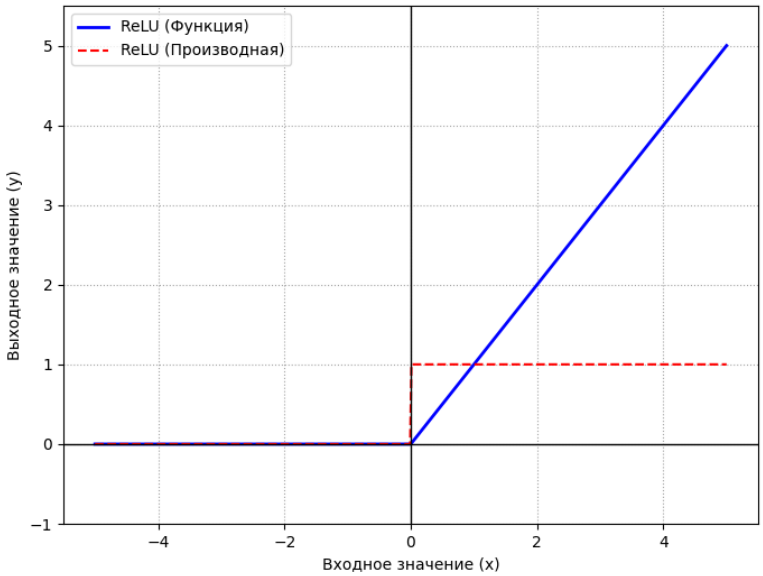


Рис. 1. График функции активации ReLU и ее производной

Для анализа распространения градиента используются производные:

$$f'_{\mathrm{Re}LU}(x)=\begin{cases}1, & x>0\\ 0 & ,x\le 0\end{cases}. \qquad (2)$$

Из приведённого выражения следует, что при отрицательных входах градиент ReLU исчезает, именно эта область определения является «слабым местом» ReLU. Альтернативным решением данной проблемы является область определения за счет неплотности и нелинейности, как это реализовано в функции ELU ELU (Exponential Linear Unit) (рис. 2), которая сохраняет ненулевое значение производной, что потенциально позволяет продолжать корректировку весов.

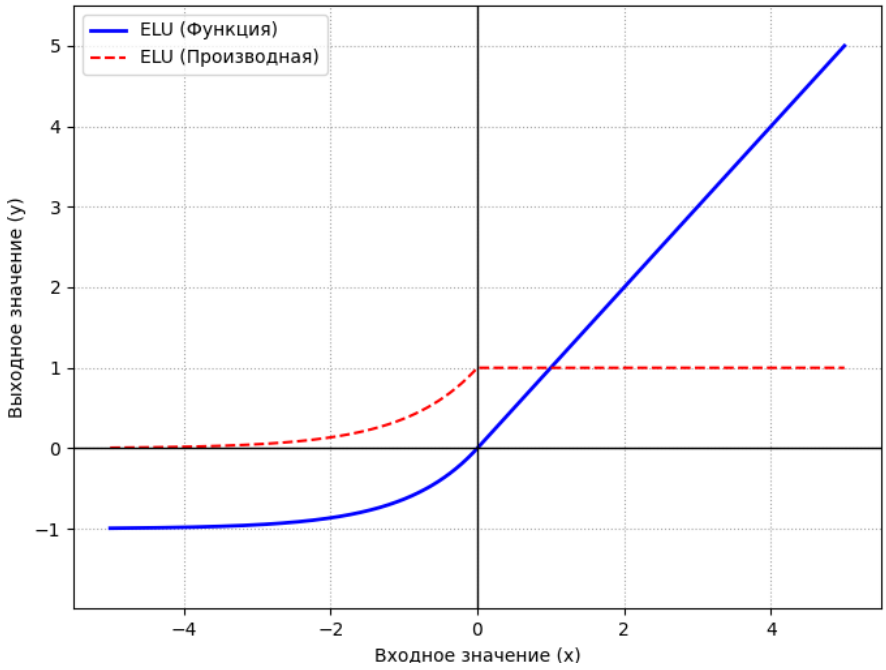


Рис. 2. График функции активации ELU и ее производной

Также ELU допускает отрицательные значения выхода, что способствует центрированию средних активаций ближе к нулю и ускоряет обучение.

Математически функция ELU определяется следующим образом:

$$f'_{ELU}(x)=\begin{cases}x, & x>0\\ \alpha\left(e^{x}-1\right), & x\le 0\end{cases}, \tag{3}$$

где: α – гиперпараметр, задающий глубину насыщения в отрицательной области (α>0);

e – основание натурального логарифма (e=2.718).

Производная функции ELU:

$$f'_{ELU}(x)=\begin{cases}x, & x>0\\ \alpha e^{x}, & x\le 0\end{cases}. \tag{4}$$

Из выражения для производной следует, что при отрицательных значениях аргумента градиент не обнуляется полностью (в отличие от ReLU), а экспоненциально уменьшается, что позволяет продолжать корректировку весов.

ELU лучше справляется с проблемой умирающих нейронов в отрицательных значениях, но ее проблема в самонормализации. Самонормализация позволяет поддерживать активации внутри сети близкими к среднему значению, равному нулю, и стандартному отклонению, равному единице, без использования дополнительных методов нормализации. Решением этой проблемы является функция активации SeLU (рис. 3).

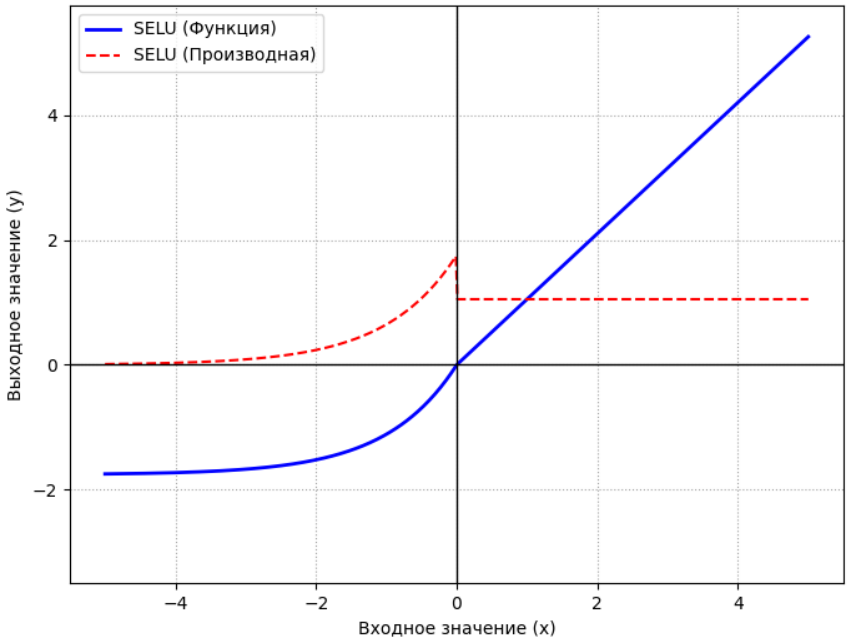


Рис. 3. График функции активации SeLU и ее производной

Масштабированная экспоненциальная линейная функция SeLU (Scaled Exponential Linear Unit) является модификацией ELU и предназначена для обеспечения свойства самонормализации нейронных сетей. Это означает, что при определённых условиях среднее значение и дисперсия активаций автоматически стремятся к фиксированным значениям.

Функция определяется выражением:

$$f'_{SeLU}(x)=\lambda\begin{cases}x, & x>0\\ \alpha\left(e^{x}-1\right), & x\le 0\end{cases}, \tag{5}$$

где: λ – коэффициент масштабирования (λ ≈ 1.0507);

α – параметр экспоненциальной части ($\alpha \approx 1.6733$);

x – вход нейрона.

Производная функции:

$$f'_{SeLU}(x) = \lambda \begin{cases} 1, & x > 0 \\ \alpha e^x, & x \le 0 \end{cases}, \quad (6)$$

SeLU поддерживает ненулевой градиент в отрицательной области и одновременно масштабирует.

Закостенелость коэффициента наклона SeLU делает ее негибкой в процессе обучения.

Стоит заметить, во многих задачах обучения имеется потребность регулирования коэффициента наклона. В этом случае альтернативой является параметрическая экспоненциальная линейная функция PeLU (Parametric Exponential Linear Unit), которая является обобщением ELU, а ее параметры формы функции обучаются в процессе тренировки сети.

Функция задаётся следующим образом:

$$f'_{PeLU}(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha}, & x > 0 \\ \beta\left(e^{\frac{x}{\alpha}} - 1\right), & x \le 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где: α – параметр масштабирования входа (α>0);

β – параметр масштабирования выхода (β>0).

Производная функции PeLU:

$$f'_{PeLU}(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} x, & x > 0 \\ \frac{\beta}{\alpha} e^{\frac{x}{\alpha}}, & x \le 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Наличие обучаемых параметров позволяет функции адаптировать форму как в положительной, так и в отрицательной области, что повышает гибкость модели (рис. 4).

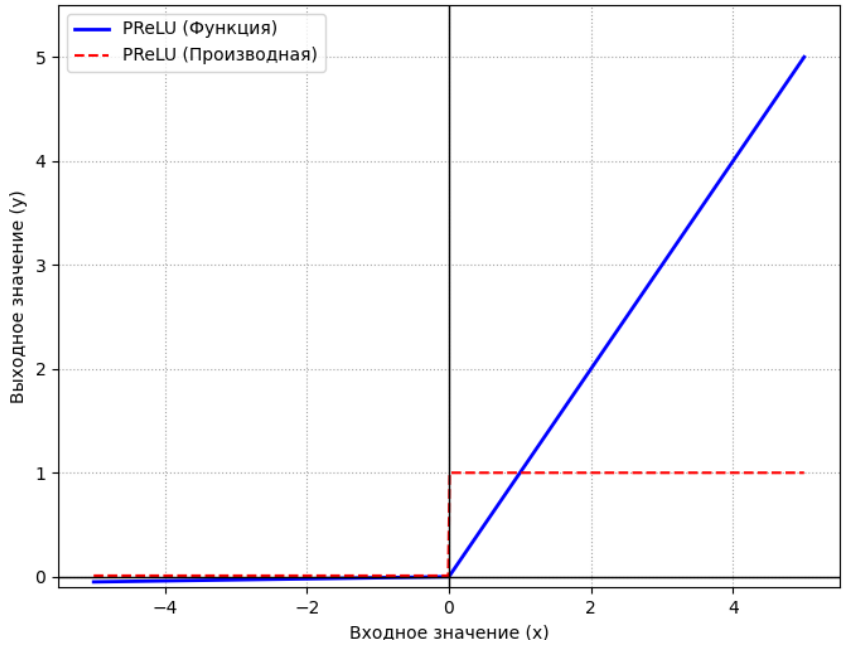


Рис. 4. График функции активации PeLU и ее производной

Как было отмечено ранее одним из решений вопроса с «умирающими нейронами» может быть не модификация ReLU, а ее замена на функцию активации, которая лишена проблемы «умирающего нейрона». Такой функцией является сигмоидальная функция Sigmoid. Данная функция является одной из классических функций активации, широко применявшейся в ранних нейронных сетях [4].

Из-за того, что сигмоидальная функция имеет ненулевую производную при любых конечных значениях аргумента, эта функция решает проблему с «умирающими нейронами».

Математическое выражение:

$$f_{\sigma}^{'}(x)=\frac{1}{1+e^{-x}}, \tag{9}$$

где: e^{-x} – входное значение функции активации.

$$f_{\sigma}^{'}(x)=f_{\sigma}(x)\left(1-f_{\sigma}(x)\right). \tag{10}$$

К тому же, при больших по модулю значениях аргумента функция насыщается, а производная стремится к нулю (рис. 5).

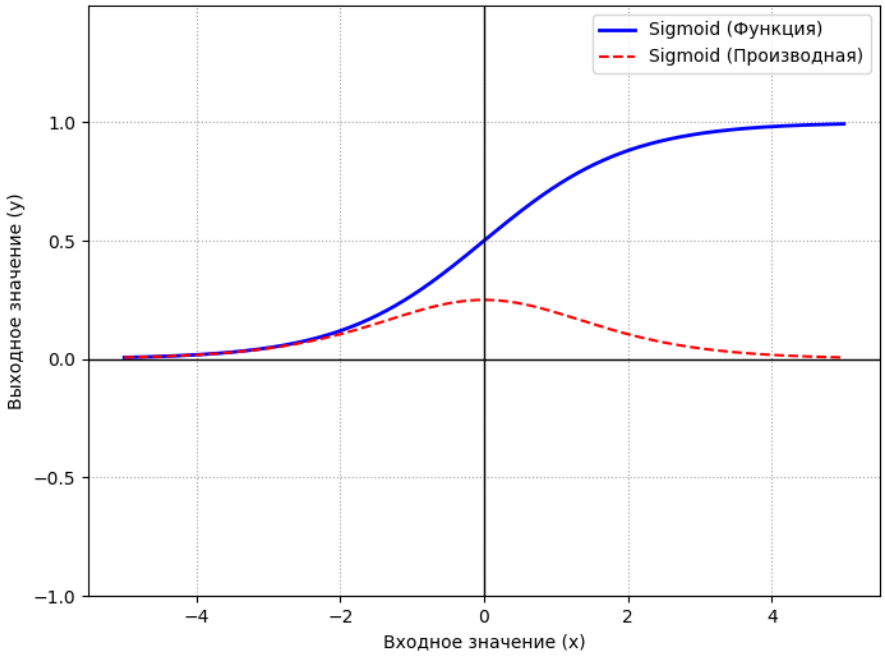


Рис. 5. График функции активации Sigmoid и ее производной

Однако возникает проблема «затухающего градиента» [10]. С математической точки зрения она возникает из-за нескольких факторов.

С одной стороны, производная ограничена сверху числом 0.25, а в областях насыщения производная стремится к нулю. При многократном применении правила цепочки (от слоя к слою) происходит экспоненциальное уменьшение градиента.

Также данная функция вносит задержку в вычисление, что делает нейронную сеть медленнее. Такая функция больше применима к задачам с полносвязными слоями.

Таким образом, проведённое исследование функций активации и их производных позволило выявить их ключевые отличия с точки зрения влияния на стабильность обучения, скорость сходимости и вероятность появления эффектов «затухающего градиента» и «умирающих нейронов».

Систематизация полученных теоретических результатов требует обобщения преимуществ и недостатков каждой функции активации, что даёт возможность сравнить

их практическую эффективность и определить рациональность использования в глубоких нейронных сетях [11].

Функция ReLU отличается вычислительной простотой и обеспечивает эффективное распространение градиента в положительной области, что ускоряет обучение глубоких сетей и способствует разреженности активаций. Однако она подвержена проблеме «умирающих нейронов», а также может приводить к нестабильности из-за неограниченного роста выходных значений и нулевого градиента в отрицательной области.

ELU снижает вероятность появления «умирающих нейронов» и способствует центрированию активаций около нуля, что улучшает сходимость и устойчивость обучения по сравнению с ReLU. Недостатками являются повышенная вычислительная сложность, наличие дополнительного гиперпараметра и возможное насыщение в отрицательной области при больших по модулю значениях аргумента.

SeLU обеспечивает самонормализацию активаций и стабильное распространение сигнала по слоям, что уменьшает потребность в дополнительных методах нормализации и ускоряет обучение глубоких сетей. Однако её применение требует соблюдения специальных условий инициализации и архитектуры, а вычислительная сложность выше по сравнению с более простыми функциями.

PeLU обладает высокой адаптивностью благодаря обучаемым параметрам, что позволяет гибко настраивать форму функции и поддерживать ненулевой градиент в отрицательной области. Вместе с тем увеличение числа параметров усложняет оптимизацию модели и повышает вычислительные затраты.

Сигмоидальная функция является гладкой и дифференцируемой на всей области определения, а её выход удобно интерпретируется как вероятность, что делает её полезной в задачах бинарной классификации. В то же время она страдает от затухающего градиента, насыщается при больших по модулю входах и замедляет обучение глубоких архитектур из-за нецентрированности относительно нуля.

Выводы

В ходе исследования были рассмотрены функции активации, применяемые в скрытых слоях глубоких сверточных нейронных сетей: ReLU, Sigmoid, ELU, SeLU и PeLU. Проведён анализ их работы и математических моделей, включая аналитические выражения и производные, что позволило оценить особенности распространения градиента в положительной и отрицательной областях аргумента.

В результате исследования выявлены достоинства и недостатки каждой функции активации с точки зрения устойчивости обучения, вероятности возникновения эффектов «затухающего градиента» и «умирающих нейронов», а также вычислительной сложности и гибкости параметризации.

На основании проведённого анализа можно сделать вывод, что для задач компьютерного зрения в глубоких сверточных нейронных сетях более целесообразным является применение функции активации SeLU. Это обусловлено её свойством самонормализации, благодаря которому поддерживается стабильное распределение активаций по слоям сети, уменьшается внутренний сдвиг распределений и обеспечивается более устойчивое распространение градиента без необходимости дополнительных методов нормализации.

Также можно применять функцию PeLU, которая обладает высокой гибкостью за счёт обучаемых параметров, что позволяет адаптировать форму активации под конкретную задачу. Однако увеличение числа настраиваемых параметров усложняет процесс оптимизации и повышает вычислительные затраты. В задачах компьютерного зрения, где архитектуры отличаются глубиной и высокой вычислительной нагрузкой,

стабильность и предсказуемость поведения функции активации имеют приоритет, что делает SeLU более предпочтительным выбором.

Список литературы

1. Сацюк, А. В. Мониторинг инфраструктуры на основе искусственного интеллекта / А. В. Сацюк // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 32-34. – DOI 10.62994/AT.2025.9.9.005. – EDN OXBPFP.

2. Сацюк, А. В. Гибридные алгоритмы компьютерного зрения для прецизионного автономного управления БПЛА / А. В. Сацюк, Н. В. Володарец. – Москва : ИНФРА-М, 2026. – 178 с. – ISBN 978-5-16-021492-4. – DOI 10.12737/2227081. – EDN UTBINO.

3. Сацюк, А. В. Особенности разработки беспилотных летательных аппаратов для отрасли железнодорожного транспорта / А. В. Сацюк, А. А. Воробьев // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2023. – № 68. – С. 13-21. – EDN GSWIPU.

4. Снопкова, И. А. Исследование влияния функции активации на эффективность работы нейронной сети при различных подходах к обучению / И. А. Снопкова, Д. А. Тауснев, Л. В. Липинский // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2020. – Т. 2. – С. 224-226. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-funktsii-aktivatsii-na-effektivnost-raboty-neyronnoy-seti-pri-razlichnyh-podhodah-k-obucheniyu (дата обращения: 19.02.2026).

5. Нишчхал. Особенности организации и применения сверточных нейронных сетей / Нишчхал // Решетневские чтения. – 2017. – № 21-2. – С. 252-253. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-organizatsii-i-primeneniya-svertochnyh-neyronnyh-setey (дата обращения: 19.02.2026).

6. Федоров, И. Е. Анализ и применение Relu функций активации и их производных функций / И. Е. Федоров, М. П. Гаар, А. Е. Гарифулин // Вестник новой ЭРЫ : сборник статей. – Анапа : Военный инновационный технополис «ЭРА», 2024. – С. 204-217. – EDN NWCAIJ.

7. Толмачев, С. В. Исследование влияния функции активации искусственной нейронной сети при решении задачи распознавания образов / С. В. Толмачев, Л. С. Гришина // Шаг в науку. – 2021. – № 4. – С. 84-87. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-funktsii-aktivatsii-iskusstvennoy-neyronnoy-seti-pri-reshenii-zadachi-raspoznavaniya-obrazov (дата обращения: 19.02.2026).

8. Романов, Д. Е. Нейронные сети обратного распространения ошибки / Д. Е. Романов // Инженерный вестник Дона. – 2009. – № 3. – С. 134-141. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyronnye-seti-obratnogo-rasprostraneniya-oshibki (дата обращения: 24.02.2026).

9. Зеленова, В. К. Релейная модель замирающего нейрона / В. К. Зеленова // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2024. – Т. 32, № 2. – С. 209-223. – DOI 10.18500/0869-6632-003077. – EDN NPGWBS. (Примечание: DOI добавлен условно, так как у журнала «Известия вузов. ПНД» он обычно есть, но если его нет в оригинале, эту часть нужно убрать).

10. Жалялов, Р. Р. Использование свёрточных нейронных сетей для решения задач распознавания образов в промышленности / Р. Р. Жалялов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2023. – № 2 (190). – С. 21-31. – DOI 10.52190/2073-2597_2023_2_21. – EDN JKWIIF.

11. Кашко, В. В. Анализ сходимости и устойчивости алгоритма глубокого обучения с подкреплением исполнитель-критик A2C / В. В. Кашко, С. А. Олейникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 1. – С. 45-52. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-shodimosti-i-ustoychivosti-

algoritma-glubokogo-obucheniya-s-podkrepleniem-ispolnitel-kritik-a2c (дата обращения: 19.02.2026).

References

1. Satsyuk, A.V. (2025), "Monitoring infrastruktury na osnove iskusstvennogo intellekta" [Monitoring of infrastructure based on artificial intelligence], *Avtomatika, svyaz', informatika*, no. 9, pp. 32-34. DOI: 10.62994/AT.2025.9.9.005.

2. Satsyuk, A.V. and Volodarets, N.V. (2026), *Gibridnye algoritmy komp'yuternogo zreniya dlya pretsizionnogo avtonomnogo upravleniya BPLA* [Hybrid computer vision algorithms for precision autonomous UAV control], INFRA-M, Moscow, Russia.

3. Satsyuk, A.V. and Vorobyov, A.A. (2023), "Osobennosti razrabotki bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya otrasli zheleznodorozhnogo transporta" [Features of the development of unmanned aerial vehicles for the railway transport industry], *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, no. 68, pp. 13-21.

4. Snopkova, I.A., Tausnev, D.A. and Lipinsky, L.V. (2020), "Issledovanie vliyaniya funktsii aktivatsii na effektivnost' raboty neyronnoy seti pri razlichnykh podkhodakh k obucheniyu" [A study of the effect of the activation function on the efficiency of a neural network in various approaches to learning], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, no. 2, pp. 224-226. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-funktsii-aktivatsii-na-effektivnost-raboty-neyronnoy-seti-pri-razlichnyh-podhodah-k-obucheniyu (Accessed 19 February 2026) (in Russian).

5. Nishchal (2017), "Osobennosti organizatsii i primeneniya svertochnykh neyronnykh setey" [Features of the organization and application of convolutional neural networks], *Reshetnevskie chteniya*, no. 21-2, pp. 252-253. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-organizatsii-i-primeneniya-svertochnyh-neyronnyh-setey (Accessed 19 February 2026) (in Russian).

6. Fedorov, I.E., Gaar, M.P. and Garifulin, A.E. (2024), "Analiz i primenenie Relu funktsiy aktivatsii i ikh proizvodnykh funktsiy" [Analysis and application of Relu activation functions and their derived functions], *Vestnik novoy ERY: sbornik statey*, Military Innovation Technopolis "ERA", Anapa, Russia, pp. 204-217.

7. Tolmachev, S.V. and Grishina, L.S. (2021), "Issledovanie vliyaniya funktsii aktivatsii iskusstvennoy neyronnoy seti pri reshenii zadachi raspoznavaniya obrazov" [Investigation of the influence of the activation function of an artificial neural network in solving the problem of pattern recognition], *Shag v nauku*, no. 4, pp. 84-87. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-funktsii-aktivatsii-iskusstvennoy-neyronnoy-seti-pri-reshenii-zadachi-raspoznavaniya-obrazov (Accessed 19 February 2026) (in Russian).

8. Romanov, D.E. (2009), "Neyronnye seti obratnogo rasprostraneniya oshibki" [Neural networks of back propagation], Inzhenernyy vestnik Dona, no. 3, pp. 134-141. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/neyronnye-seti-obratnogo-rasprostraneniya-oshibki (Accessed 24 February 2026) (in Russian).

9. Zelenova, V.K. (2024), "Releynaya model' zamirayushchego neyrona" [Relay model of a fading neuron], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, vol. 32, no. 2, pp. 209-223. DOI: 10.18509/0869-6632-003077.

10. Zhalyalov, R.R. (2023), "Ispol'zovanie svyortochnykh neyronnykh setey dlya resheniya zadach raspoznavaniya obrazov v promyshlennosti" [The use of convolutional neural networks to solve image recognition problems in industry], *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*, no. 2 (190), pp. 21-31. DOI: 10.52190/2073-2597_2023_2_21.

11. Kashko, V.V. and Oleinikova, S.A. (2025), "Analiz skhodimosti i ustoychivosti algoritma glubokogo obucheniya s podkrepleniem ispolnitel'-kritik A2C" [Analysis of

convergence and stability of a deep reinforcement learning algorithm performer-critic of A2C], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 21, no. 1, pp. 45-52. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-shodimosti-i-ustoychivosti-algoritma-glubokogo-obucheniya-s-podkrepleniem-ispolnitel-kritik-a2c (Accessed 19 February 2026) (in Russian).

Satsiuk A.V., Lesovoy E.V.

ANALYSIS OF FADING GRADIENTS AND DYING NEURONS PROBLEMS IN DEEP CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Abstract. *The paper provides a comparative analysis of activation functions used in hidden layers of deep neural networks, with an emphasis on the problems of "fading gradient" and "dying neurons". The analytical expressions and derivatives of the functions ReLU, Sigmoid, ELU, SeLU, and PeLU are considered, their properties in the positive and negative regions of the argument are investigated, as well as their effect on learning stability and speed. The advantages and limitations of each function are revealed in terms of gradient propagation, computational complexity, and the ability to maintain signal informativeness in deep architectures.*

Keywords: *activation functions; deep neural networks; fading gradient; dying neurons; ReLU; ELU; Sigmoid, SeLU, PeLU.*

Сведения об авторах:

Сацюк Александр Владимирович
ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», Донецк, Россия
Заведующий научно-исследовательской лабораторией искусственного интеллекта
Кандидат технических наук
e-mail: alexandrsatsuk@gmail.com

Лесовой Эдуард Васильевич
ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», Донецк, Россия
Аспирант,
e-mail: ed.lesovoi2014@yandex.ru

Information about the authors:

Satsiuk Alexander Vladimirovich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Donetsk Institute of Railway Transport”, Donetsk, Russia
Head of the Artificial Intelligence Research Laboratory
Candidate of Technical Sciences (Ph.D. in Engineering)
e-mail: alexandrsatsuk@gmail.com

Lesovoy Eduard Vasilyevich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Donetsk Institute of Railway Transport”, Donetsk, Russia
Postgraduate Student,
e-mail: ed.lesovoi2014@yandex.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 629.33

Мойся Д.Л., Бобров В.В.

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СОЧЛЕНЕННОГО АВТОБУСА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВПИСЫВАЕМОСТИ В ГАБАРИТНЫЙ КОРИДОР

Аннотация: *рассматривается нелинейная плоская модель движения сочлененного автобуса. Модель реализована в среде MATLAB и использована для анализа круговых стационарных режимов движения и вписываемости в круговой габаритный коридор, принятый по требованиям маневренности для автобусов (Правила ЕЭК ООН №107; отсылка в ГОСТ 33987-2016 [19,20]). Продемонстрировано, что не все сочетания продольной скорости и угла поворота управляемых колес обеспечивают прохождение габаритного коридора; на основе последовательного подбора определены такие сочетания управляющих параметров, при которых автобус проходит круговой габаритный коридор (R=12,5 м; r=5,3 м). Полученные результаты могут применяться для оценки маневренности сочлененных автобусов и выбора допустимых режимов маневра в стесненных городских условиях.*

Ключевые слова: *сочлененный автобус; математическая модель; маневренность; круговой габаритный коридор; силы увода.*

Введение

Быстрый рост крупных городов и пассажиропотоков приводит не только к увеличению количества автобусных маршрутов, но и к росту числа подвижного состава на линии. Большое количество одиночных автобусов увеличивает нагрузку на улично-дорожную сеть и способствует образованию заторов, а также необходимость повышения эффективности работы подвижного состава и требований к персоналу заставляет пересматривать подход к организации пассажирских перевозок.

Одним из очевидных решений является расширение применения и совершенствование подвижного состава особо большого класса — сочлененных автобусов «гармошек». Тенденция их возвращения в российские города началась в 2010-х годах, однако эксплуатация таких машин осложняется значительной длиной и, как следствие, повышенными требованиями к маневрированию в стесненных условиях.

В качестве объекта исследования был выбран двухзвенный сочлененный автобус, прототипом которого является ЛиАЗ-621365-79, состоящий из ведущего звена (передняя секция) и ведомого звена (задняя секция), соединенных шарнирным устройством.

Математические модели двухзвенных транспортных средств (седельные автопоезда, сочлененные автобусы) являлись объектом исследований отечественных и зарубежных авторов [21, 22]. В то же время во многих работах результаты анализа получены для линеаризованных моделей, справедливых лишь в окрестности малых углов увода и малых поперечных отклонений, что ограничивает их применение при

оценке траекторий и вписываемости в габаритный коридор при заметных управляющих воздействиях.

Моделированию динамики и управляемости сочлененных пассажирских транспортных средств посвящен значительный массив исследований. В последние годы интерес смещается в сторону прикладных нелинейных моделей и методов управления, позволяющих сочетать вычислительную эффективность с достаточной точностью для решения практических задач. Современное обобщение подходов к моделированию и управлению сочлененными пассажирскими ТС (articulated passenger vehicles) представлено в обзорной работе [2]. В задачах низкоскоростного маневрирования, прогнозирования траектории и алгоритмизации движения широко применяются компактные кинематические модели сочлененных систем, включая модульные представления сочлененных автобусов и кинематические схемы для траекторного слежения [4,7,8]. Отдельное направление составляют методы управления движением, включая подходы на основе MPC (Model Predictive Control) и сравнительный анализ стратегий управления для сочлененных составов [5,6]. Для сочлененных автобусов также активно исследуются нелинейные динамические модели и показатели устойчивости/управляемости при различных режимах движения, в том числе влияние сочлененного устройства и режимов движения на динамику [9–14].

Вместе с тем для прикладных задач оценки габаритной вписываемости в коридор и оперативных расчетов при малых и средних скоростях востребованы нелинейные модели умеренной сложности, допускающие использование справочно-оценочных параметров шин и обеспечивающие воспроизводимость результатов при численном интегрировании. В практическом управлении входными воздействиями выступают скорость движения и угол поворота рулевого колеса: скорость задается водителем посредством педали акселератора/тормоза, а угол поворота управляемых колес формируется рулевым управлением.

Цель работы: разработать нелинейную плоскую модель движения двухзвенного сочлененного автобуса и применить ее для оценки вписываемости в круговой габаритный коридор ($R = 12{,}5$ м; $r = 5{,}3$ м), принятый по требованиям маневренности для автобусов (Правила ЕЭК ООН №107; отсылка в ГОСТ 33987–2016) [19,20], а также определить допустимые сочетания продольной скорости и угла поворота управляемых колес, обеспечивающие прохождение коридора без выхода за его пределы.

Область применения и допущения:

- Рассматривается плоское движение по ровной горизонтальной дороге; крен, тангаж и вертикальные колебания (работа подвески) не учитываются.
- Исследуются низкоскоростные режимы маневрирования, в том числе установившийся поворот; модель предназначена для оценки вписываемости и маневренности в стесненных условиях и не применяется для анализа высокоскоростной устойчивости.
- Управляющими воздействиями приняты продольная скорость v_1 и угол поворота управляемых колес θ (на рассматриваемом режиме постоянные). В практической реализации v_1 поддерживается/изменяется педалью акселератора и (при необходимости) торможением, θ - поворотом рулевого колеса.
- Нормальные реакции на колесах принимаются постоянными; продольные тяговые/тормозные силы и воздействие неровностей дороги в модели не учитываются.
- Боковые силы на шинах задаются насыщаемой зависимостью от угла увода; параметры модели шин и область ее применимости приведены далее.

Вписываемость оценивается при движении по круговому габаритному коридору, ограниченному двумя концентрическими окружностями радиусов $R = 12{,}5$ м и $r = 5{,}3$ м.

Выбор коридора соответствует требованиям маневренности для автобусов категорий M2/M3, установленным Правилами ООН №107, на которые ссылается ГОСТ 33987-2016.

Постановка задачи.

Чтобы полностью описать и исследовать возможные стационарные состояния сочлененного автобуса с жестким рулевым управлением, необходимо выбрать подходящую математическую модель и соответствующие переменные состояния (рисунок 1).

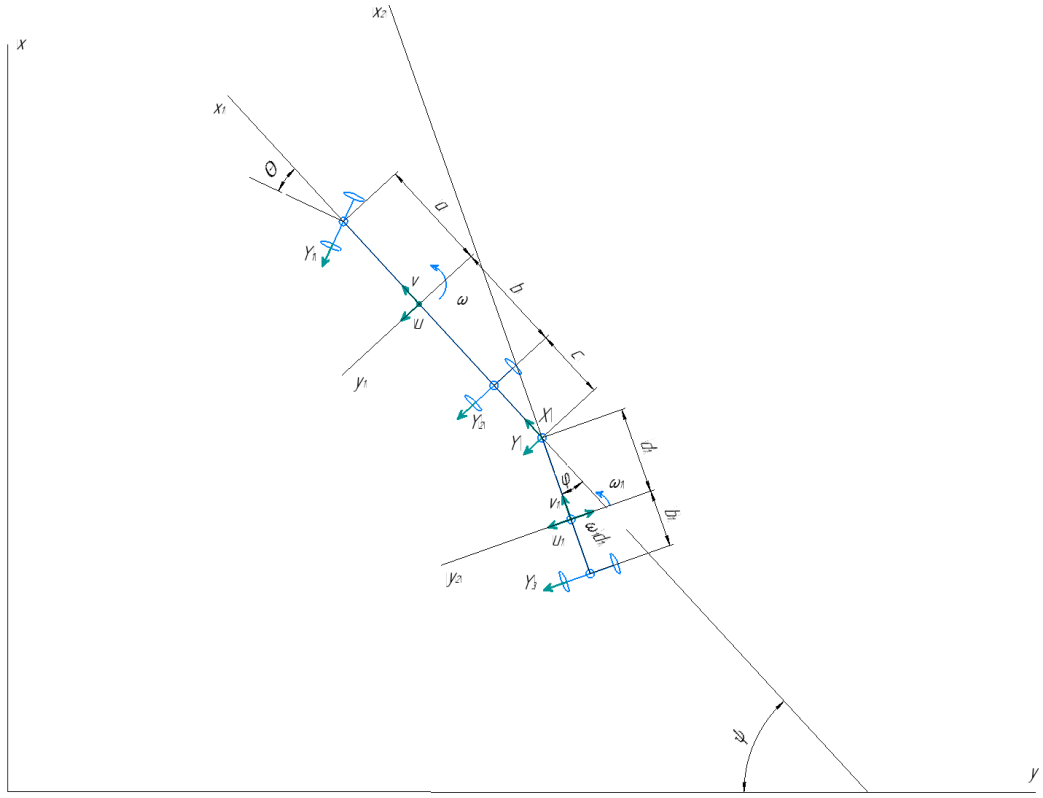


Рис. 1. Схема движения сочлененного автобуса

Передняя ось автобуса может поворачиваться на угол θ относительно продольной оси передней секции. Ведущее и ведомое звенья связаны шарнирно-сочлененным механизмом, который обеспечивает их свободное относительное поворачивание в плоскости движения.

Положение каждого звена задается координатами x_i, y_i его центра масс C_i и курсовым углом ψ_i представляющим собой угол между продольной осью соответствующего звена и осью абсцисс неподвижной системы координат.

Параметры системы: v_1– продольная составляющая скорости центра масс передней секции; a, b– расстояние от центра массы передней секции автобуса до передней и средней осей автобуса; c –расстояние от центра массы передней секции до точки сцепки с задней секцией; d_1, b_1 – расстояние от центра массы задней секции до точки сцепки и задней оси; 2K– габаритная ширина автобуса; коэффициенты увода на осях (k_1, k_2, k_3); коэффициенты сцепления при определении боковых сил увода (χ_1, χ_2, χ_3); устанавливаемый угол поворота колес управляемого модуля θ, приведенная боковая реакция полотна дороги на опорных осях сочлененного автобуса (Y_1, Y_2, Y_3). Геометрические и конструктивные параметры прототипа (габаритные размеры, базы и

колея, ограничения рулевого управления, массогабаритные данные и др.) приняты по руководству по эксплуатации ЛиАЗ-621365-79 [17].

Далее через c_1, c_2, m_1, m_2, J_1, J_2, $\omega_1 = \psi$, $\omega_2 = \psi_1$, φ обозначим: центры масс, массы, центральные моменты инерции относительно соответствующих вертикальных осей, абсолютные угловые скорости ведущего и ведомого звеньев и угол складывания (заключен между продольными осями передней и задней секции). Тогда:

$$\omega_2 = \omega_1 - \varphi \tag{1}$$

Центральные моменты инерции звеньев относительно вертикальных осей при отсутствии паспортных данных оцениваются по инженерной аппроксимации на основе массо-габаритных характеристик. В качестве базовой оценки может использоваться приближение однородного параллелепипеда:

$$J_i \approx \frac{m_i}{12} \cdot \left(L^2 + B^2 \right), \tag{2}$$

где L и B — характерные длина и ширина звена в плане.

Подходы к оценке инерционных свойств транспортных средств по массе и основным геометрическим размерам, а также влияние этих оценок на устойчивость и управляемость рассмотрены в [18]. Полученные значения J_1 и J_2 используются в модели при описании переходных процессов; для стационарных круговых режимов их влияние является второстепенным и может быть уточнено в ходе дальнейшего исследования.

Зададим абсолютные скорости точек c, c_1 разложениями по ортам соответствующих базисов:

$$\begin{cases} v_c = i_1 v_1 + j_1 u_1; v_{c2} = i_2 v_2 + j_2 u_2, \\ v_1 = x \cdot \cos\psi + y \cdot \sin\psi; u_1 = -x \cdot \sin\psi + y \cdot \cos\psi, \\ v_2 = v_1 \cdot \cos\varphi - (u_1 - \omega_1 \cdot c) \cdot \sin\varphi; u_2 = v_1 \cdot \sin\varphi + (u_1 - \omega_1 \cdot c) \cdot \cos\varphi - \omega_2 \cdot d_1 \end{cases} \tag{3}$$

Система дифференциальных уравнений движения сочлененного автобуса описывает преобразование переменных (u_1, ω_1, φ, Φ): u_1 – поперечная составляющая скорости центра масс первой секции (квазискорость), U_1 – ее производная в подвижной системе координат; ω_1 – угловая скорость первого звена; Ω_1 – угловое ускорение первого звена; φ – угол складывания между первым и вторым звеньями; Φ – угловая скорость угла складывания; РР – угловое ускорение угла складывания.

Среди различных теорий качения упругодеформируемых колес в настоящей работе используется аксиоматический подход, согласно которому боковая реакция полотна дороги Y_i, приложенная в центре пятна контакта катящегося упругого колеса, рассматривается как функция угла увода δ_i.

Приведенные углы бокового увода колесных осей определяются выражениями:

$$\begin{cases} \delta_1 = \theta - arctg \dfrac{\left(u_1 + a \cdot \omega_1 \right)}{v_1}; \\ \delta_2 = arctg \dfrac{\left(-u_1 + b \cdot \omega_1 \right)}{v_1}; \\ \delta_3 = -\dfrac{v_1 \cdot \sin\varphi + \left(u_1 \cdot \omega c \right) \cos\varphi - \left(\omega_1 \cdot \Phi \right) d_1 - \left(\omega_1 \cdot \Phi \right) b_1}{v_2} \end{cases} \tag{4}$$

Зависимости сил бокового увода, имеющие эмпирическое происхождение [1], можно аппроксимировать выражениями (монотонно возрастающая функция, имеющая характер кривой насыщения)

$$Y_i = k_i\delta_i / \left(\sqrt{(1+(k_i\delta_i / \chi_i Z_i)^2}\right) \quad (5)$$

где Z_i – реакции опорной поверхности на осях.

Пренебрегая перераспределением нормальных реакций между боковыми колесами, будем считать боковые колеса каждой оси замененными одним приведенным колесом с центром в середине оси. Тогда:

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{1}{l}\left[m_1 \cdot g \cdot b - m_2 \cdot g \cdot \frac{b_1}{L_1}(c-b) \right]; \\ Z_2 = \frac{1}{l}\left[m_1 \cdot g \cdot a + m_2 \cdot g \cdot \frac{b_1}{L_1}(c+a) \right] \text{р} \\ Z_3 = m_2 \cdot g \cdot \frac{d_1}{L_1}. \end{cases} \quad (8)$$

$$l = a + b; L_1 = d_1 + b_1 \quad (7)$$

где l – длина базы первого звена;

L_1 – длина базы второго звена.

В выражении (5) коэффициент ki задает угловую жесткость шины для i-й оси в линейной области малых углов увода, Н/рад. Коэффициент χi соответствует эффективному коэффициенту сцепления «шина–дорога» и определяет предельный уровень реализуемой боковой силы.

В качестве ориентира для класса прототипа указан типоразмер шин 275/70R22,5 (ЯШЗ Tyrex All Steel VC-1).

В настоящей работе рассматривается движение по сухому асфальтобетонному покрытию, поэтому для всех осей принято $\chi_1=\chi_2=\chi_3=0{,}8$, что соответствует типичному диапазону пикового коэффициента сцепления для сухого асфальта (0,8–0,91) [16]. При моделировании иных условий движения (влажное покрытие, снег, лед и т.п.) коэффициент χ должен изменяться, что планируется учитывать в дальнейших исследованиях.

Поскольку паспортные характеристики зависимости боковой силы от угла увода для выбранной модели шины в открытом доступе отсутствуют, значения ki в настоящей работе получены по инженерной оценке на основе нормированного параметра “cornering coefficient” CCα, приведенного в [15]. Для номинальной нагрузки шины в [15] приведено типичное значение порядка $CC\alpha \approx 0{,}2$.

Тогда для i-й оси:

$$\mathrm{k_i} = \mathrm{CC_\alpha} \cdot \mathrm{Z_i} \cdot \frac{180}{\pi} \text{ж} \quad (8)$$

Основная часть

Вывод дифференциальных уравнений плоскопараллельного движения сочлененного автобуса методом сечений [3].

Применяя метод сечений, получим следующие уравнения плоскопараллельного движения, в проекциях на оси, неизменно связанные со звеньями, для передней и задней секций соответственно

1. Уравнения движения передней секции

$$1) m_1\left(V_1 - u_1\cdot\omega_1\right) - \mathrm{X} + \mathrm{Y}_1\sin(\theta) = 0,$$
$$2) m_1\left(U_1 + v_1\cdot\omega_1\right) - \mathrm{Y} - \mathrm{Y1}\cos(\theta) - \mathrm{Y2} = 0, \text{п}$$
$$3) J_1\Omega_1 + \mathrm{Yc} - \mathrm{Y}_1\mathrm{a}\cos(\theta) + \mathrm{Y}_2 b = 0.$$

2. Уравнения движения задней секции (10)

$$4) m_2\left(V_2 - \mathrm{u}_2\omega_2\right) + X\cos(\phi) - Y\sin(\phi) = 0,$$
$$5) m_2\left(U_2 + v_2\omega_2\right) + \mathrm{X}\sin(\phi) + Y\cos(\phi) - Y_3 = 0,$$
$$6) J_2\Omega_2 + X d_1\sin(\phi) + Yd_1\cos(\phi) + Y_3 b_1 = 0.$$

В (10) исключим из 5) и 6) внутренние силы X, Y взаимодействия подсистем, получим систему нелинейных дифференциальных уравнений (11):

По переменной v_1:

$$m_1\cdot\left(V_1 - u_1\cdot\omega_1\right) - Y_3\cdot\sin(\phi) + m_2\cdot d_1\cdot PP\cdot\sin(\phi) - m_2\cdot d_1\cdot\Omega_1\cdot\sin(\phi) + m_2\cdot d_1\times$$
$$\times\Phi^2\cdot\cos(\phi) - 2\cdot m_2\cdot d_1\cdot\Phi\cdot\omega_1\cdot\cos(\phi) + m_2\cdot d_1\cdot\omega_1^2\cdot\cos(\phi) - \omega_1^2\cdot u_1\cdot\mathrm{m}_2 + V_1\times$$
$$\times m_2 + \omega_1^2\cdot m_2\cdot c + Y_1\cdot\sin(\theta) = 0;$$

По переменной u_1:

$$m_1\left(U_1 + v_1\cdot\omega_1\right) - Y_3\cdot\cos(\varphi) + m_2\cdot d_1\cdot PP\cdot\cos(\varphi) - m_2\cdot d_1\cdot\Omega_1\cdot\cos(\phi) -$$
$$- m_2\cdot d_1\cdot\Phi^2\cdot\sin(\phi) + 2\cdot m_2\cdot d_1\cdot\Phi\cdot\omega_1\cdot\sin(\phi) - m_2\cdot d_1\omega_1^2\cdot\sin(\phi) + \omega_1\cdot v_1\cdot\mathrm{m}_2 +$$
$$+ U_1\cdot m_2 - \Omega_1\cdot m_2\cdot c - Y_1\cos(\theta) - Y_2 = 0;$$

По переменной ω_1: (11)

$$J_1\cdot\Omega_1 - \left(2\cdot m_2\cdot d_1\cdot\Phi\cdot\omega_1\cdot\sin(\phi) - m_2\cdot d_1\cdot\Phi^2\cdot\sin(\phi) - m_2\cdot d_1\cdot\omega_1^2\cdot\sin(\phi) -\right.$$
$$- m_2\cdot d_1\cdot\Omega_1\cdot\cos(\phi) + m_2\cdot d_1\cdot\mathrm{PP}\cdot\cos(\phi) + U_1\cdot\mathrm{m}_2 - Y_3\cdot\cos(\phi) - \Omega_1\cdot m_2\cdot\mathrm{c} + \omega_1\times$$
$$\times v_1\cdot\mathrm{m}_1\cdot c - Y_1\cdot\mathrm{a}\cdot\cos(\theta) + \mathrm{Y}_2\cdot b = 0;$$

По углу складывания:

$$J_2\cdot\left(\Omega_1 - \mathrm{PP}\right) + (Y_3\cdot\sin(\phi) - \mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\mathrm{PP}\cdot\sin(\phi) + \mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\Omega_1\cdot\sin(\phi) - \mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\Phi^2\cdot\cos(\phi) +$$
$$+ 2\cdot\mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\Phi\cdot\omega_1\cdot\cos(\phi) - \mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\omega_1^2\cdot\cos(\phi) + \omega_1\cdot u_1\mathrm{m}_2 - V_1\cdot\mathrm{m}_2 - \omega_1^2\times$$
$$\times m_1\cdot\mathrm{c}\cdot\mathrm{d}_1\cdot\sin(\phi) - (2\cdot\mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\Phi\cdot\omega_1\cdot\sin(\phi) - \mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\Phi^2\cdot\sin(\phi) - \mathrm{m}_2\cdot d_1\omega_1^2\cdot\sin(\phi) -$$
$$- \mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\Omega_1\cdot\cos(\phi) + \mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\mathrm{PP}\cdot\cos(\phi) + U_1\cdot\mathrm{m}_2 - \mathrm{Y}_3\cdot\cos(\phi) - \Omega_1\cdot m_2\cdot\mathrm{c} + \omega_1\cdot v_1\times$$
$$\times\mathrm{m}_2\cdot d_1\cdot\cos(\phi) + \mathrm{Y}_3\cdot b_1 = 0.$$

Допустим, рассматривается равномерное движение, тогда $v_1 = \text{const}$, а значит $V_1 = 0$. Подставив в систему уравнений (11) значение $V_1 = 0$, разрешим ее относительно старших производных (U_1, PP, Ω_1). Получим систему уравнений в нормальной форме Коши (12):

$$U_1 = f_1\left(u_1, \omega_1, \phi, \Phi\right),$$
$$\Omega_1 = f_2\left(u_1, \omega_1, \phi, \Phi\right), \quad (12)$$
$$PP = f_3\left(u_1, \omega_1, \phi, \Phi\right).$$

При расчетах и моделировании использовались программные пакеты MATLAB и Maple: основные вычисления, численное интегрирование уравнений движения и построение анимации траектории движения сочлененного автобуса выполнялись в

MATLAB, тогда как Maple применялся для вспомогательных символьных преобразований, проверочных расчетов и верификации отдельных соотношений. При фиксированных параметрах автобуса (массы, геометрические характеристики, жесткости шин) выполняется численное интегрирование при различных значениях пары управляющих параметров (v_1, θ). Для каждого набора (v_1, θ) проверяется вписываемость габаритных точек автобуса в круговой коридор.

1. Нахождение круговых стационарных режимов движения.

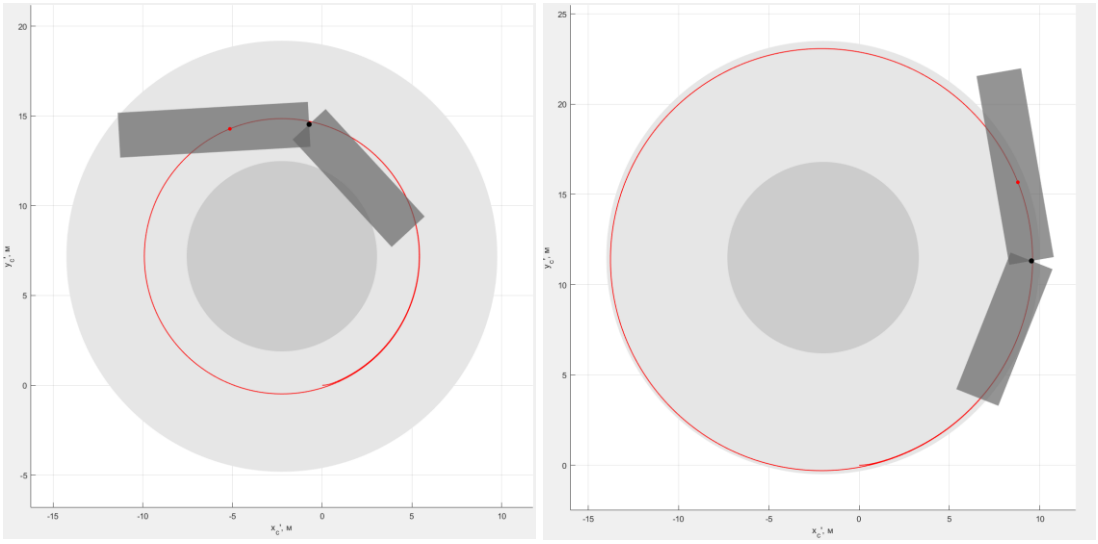
Стационарным решениям (состояниям равновесия, особым точкам, точкам покоя) $\omega_1 = \text{const}, u_1 = \text{const}, \phi = \text{const}$ системы (реализуются при и v_1 = const, θ = const) отвечают круговые траектории всех точек двухзвенника в плоскости дороги.

Задание параметров системы:

m_1 = 15785 кг; m_2 = 11214 кг; a = 3,358 м; b = 2,602 м; b_1 = 0,093 м; d_1 = 4,416 м; v_1 = 4,2 м/с; θ = 0,67 рад; $k_1 \approx$ 800000 Н/рад; $k_2 \approx$ 980000 Н/рад; $k_3 \approx$ 1260000 Н/рад; J_1 = 54 947 кг · м^2; J_2 = 24 840 кг · м^2; χ_i = 0,8; K = 1,25 м.

Ниже представлены результаты численного интегрирования модели при значениях управляющих параметров v_1 и θ.

Так значениям (v_1 = 2 м/с, θ = 0,71 рад) и (v_1 = 3,2 м/с, θ = 0,46 рад) соответствуют круговые стационарные режимы, изображенные на рисунке 2а и 2б соответственно, траектория движения центра тяжести первой секции в плоскости дороги и конфигурация сочлененного автобуса представлены на рис.2.



а) б)

Рис. 2. Траектория центра тяжести тягача в плоскости дороги при а) - v_1 = 2 м/с, θ = 0,71 рад; б) - v_1 = 3,2 м/с, θ = 0,46 рад

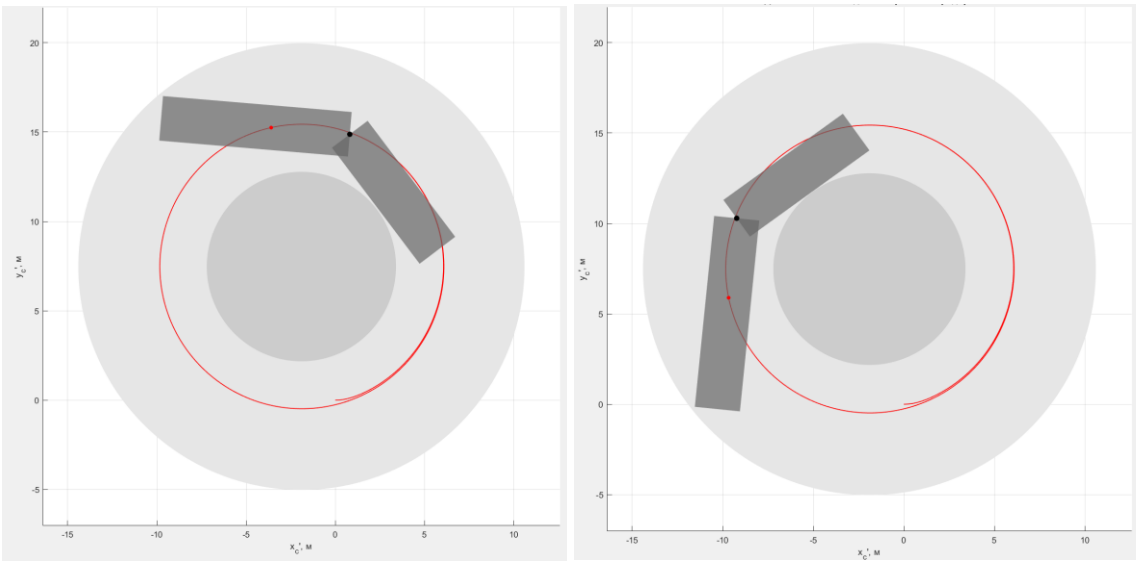
На рисунке 2 показаны положения сочлененного автобуса при движении по круговому коридору, габариты которого соответствуют правилам ООН. Видно, что при заданных управляющих параметрах в первом случае задняя секция, а во втором случае передняя и задняя секции выходят за габариты коридора.

Необходимо найти такие значения параметров v_1 и θ, при которых сочлененный автобус будет проходить круговой коридор, вписываясь в его габариты.

Методом последовательных приближений были получены такие значения управляющих параметров v_1 = 4,2 м/с, θ = 0,67 рад; при которых обеспечивается прохождение коридора без выхода габаритов, что соответствуют допустимому

сочетанию скорости и угла поворота управляемых колес, указанному в технической документации на прототип автобуса.

Рисунок 3 иллюстрирует процесс прохождения автобусом кругового коридора, габариты которого соответствуют правилам ООН.



а – вхождение в коридор, рис б – прохождение коридора

Рис. 3. Прохождение автобусом кругового коридора (габариты коридора соответствуют правилам ООН)

Выводы

Построена нелинейная модель движения двухзвенного сочлененного автобуса габаритные и массовые характеристики которого соответствуют выбранному прототипу. Силы бокового увода представлены в математической модели в виде монотонно возрастающей функции, имеющей характер кривой насыщения.

С помощью математической модели показано, что при ряде сочетаний скоростей и углов поворота управляемых колес (например, $v_1 = 2$ м/с, $\theta = 0{,}71$ рад и $v_1 = 3{,}2$ м/с, $\theta = 0{,}45$ рад) круговые режимы существуют, но автобус выходит за габариты кругового коридора, соответствующего правилам ООН.

Методом последовательных приближений найдено сочетание управляющих параметров $v_1 = 4{,}2$ м/с, $\theta = 0{,}67$ рад, обеспечивающее прохождение коридора без выхода за его габариты; допустимые сочетания (v_1, θ) могут рассматриваться как рекомендации по выбору режима выполнения маневра. На основе серии расчетов может быть построена карта допустимых (v_1, θ) для коридора R=12,5 м; r=5,3 м.

Предложенный подход может быть использован при оценке вписываемости сочлененных автобусов в стандартные габаритные коридоры и при выборе допустимых режимов маневра на реальных маршрутах.

Список литературы

1. Pacejka H. B. Tire and Vehicle Dynamics. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. – 642 p.

2. Liu Q., Zhang C., Gordon T. J., Wang J. Dynamics and control of articulated passenger vehicles on roads // Vehicle System Dynamics. – 2025. – Vol. 63, No. 7. – P. 1395–1457. – DOI: 10.1080/00423114.2025.2507405.

3. Лобас Л. Г., Вербицкий В. Г. Качественные и аналитические методы в динамике колесных машин. – Киев : Наукова думка, 1990. – 232 с.

4. Michałek M. M., Patkowski B., Gawron T. Modular kinematic modelling of articulated buses // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – Vol. 69, No. 8. – P. 8381–8394. – DOI: 10.1109/TVT.2020.2999639.

5. Shen L., Zhang L. Trajectory Following Control of Modern Configurable Multi-Articulated Urban Bus Based on Model Predictive Control // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, No. 24. – Art. 16619. – DOI: 10.3390/su142416619.

6. Lee T., Jeong Y. A Tube-Based Model Predictive Control for Path Tracking of Autonomous Articulated Vehicle // Actuators. – 2024. – Vol. 13, No. 5. – Art. 164. – DOI: 10.3390/act13050164.

7. Zhou Y., Chung K.-W. Path tracking control of a tractor-trailer wheeled robot kinematics with a passive steering angle // Applied Mathematical Modelling. – 2022. – Vol. 109. – P. 341–357. – DOI: 10.1016/j.apm.2022.04.025.

8. Murillo M., Sánchez G., Deniz N. N., Genzelis L., Giovanini L. Improving path-tracking performance of an articulated tractor-trailer system using a non-linear kinematic model // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – Vol. 196. – Art. 106826. – DOI: 10.1016/j.compag.2022.106826.

9. De Felice A., Mercantini M., Sorrentino S. Stability analysis of articulated bus in straight-ahead running manoeuvre // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2021. – Vol. 7, No. 3. – P. 1649–1662. – DOI: 10.22055/JACM.2021.36566.2869.

10. Lei T., Wang J., Du H., Dong G., Yu D., Zhang J. Modelling and stability analysis of articulated vehicles // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Art. 3663. – DOI: 10.3390/app11083663.

11. Sakhno V. P., Polyakov V. M., Sharai S. M., Murovanyi I. S., Omelnytskyi O. Ye. Sharnirno-zchlenovani avtobusy. Manevrenist ta stiikist [Articulated buses. Maneuverability and stability]. – Lutsk : LNTU, 2021. – 220 p. (на украинском языке).

12. Sakhno V. P., Murovanyi I. S., Sharai S. M., Kotenko A. S. Comparative analysis of articulated buses for maneuverability // Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport. – 2024. – No. 2. – P. 197–207. – DOI: 10.36910/automash.v2i23.1542.

13. Song J., Yin G., Wang Y., Dai X., Hao H. Research on the longitudinal and transverse coupling dynamic behavior and yaw stability of an articulated electric bus // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 11. – Art. 2449. – DOI: 10.3390/en17112449.

14. Sakhno V. P., Murovanyi I., Kotenko A. To determination of the stability of an articulated bus with a self-aligning trailer axle // Transport Technologies. – 2025. – Vol. 6, No. 1. – P. 95–110. – DOI: 10.23939/tt2025.01.095.

15. Vorotovic G., Rakicevic B. B., Mitic S., Stamenkovic D. Determination of Cornering Stiffness Through Integration of a Mathematical Model and Real Vehicle Exploitation Parameters // FME Transactions. – 2013. – Vol. 41, No. 1. – P. 66–71.

16. Xu Z., Lu Y., Chen N., Han Y. Integrated Adhesion Coefficient Estimation of 3D Road Surfaces Based on Dimensionless Data-Driven Tire Model // Machines. – 2023. – Vol. 11, No. 2. – Art. 189. – DOI: 10.3390/machines11020189.

17. Автобус ЛиАЗ-621365-79 (экологический класс 5): руководство по эксплуатации. – Ликино-Дулево : ООО «Ликинский автобусный завод», 2018. – 150 с.

18. Allen R. W., Klyde D. H., Rosenthal T. J., Smith D. M. Estimation of Passenger Vehicle Inertial Properties and Their Effect on Stability and Handling // SAE Technical Paper 2003-01-0966. – 2003. – DOI: 10.4271/2003-01-0966.

19. ГОСТ 33987–2016. Колесные транспортные средства. Требования к маневренности и методы испытаний : национальный стандарт Российской Федерации. – Москва : Стандартинформ, 2016. – Действующая редакция.

20. Правила ЕЭК ООН № 107 (UNECE Regulation No. 107). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий

M2 и M3 в отношении их общей конструкции. – Женева : UNECE, действующая редакция.

21. Петров А. В. Безопасность как базовая категория процесса эксплуатации пожарных автомобилей // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – № 1 (5). – С. 480–484. – EDN DPXUCA.

22. Петров А. В., Берко А. В. К вопросу о моделировании безопасности пожарного автомобиля // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – № 3 (7). – С. 394–397. – EDN CBEMCK.

References

1. Pacejka, H.B. (2002), *Tire and Vehicle Dynamics*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

2. Liu, Q., Zhang, C., Gordon, T.J. and Wang, J. (2025), "Dynamics and control of articulated passenger vehicles on roads", *Vehicle System Dynamics*, vol. 63, no. 7, pp. 1395–1457. DOI: 10.1080/00423114.2025.2507405.

3. Lobas, L.G. and Verbitsky, V.G. (1990), *Kachestvennye i analiticheskie metody v dinamike kolesnykh mashin* [Qualitative and analytical methods in the dynamics of wheeled vehicles], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

4. Michałek, M.M., Patkowski, B. and Gawron, T. (2020), "Modular kinematic modelling of articulated buses", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 8, pp. 8381–8394. DOI: 10.1109/TVT.2020.2999639.

5. Shen, L. and Zhang, L. (2022), "Trajectory Following Control of Modern Configurable Multi-Articulated Urban Bus Based on Model Predictive Control", *Sustainability*, vol. 14, no. 24, art. 16619. DOI: 10.3390/su142416619.

6. Lee, T. and Jeong, Y. (2024), "A Tube-Based Model Predictive Control for Path Tracking of Autonomous Articulated Vehicle", *Actuators*, vol. 13, no. 5, art. 164. DOI: 10.3390/act13050164.

7. Zhou, Y. and Chung, K.-W. (2022), "Path tracking control of a tractor-trailer wheeled robot kinematics with a passive steering angle", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 109, pp. 341–357. DOI: 10.1016/j.apm.2022.04.025.

8. Murillo, M., Sánchez, G., Deniz, N.N., Genzelis, L. and Giovanini, L. (2022), "Improving path-tracking performance of an articulated tractor-trailer system using a non-linear kinematic model", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 196, art. 106826. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106826.

9. De Felice, A., Mercantini, M. and Sorrentino, S. (2021), "Stability analysis of articulated bus in straight-ahead running manoeuvre", *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 7, no. 3, pp. 1649–1662. DOI: 10.22055/JACM.2021.36566.2869.

10. Lei, T., Wang, J., Du, H., Dong, G., Yu, D. and Zhang, J. (2021), "Modelling and stability analysis of articulated vehicles", *Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, art. 3663. DOI: 10.3390/app11083663.

11. Sakhno, V.P., Polyakov, V.M., Sharai, S.M., Murovanyi, I.S. and Omelnytskyi, O.Ye. (2021), *Sharnirno-zchlenovani avtobusy. Manevrenist ta stiikist* [Articulated buses. Maneuverability and stability], LNTU, Lutsk, Ukraine (in Ukrainian).

12. Sakhno, V.P., Murovanyi, I.S., Sharai, S.M. and Kotenko, A.S. (2024), "Comparative analysis of articulated buses for maneuverability", *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, no. 2, pp. 197–207. DOI: 10.36910/automash.V2I23.1542.

13. Song, J., Yin, G., Wang, Y., Dai, X. and Hao, H. (2024), "Research on the longitudinal and transverse coupling dynamic behavior and yaw stability of an articulated electric bus", *Energies*, vol. 17, no. 11, art. 2449. DOI: 10.3390/en17112449.

14. Sakhno, V.P., Murovanyi, I. and Kotenko, A. (2025), "To determination of the stability of an articulated bus with a self-aligning trailer axle", *Transport Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 95–110. DOI: 10.23939/tt2025.01.095.

15. Vorotovic, G., Rakicevic, B.B., Mitic, S. and Stamenkovic, D. (2013), "Determination of Cornering Stiffness Through Integration of a Mathematical Model and Real Vehicle Exploitation Parameters", *FME Transactions*, vol. 41, no. 1, pp. 66–71.

16. Xu, Z., Lu, Y., Chen, N. and Han, Y. (2023), "Integrated Adhesion Coefficient Estimation of 3D Road Surfaces Based on Dimensionless Data-Driven Tire Model", *Machines*, vol. 11, no. 2, art. 189. DOI: 10.3390/machines11020189.

17. Likinsky Bus Plant (2018), *Avtobus LiAZ-621365-79 (ekologicheskiy klass 5): rukovodstvo po ekspluatatsii* [LiAZ-621365-79 Bus (Euro 5): operation manual], Likinsky Bus Plant LLC, Likino-Dulevo, Russia.

18. Allen, R.W., Klyde, D.H., Rosenthal, T.J. and Smith, D.M. (2003), "Estimation of Passenger Vehicle Inertial Properties and Their Effect on Stability and Handling", *SAE Technical Paper 2003-01-0966*. DOI: 10.4271/2003-01-0966.

19. GOST 33987–2016 (2016), *Kolesnye transportnye sredstva. Trebovaniya k manevrennosti i metody ispytaniy* [Wheeled vehicles. Maneuverability requirements and test methods], Standartinform, Moscow, Russia (current edition).

20. UNECE (n.d.), *Pravila EHK OON № 107. Edinoobraznye predpisaniya, kasayushchiesya ofitsial'nogo utverzhdeniya transportnykh sredstv kategoriy M2 i M3 v otnoshenii ikh obshchey konstruktsii* [UNECE Regulation No. 107. Uniform provisions concerning the approval of category M2 and M3 vehicles with regard to their general construction], Geneva, Switzerland (current edition).

21. Petrov, A.V. (2020), "Bezopasnost' kak bazovaya kategoriya protsessa ekspluatatsii pozharnykh avtomobiley" [Safety as a basic category of the operation process of fire trucks], *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*, no. 1 (5), pp. 480–484.

22. Petrov, A.V. and Berko, A.V. (2020), "K voprosu o modelirovanii bezopasnosti pozharnogo avtomobilya" [On the issue of modeling the safety of a fire truck], *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*, no. 3 (7), pp. 394–397.

Moisia D.L, Bobrov V.V.

NONLINEAR MODEL OF ARTICULATED BUS MOTION AND ITS APPLICATION TO SWEPT-PATH ENVELOPE COMPLIANCE ASSESSMENT

Abstract. *This paper considers a nonlinear planar model of articulated bus motion. The model is implemented in MATLAB and used to analyze steady-state circular driving regimes and the vehicle's compliance with a circular swept-path envelope specified by bus maneuverability requirements (UNECE Regulation No. 107; referenced in GOST 33987-2016 [19,20]). It is demonstrated that not all combinations of longitudinal speed and steering angle ensure successful passage within the prescribed envelope. Using a sequential parameter-selection procedure, combinations of control parameters are identified that allow the articulated bus to pass the circular swept-path envelope (R = 12.5 m; r = 5.3 m). The obtained results can be applied to the maneuverability assessment of articulated buses and to the selection of permissible maneuvering regimes in constrained urban environments.*

Keywords: *articulated bus; mathematical model; maneuverability; circular swept-path envelope; tire lateral forces.*

Сведения об авторах:

Мойся Дмитрий Леонидович
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия,
заведующий кафедрой технической эксплуатации автомобилей,
кандидат технических наук,
E-mail: dmitrymoisia@dat-dn.ru

Бобров Виктор Вячеславович
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия,
старший преподаватель кафедры технической эксплуатации автомобилей
E-mail: bobrov_viktor_dat@mail.ru

Information about the authors:

Moisia Dmitry Leonidovich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport," Donetsk, Russia
Head of the Department of Technical Operation of Automobiles,
Ph.D. in Engineering
E-mail: dmitrymoisia@dat-dn.ru

Bobrov Viktor Vyacheslavovich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport," Donetsk, Russia
Senior Lecturer, Department of Technical Operation of Automobiles
E-mail: bobrov_viktor_dat@mail.ru

УДК 629.113.001

Дик А.Б.

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИНЫ

Аннотация. *В статье приводится полуэмпирическая модель для расчета взаимосвязей силовых и кинематических параметров шины как элемента, формирующего активную безопасность автомобиля. Данная модель ограничивается описанием стационарных характеристик шины, которые практически не изменяются по времени или же изменяются настолько медленно, что влиянием динамических явлений можно пренебречь (квазистационарные характеристики).*

Ключевые слова: *математическая модель шины, описание стационарных и фрикционных характеристик шин, силовые и кинематические параметры колеса с эластичной шиной.*

Постановка задачи

При решении задач, связанных с обеспечением устойчивости, управляемости, тормозной эффективности, а также ряда других свойств автомобиля, необходимо располагать характеристиками шины как элемента, взаимодействующего с опорной поверхностью и формирующего силы, в значительной мере определяющие поведение автомобиля. Для описания взаимосвязей силовых параметров с кинематическими параметрами движения колес с эластичными шинами наиболее эффективными являются эмпирические и полуэмпирические модели шины, поскольку шина для автомобиля является готовым изделием с заданными качествами.

Основная часть.

При описании стационарных характеристик будем рассматривать шину как систему с продольным S_x и боковым S_y проскальзываниями пятна контакта на входе и продольной R_x и боковой R_y реакциями на выходе, (см. рис. 1).

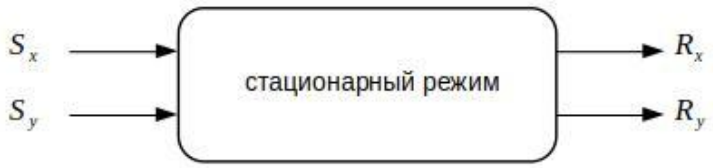


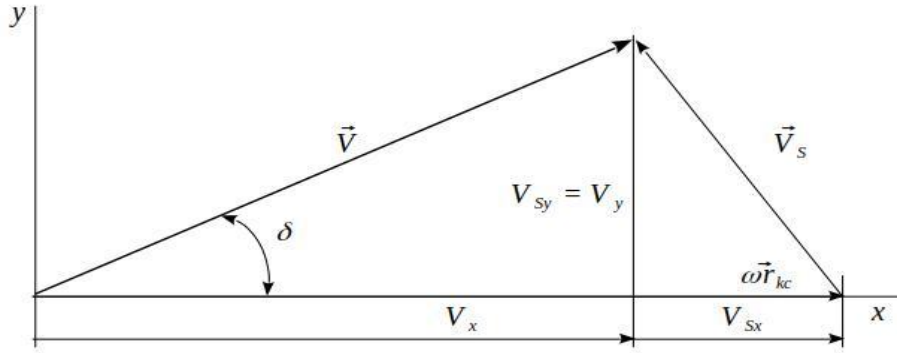
Рис. 1. Входные и выходные параметры шины

Проскальзывания S_x и S_y являются соответствующими проекциями вектора комбинированного проскальзывания $\vec{S}$, которое, как показано в работах [4, 5], определяется как

$$\vec{S} = \frac{\overrightarrow{V_s}}{V_b}, \quad (1)$$

где $\overrightarrow{V_s}$ - скорость проскальзывания, м/с (рис. 2);

V_b - базовая скорость, м/с.



$\vec{V}$ - вектор скорости поступательного движения центра колеса;
$\vec{V_s}$ - вектор скорости проскальзывания; δ - угол бокового увода;
V_{sx}, V_{sy} - скорости продольного и бокового проскальзывания.

Рис. 2. К определению проскальзывания шины в стационарном режиме качения:

Базовая скорость принимается несколько выше абсолютного значения скорости поступательного перемещения центра колеса

$$V_b = |V| + V_{min},$$

чем предотвращается деление на нуль (V_{min}~0,01 м/с).

Составляющие S_x и S_y при этом определяются как:

$$S_x = \frac{V_{sx}}{V_b} = \frac{\omega \cdot r_{kc} - V_x}{V_b}, \quad (2)$$

$$S_y = \frac{V_{sy}}{V_b}, \quad (3)$$

где ω - угловая скорость вращения колеса, рад/с;

r_{kc} - радиус качения в свободном режиме, м.

Качение колеса без продольного проскальзывания при этом соответствует режиму качения без продольной реакции, то есть свободному режиму.

В ведущем режиме $(\omega \cdot r_{kc} > V_x)$ продольное проскальзывание тогда положительно, а в тормозном - отрицательно.

Касательную реакцию R, как показано в работах [4, 5], целесообразно представить в виде произведения следующих составляющих:

$$R = R_z \cdot \varphi \cdot f_s, \quad (4)$$

где - $R_z \cdot \varphi$ - предельная по сцеплению касательная реакция, Н;

- R_z - радиальная нагрузка, Н;

- φ - коэффициент сцепления;

- f_s - функция, имеющая смысл степени реализации потенциальных сцепных свойств шины и опорной поверхности в зависимости от проскальзывания.

Функция реализации сцепления f_s, как это было предложено еще в работе [6], аппроксимируется следующим эмпирическим выражением:

$$f_s = sin[a \cdot arctg(b \cdot S)], \quad (5)$$

где a, b - коэффициенты, определяющие протекание функции;

S - проскальзывание.

Коэффициенты a и b определяются по следующим двум ключевым параметрам, рис. 3:

$-\eta_s = \frac{df_s}{dS}$ при $S \to 0$ - удельная «жесткость» проскальзывания;

$-f_b$ - коэффициент снижения сцепления, численно равный значению функции f_s при величине проскальзывания $S = 1$;

Используя выражение (5), получаем следующую систему уравнений относительно коэффициентов a и b:

$$\eta_s = a \cdot b;$$
$$f_b = sin[a \cdot arctg(b)],$$

которая преобразуется к трансцендентному уравнению относительно коэффициента b:

$$K_z \cdot b = arctg\ b,$$

где $K_z = \frac{\pi - \arcsin(f_b)}{\eta_s}$ - вспомогательный параметр.

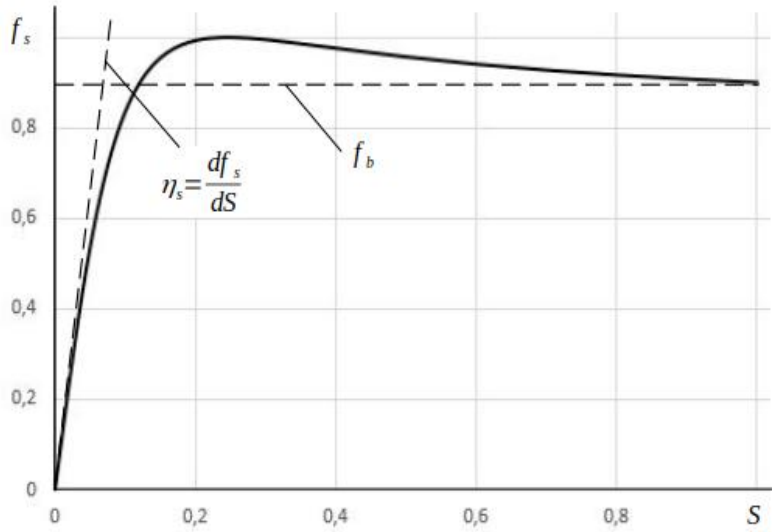


Рис. 3. Ключевые параметры, определяющие протекание функции f_s.

Решая это уравнение методом Ньютона [3], получаем во втором приближении следующее выражение для определения коэффициента b:

$$b = \frac{(1+b_1^2)\ arctg(b_1) - b_1}{K_z\ (1 + b_1^2) - 1}, \quad (6)$$

где $b_1 = \frac{\pi}{2K_z}$ – решение данного уравнения в первом приближении.

Как показано в работе [4], такое приближенное определение значения коэффициента b дает вполне удовлетворительные результаты.

При известном значении коэффициента b коэффициент a тогда определяется из соотношения

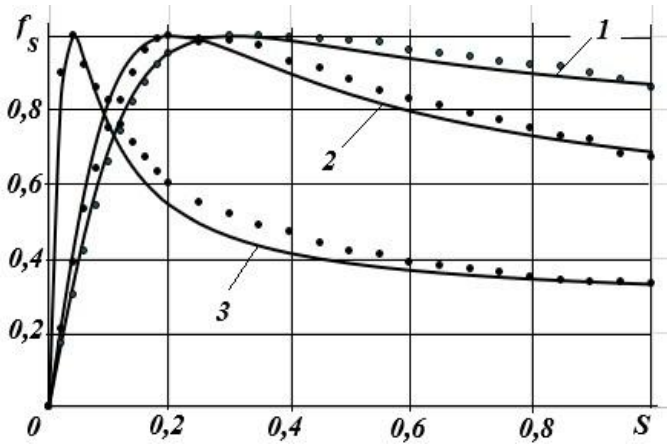
$$a = \frac{\eta_s}{b}. \quad (7)$$

На рис. 4 сопоставлены экспериментальные функции реализации сцепления f_s с рассчитанными по выражению (5).

В работах [4, 5, 6] показано, что сравнительно простая формула (5) с двумя коэффициентами достаточно хорошо отражает протекание экспериментальных характеристик как продольного, так и бокового сцепления и обеспечивает при этом:

- требуемую крутизну нарастания в начале координат,
- наличие максимума при критическом проскальзывании,
- последующее снижение до величины f_b при $S = 1$.

Лишь для характеристик с экстремально крутым нарастанием и последующим крутым снижением данное аппроксимирующее выражение дает несколько завышенные значения в закритической области.



1 - Шина Firestone 10.0 x 20/F, $R_z = 23{,}6$кН; $V = 4{,}8$ км/ч;
2 - Шина Firestone 12.0 x 20/F, $R_z = 35{,}8$кН; $V = 88{,}5$ км/ч;
1, 2 – по экспериментальным данным из работы [8];
3 - шина 205/55 R15 плотный снег; по данным из работы [9].

Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости степени реализации сцепления от проскальзывания

Значение так называемого «*критического*» проскальзывания $S_к$, соответствующее максимуму функции f(s) с известными коэффициентами a и b, получается равным:

$$S_k = \frac{1}{b}\, tg(\frac{\pi}{2a}). \quad (8)$$

Рассчитанные по данному выражению значения проскальзывания S_k, как показано в работе [4], неплохо коррелируют с экспериментальными данными.

При комбинированном проскальзывании, как например для катящегося с уводом тормозящего колеса, касательная реакция R также описывается выражением (4) с учетом (5), с той лишь разницей, что протекание зависимости $R(S)$ при этом определяется не только величиной проскальзывания, но и его направлением, характеризуемого углом β_S отклонения вектора $\vec{S}$ от продольной оси. То есть по мере поворота вектора $\vec{S}$ форма кривой $R(S)$ плавно изменяется от характеристики «чистого» продольного проскальзывания $R_x(S_x)$ при $\beta_S = 0$ до характеристики «чистого» бокового проскальзывания $R_y(S_y)$ при $\beta_S = \frac{\pi}{2}$ (рис. 5).

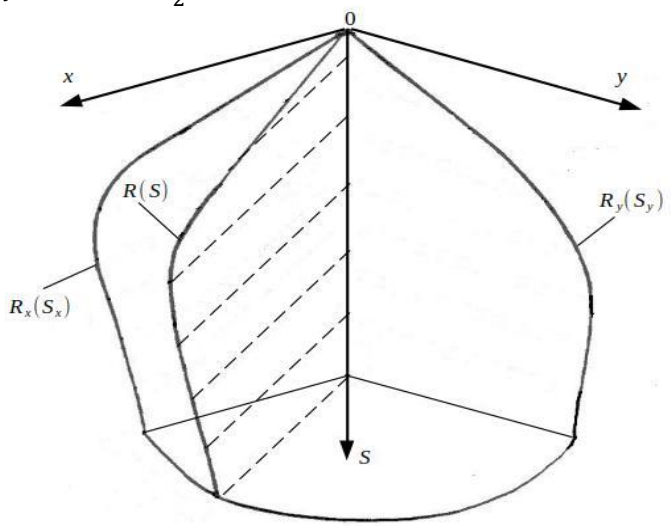


Рис. 5. Обобщенная характеристика комбинированного проскальзывания

Общий вид формулы, описывающей характеристику проскальзывания, при этом

сохраняется, лишь ключевые параметры, определяющие протекание этой характеристики, корректируются в зависимости от угла поворота вектора $\vec{S}$.

Зависимости ключевых параметров от угла поворота вектора $\vec{S}$ представляются в следующей форме:

$$\varphi = \varphi_x \varepsilon_\varphi(\beta_s); \quad (9)$$

$$\eta_S = \eta_{Sx} \varepsilon_\eta(\beta_s); \quad (10)$$

$$f_b = f_{bx} \varepsilon_f(\beta_s), \quad (11)$$

где φ_x, η_{Sx}, f_{bx} – значения соответствующих ключевых параметров для продольного направления;

ε_φ, ε_η, ε_f – соответствующие коэффициенты коррекции по углу β_S.

Коэффициенты ε_φ и ε_f определяются исходя из предположения об эллиптическом законе изменения предельной по сцеплению реакции R_φ (*эллипс сцепления*), и реакции полностью скользящего колеса R_b (*эллипс трения*). При этом, как показано в работе [4], получаем:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{n_\varphi}{\sqrt{(\sin\beta_s)^2 + (n_\varphi \cos\beta_s)^2}}; \quad (12)$$

$$\varepsilon_f = \frac{n_\varphi n_f}{\varepsilon_\varphi \sqrt{(\sin\beta_s)^2 + (n_\varphi n_f \cos\beta_s)^2}}, \quad (13)$$

где $n_\varphi = \frac{\varphi_y}{\varphi_x}$ - соотношение коэффициентов бокового и продольного сцепления (показатель анизотропии сцепления);

$n_f = \frac{f_{by}}{f_{bx}}$ - соотношение соответствующих коэффициентов снижения сцепления (показатель анизотропии трения).

По мере поворота вектора $\vec{S}$ значения коэффициентов ε_φ и ε_f плавно изменяются от 1 ($\beta_S = 0$) до соответственно $\varepsilon_\varphi = n_\varphi$ и $\varepsilon_f = n_f$.

Коэффициент коррекции удельной «жесткости» проскальзывания ε_η определяется с использованием простой физической модели шины типа «*щетка*» [7, 10].

При этом приняты следующие допущения:

–форма площадки контакта - прямоугольная;

–распределение нормальных напряжений по длине контакта - эллиптическое (для получения одноэтапного описания), а по ширине - равномерное;

–коэффициент трения - постоянный.

Выражение для закона распределения нормальных напряжений по длине площадки контакта тогда можно записать в следующем виде:

$$p_z = \frac{8\,R_z}{\pi\,L_k} \sqrt{\frac{x}{L_k}\left(1 - \frac{x}{L_k}\right)}, \quad (14)$$

где L_k- длина площадки контакта, м;

x - текущее расстояние от начала контакта, м;

R_z- радиальная нагрузка, Н.

Текущие значения продольной Δx_1 и боковой Δy_1 деформаций элемента шины в области сцепления (рис. 6) выразим как:

$$\Delta x_1 = l\,\cos\delta - \frac{l\,\omega\,r_{kc}}{V} = \frac{S_x x}{\sqrt{1 - S_y^2}}, \quad (15)$$

$$\Delta y_1 = l\,\sin\delta = \frac{S_y x}{\sqrt{1 - S_y^2}}, \quad (16)$$

где l – расстояние от начала контакта до текущего положения элемента шины в области сцепления, м. (см. рис. 6);

δ - угол бокового увода, рад.

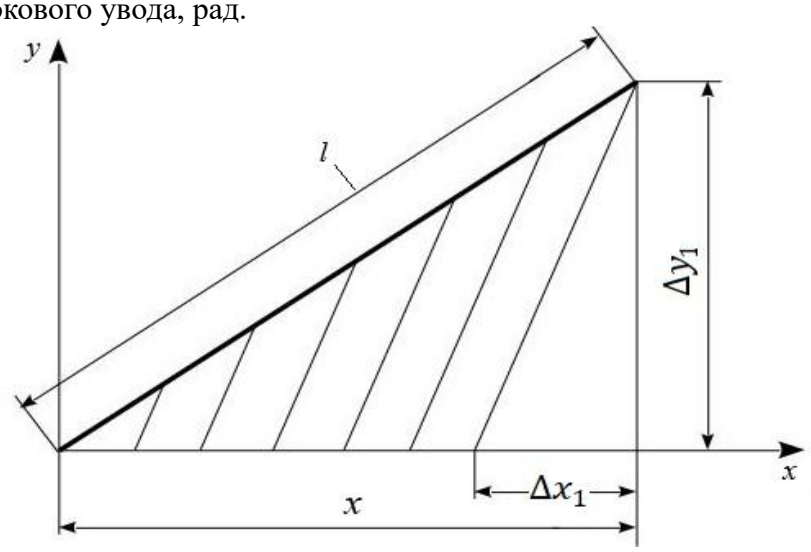


Рис. 6. Схема деформаций шины в области сцепления

Продольные τ_{x1} и боковые τ_{y1} касательные напряжения принимаем пропорциональными соответствующим деформациям. Тогда, с учетом выражений (15) и (16), получаем:

$$\tau_{x1} = c_x \frac{S_x x}{\sqrt{1-S_y^2}} = \xi_x x; \quad (17)$$

$$\tau_{y1} = c_y \frac{S_y x}{\sqrt{1-S_y^2}} = \xi_y x; \quad (18)$$

$$\tau_1 = \sqrt{\tau_{x1}^2 + \tau_{y1}^2} = \xi\, x, \quad (19)$$

где $c_x,\ c_y$ – продольная и боковая жесткости элементов шины, Н/м,

$\xi_x = \frac{c_x S_x}{\sqrt{1-S_y^2}}$, $\xi_y = \frac{c_y S_y}{\sqrt{1-S_y^2}}$ и $\xi = \sqrt{\frac{c_x^2 S_x^2 + c_y^2 S_y^2}{1-S_y^2}}$ – интенсивности нарастания продольных, боковых и суммарных касательных напряжений по длине контакта.

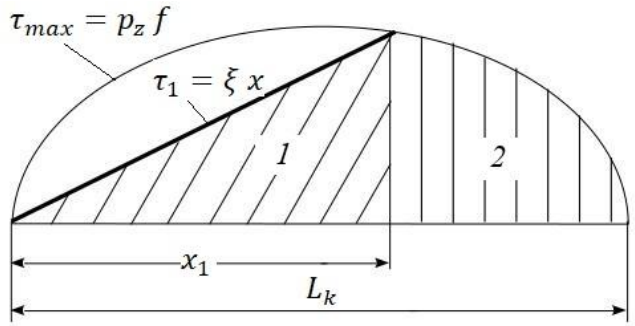
Суммарные касательные напряжения ограничены предельными по трению, рис. 7.

$$\tau_{max} = p_z f = \xi\, x_1,$$

где f – коэффициент трения.

Отсюда, с учетом выражений (14) и (19), получаем величину относительной области сцепления:

$$\lambda = \frac{x_1}{L_k} = \frac{1}{1+\left(\frac{\pi}{4 R_z f}\right)^2 \left(\frac{\xi L_k^2}{2}\right)^2} \quad . \quad (20)$$



1 – область сцепления; 2 – область скольжения

Рис. 7. Распределение касательных напряжений по длине контакта

Интегрируя затем соответствующие напряжения в пределах области сцепления, получаем следующие выражения для составляющих продольной и боковой реакций в этой области:

$$R_{x1} = \int_0^{x_1} \zeta_x x \partial x = \lambda^2 \frac{c_x L_k^2}{2} \frac{S_x}{\sqrt{1-S_y^2}}, \quad (21)$$

$$R_{y1} = \int_0^{x_1} \zeta_y x \, \partial x = \lambda^2 \frac{c_y L_k^2}{2} \frac{S_y}{\sqrt{1-S_y^2}}. \quad (22)$$

Жесткости c_x, c_y и длину контакта L_k целесообразно связать с ключевыми параметрами шины η_{sx} (удельная «жесткость» продольного проскальзывания) и η_{sy} (удельная «жесткость» бокового проскальзывания), характеризующих крутизну нарастания соответствующих функций реализации сцепления в начале координат.

Учитывая, что при малых проскальзываниях S_x и S_y область скольжения в площадке контакта пренебрежимо мала ($\lambda \approx 1$) и $S_y^2 \approx 0$, можно представить выражения (21) и (22) в следующем виде:

$$R_{x1} = \frac{c_x L_k^2}{2} S_x \text{ , при } S_y = 0,$$

$$R_{y1} = \frac{c_y L_k^2}{2} S_y \text{ , при } S_x = 0.$$

То есть реакции R_{x1} и R_{y1} при этих условиях прямо пропорциональны проскальзываниям S_x и S_y, а коэффициенты пропорциональности имеют смысл соответствующих «жесткостей» проскальзывания:

$$C_{sx} = \frac{c_x L_k^2}{2} \text{ и } C_{sy} = \frac{c_y L_k^2}{2}.$$

Принимая во внимание, что в данном случае удельные «жесткости» проскальзывания $\eta_{sx} = \frac{C_{sx}}{R_z f}$ и $\eta_{sy} = \frac{C_{sy}}{R_z f}$, преобразуем выражения (20), (21) и (22) к следующему виду:

$$\lambda = \frac{1}{1+\left(\frac{\pi \eta_{sx}}{4}\right)^2 \frac{S_{xy}^2}{1-S_y^2}}; \quad (23)$$

$$R_{x1} = \eta_{sx} R_z f \lambda^2 \frac{S_x}{\sqrt{1-S_y^2}}; \quad (24)$$

$$R_{y1} = \eta_{sy} R_z f \lambda^2 \frac{S_y}{\sqrt{1-S_y^2}}, \quad (25)$$

где $S_{xy}^2 = S_x^2 + n_c^2 S_y^2$ – приведенное комбинированное проскальзывание;

$n_c = \frac{\eta_{sy}}{\eta_{sx}}$ - показатель анизотропии упругих свойств шины.

В области скольжения (см. рис. 7) суммарные касательные напряжения равны предельным по трению и суммарная касательная реакция определяется как

$$R_2 = \int_{x_1}^{L_k} p_z f \partial x.$$

С учетом выражения (14) для нормальных напряжений при этом получаем

$$R_2 = \frac{R_z f}{\pi}\left[\frac{\pi}{2} - 2(2\lambda - 1)\sqrt{\lambda(1-\lambda)} - \arcsin(2\lambda - 1)\right]. \quad (26)$$

Полагая, что реакция R_2 направлена против скорости скольжения и учитывая также, что при этом скорость скольжения равна скорости комбинированного проскальзывания, разложим эту реакцию на продольную и боковую составляющие:

$$R_{x2} = R_2 \frac{S_x}{S}, \quad (27)$$

$$R_{y2} = R_2 \frac{S_y}{S}. \quad (28)$$

Суммируя теперь соответствующие составляющие касательных реакций в областях сцепления (выражения (24) и (25)) и скольжения (выражения (27) и (28), с учетом (26)), получаем:

$$R_x = R_z f(\eta_{sx} c_1 + c_2)\frac{S_x}{S} \quad ; \quad (29)$$

$$R_y = R_z f(\eta_{sy} c_1 + c_2)\frac{S_y}{S}; \quad (30)$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{R_z f[(\eta_{sx} c_1 + c_2)^2 (\frac{S_x}{S})^2 + \left(\eta_{sy} c_1 + c_2\right)^2 (\frac{S_y}{S})^2]} \quad (31)$$

где $c_1 = \lambda^2 \frac{S}{\sqrt{1 - S_y^2}}$;

$c_2 = [\frac{\pi}{2} - 2(2\lambda - 1)\sqrt{\lambda(1-\lambda)} - \arcsin(2\lambda - 1)]\frac{1}{\pi}$.

Выражение (31) с учетом (23) связывает суммарную касательную реакцию с величиной и направлением вектора проскальзывания $\vec{S}$, что позволяет использовать его для определения зависимости удельной «жесткости» проскальзывания от направления проскальзывания.

Принимая во внимание, что соотношения продольного и бокового проскальзываний к величине комбинированного проскальзывания связаны с углом β_S отклонения вектора проскальзывания $\vec{S}$ от продольного направления:

$$\frac{S_x}{S} = \cos\beta_S \text{ и } \frac{S_y}{S} = sin\,\beta_S,$$

а также то, что удельная «жесткость» проскальзывания здесь равна

$$\eta_S = \frac{C_S}{R_z f} = \frac{1}{R_z f}\frac{\partial}{\partial S}[R(S, \beta_S)] \text{ при } S \to 0.$$

После дифференцирования выражения (31) по параметру S при $\beta_S = const$ получаем для $S = 0$ $(\lambda = 1)$ следующее выражение для коэффициента коррекции удельной «жесткости» проскальзывания по углу β_S:

$$\varepsilon_\eta = \frac{\eta_S}{\eta_{Sx}} = \sqrt{(\cos\beta_S)^2 + (n_c \sin\beta_S)^2}. \quad (32)$$

Величина этого коэффициента изменяется таким образом от значения $\varepsilon_\eta = 1$ при $\beta_S = 0$ до $\varepsilon_\eta = \frac{\eta_{Sy}}{\eta_{Sx}}$ при $\beta_S = \frac{\pi}{2}$.

Более подробно описание данной «щеточной» модели представлено в работах [4] и [6].

Таким образом, по известным значениям ключевых параметров φ_x, f_{bx} и η_{Sx} для продольного направления, а также соответствующих коэффициентов коррекции ε_φ, ε_f и ε_η по выражениям (12), (13) и (32) определяются значения этих параметров для данного направления вектора $\vec{S}$. Через параметры η_S и f_b теперь определяются текущие значения коэффициентов a и b, а далее, величина суммарной касательной реакции R как:

$$R = R_z\varphi \cdot \sin[a \cdot arctg(b \cdot S)].$$

Вследствие анизотропии упругих свойств шины, как известно, имеет место рассогласование направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$, приводящее к тому, что эти векторы не лежат на одной прямой. То есть угол β_R отклонения вектора $\vec{R}$ от продольной оси, необходимый для разложения суммарной касательной реакции на продольную и боковую составляющие, не равен таковому для вектора $\vec{S}$ (рис. 8).

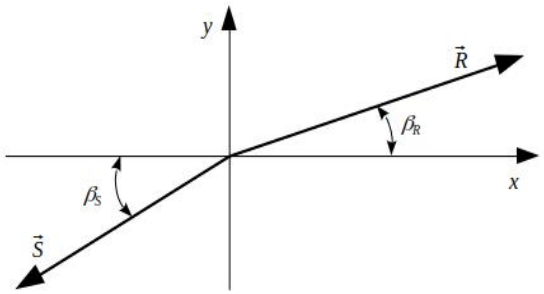


Рис. 8. К рассогласованию направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$

Взаимосвязь углов β_R и β_S, как показано в работах [4] и [6], можно представить в следующем виде:

$$tg\beta_R = m_\beta \cdot tg\beta_S, \quad (33)$$

где m_β - параметр рассогласования направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$.

Аналитическое выражение, описывающее зависимость параметра m_β от величины и направления вектора проскальзывания $\vec{S}$, получаем из соотношения:

$$m_\beta = \frac{tg\beta_R}{tg\beta_S} = \frac{1}{tg\beta_S}\,\frac{R_y(S,\beta_S)}{R_x(S,\beta_S)} \quad (34)$$

с использованием полученных по представленной выше «щеточной» модели выражений (29) и (30) для продольной R_x и боковой R_y реакций. С учетом этого выражение (34) преобразуется к виду:

$$m_\beta = 1 - \left(1 - \frac{\eta_{Sy}}{\eta_{Sx}}\right) \cdot D(S), \quad (35)$$

где $D(S) = \frac{1}{1+\frac{c_2}{c_1\eta_{Sx}}}$ – параметр, характеризующий влияние величины проскальзывания на рассогласование направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$.

При малых проскальзываниях S_x и S_y, когда область скольжения в площадке контакта мала и относительная длина области сцепления $\lambda \to 1$, параметр $D(S) \to 1$. Параметр m_β при этом достигает своего минимального значения $m_{\beta min} = n_c$ и рассогласование направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$ наибольшее.

С ростом проскальзывания область скольжения распространяется на все большую часть площадки контакта, величина параметра $D(S) \to 0$, а параметр $m_\beta \to 1$. То есть, рассогласования направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$ падает и в области больших проскальзываний, этим явлением можно практически пренебречь.

Как показано в работе [4], выражение для расчета параметра $D(S)$ без особой погрешности может быть представлено в следующем виде

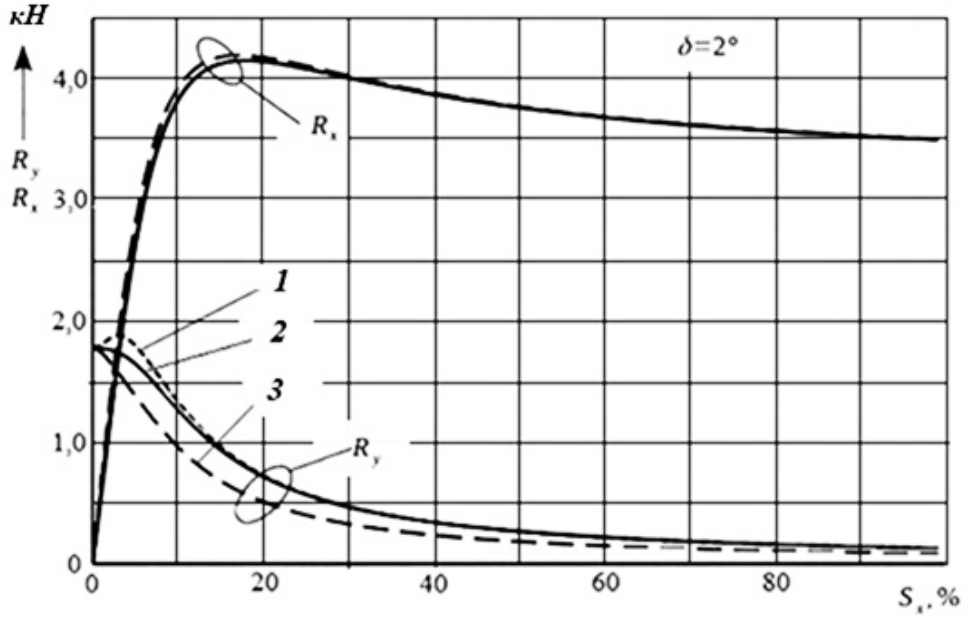
$$D(S) = \frac{1}{1+ (\eta_{Sx}\, S_x)^{2+} (\eta_{Sy}\, S_y)^2}. \quad (36)$$

С учетом этого, выражение для параметра m_β преобразуется к виду

$$m_\beta = 1 - \frac{1 - \frac{\eta_{Sy}}{\eta_{Sx}}}{1 + (\eta_{Sx} S_x)^2 + (\eta_{Sy} S_y)^2}. \quad (37)$$

Анизотропия упругих свойств шины учитывается также в ряде других моделей шины [11], [12]. Но эти модели, как показано в работе [5], не учитывают влияние величины проскальзывания на направление вектора $\vec{R}$.

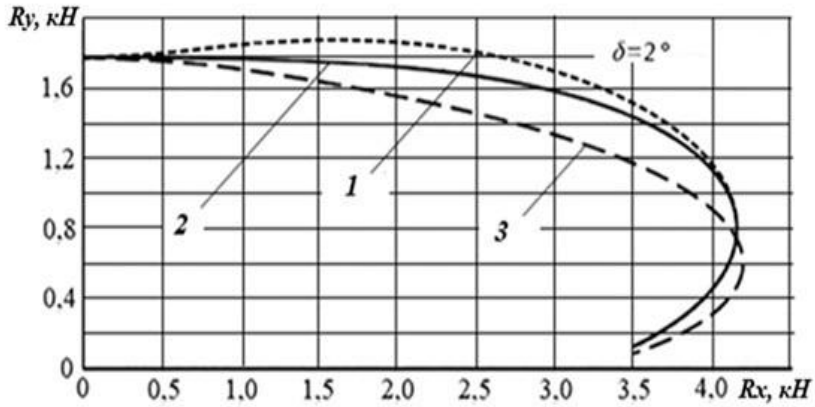
Пренебрежение рассогласованием направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$ $(m_\beta = 1)$ приводит к завышенным расчетным значениям боковой реакции R_y и слегка заниженным значениям продольной реакции R_x в области малых проскальзываний, рис. 9.



1 - $m_\beta = 1$; 2 – данная модель; 3 – модель TM_Simple, $m_\beta = 0{,}7$

Рис. 9. Влияние рассогласования направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$ на протекание характеристики продольного проскальзывания

Более наглядно влияние параметра m_β отражается на протекании зависимости боковой реакции от продольной (рис. 10).



1 - $m_\beta = 1$; 2 – данная модель; 3 – модель TM_Simple, $m_\beta = 0{,}7$

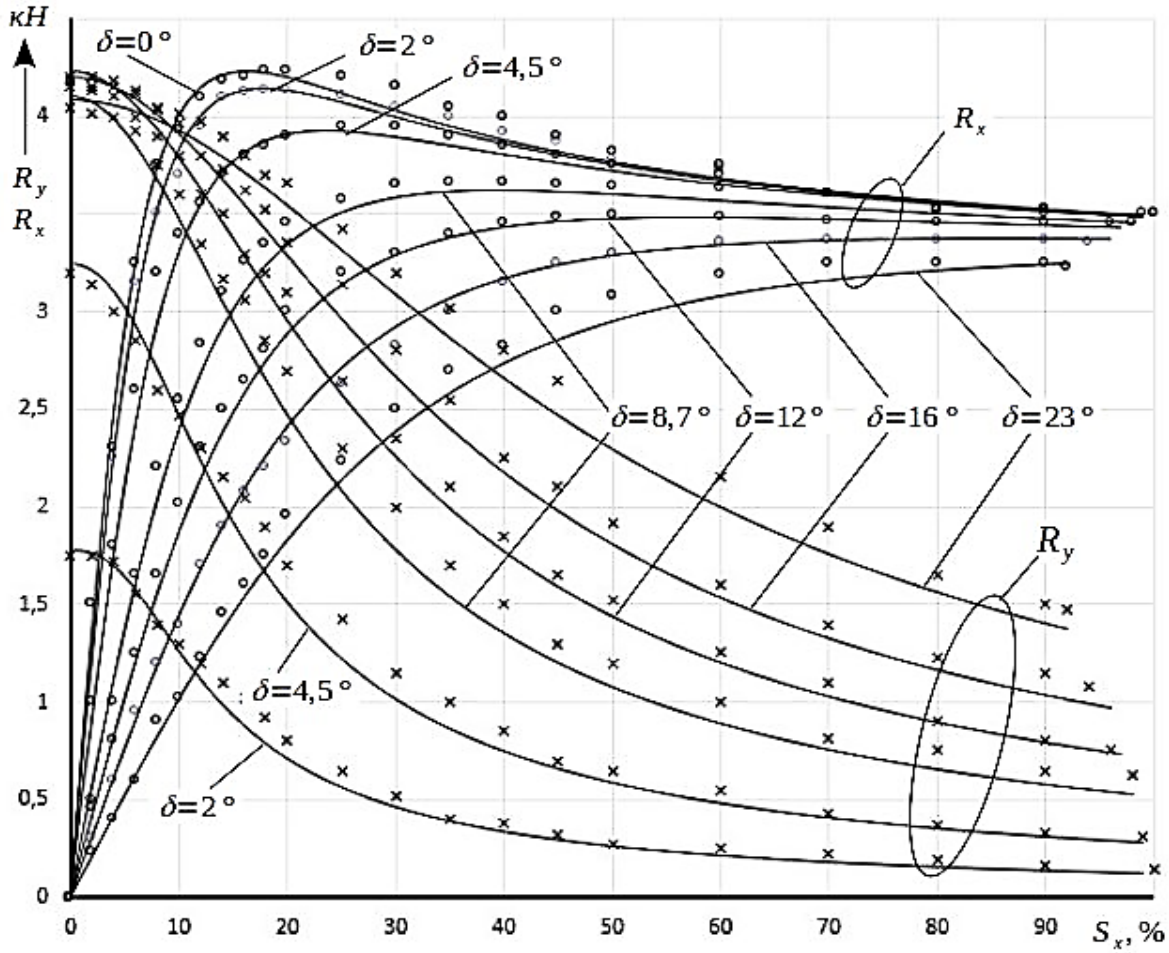
Рис. 10. Влияние рассогласования направлений векторов $\vec{R}$ и $\vec{S}$ на протекание зависимости $R_y(R_x)$

При известном значении параметра m_β продольная и боковая касательные реакции теперь определяются как соответствующие проекции суммарной реакции:

$$R_x = R \cdot cos\beta_R = R\frac{1}{\sqrt{1+(tg\beta_R)^2}} = R\frac{S_x}{\sqrt{(S_x)^2+(m_\beta S_y)^2}}; \quad (38)$$

$$R_y = R \cdot sin\beta_R = R\frac{tg\beta_R}{\sqrt{1+(tg\beta_R)^2}} = R\frac{m_\beta\, S_y}{\sqrt{(S_x)^2+(m_\beta\ S_y)^2}}. \quad (39)$$

На рис. 11 в качестве примера сопоставлены расчетные, полученные по выражениям (38) и (39) и экспериментальные характеристики продольного проскальзывания тормозящего колеса, установленного с различными углами увода.



——— - расчетные значения; × × × × - экспериментальные значения [4].

Рис. 11. Характеристики продольного проскальзывания

Экспериментальные данные при этом взяты из работы [4], для шины размером 205/70 R14 модель И-259, нагрузка $R_z = 5{,}1$ кН, давление в шине $p_w = 170$ кПа, скорость движения $V = 8$ м/с, а параметры шины:

– $C_{sx} = 70$ кН – «жесткость» продольного проскальзывания;

– $C_{sy} = 54$ кН – «жесткость» бокового проскальзывания;

–$\varphi_x = 0{,}83$ – коэффициент продольного сцепления;

– $\varphi_y = 0{,}83$ – коэффициент бокового сцепления;

– $f_{bx} = 0{,}825$ – коэффициент снижения продольного сцепления;

– $f_{by} = 0{,}875$ – коэффициент снижения бокового сцепления.

Выводы

Предложенная полуэмпирическая модель шины для расчета стационарных характеристик проскальзывания показывает достаточно высокое соответствие результатам эксперимента, что в значительной мере обусловлено более аккуратным учетом анизотропии упругих и фрикционных свойств по сравнению с другими моделями. Количество необходимых для выполнения расчетов эмпирических коэффициентов у данной модели не превышает 18, в то время как для расчета аналогичных характеристик по известной модели [13] их необходимо 150.

При надлежащем выборе исходных данных расхождение расчетных и экспериментальных характеристик не превышает 5%.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52900-2007. Шины пневматические для легковых автомобилей и прицепов к ним. Технические условия. – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2008. – 23 с.

2. ГОСТ Р 4.494-94. Система показателей качества продукции. Шины для внедорожных карьерных автомобилей, тракторов, строительных, дорожных, подъемно-транспортных, рудничных и сельскохозяйственных машин. Номенклатура показателей. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1981. – 24 с.

3. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. – Москва : Наука, 1972. – 592 с.

4. Дик А. Б. Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего при движении с уводом : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03. – Омск, 1988. – 213 с.

5. Дик А. Б. Математические модели пневматической шины. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 232 с.

6. Дик А. Б. Исследование динамических характеристик тормозящего колеса // Исследование торможения автомобиля и работы пневматических шин : сборник научных трудов. – Омск, 1983. – С. 38–53.

7. Ечеистов Ю. А., Найденов А. К. Торможение автомобильного колеса на твердой дороге // Автомобильная промышленность. – 1971. – № 6. – С. 24–26.

8. Ervin R. D., Macadam C. C., Fancher P. S. The longitudinal traction characteristics of truck tires as measured on dry pavements. – Ann Arbor, 1975. – 244 p. – URL: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/881/31900.0001.001.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

9. Wassertheurer B. Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn. – 2019. – 224 S. – URL: https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000097330/51664039 (дата обращения: 01.03.2026).

10. Mechanics of Pneumatic Tires / ed. by S. K. Clark. – Washington, DC, 1971. – 864 p. – (NBS Monograph ; No. 122). – URL: https://archive.org/details/mechanicsofpneum122gehm (дата обращения: 01.03.2026).

11. Hirschberg W., Rill G., Weinfurter H. Tire Model TMeasy // Vehicle System Dynamics. – 2007. – Vol. 45, No. S1. – P. 101–119. – DOI: 10.1080/00423110701776284. – URL: https://tugraz.elsevierpure.com/en/publications/tire-model-tmeasy (дата обращения: 01.03.2026).

12. Dimitrov V. Fahrzeugmodellierung für die objektive Fahrdynamikbewertung von Realfahrten : Diplomarbeit. – Graz : TU Graz, 2018. – 106 S. – URL: https://diglib.tugraz.at/fahrzeugmodellierung-fuer-die-objektive-fahrdynamikbewertung-von-realfahrten-2018 (дата обращения: 01.03.2026).

13. Pacejka H. B. Tyre and Vehicle Dynamics. – 2nd ed. – Delft : Delft University of Technology, 2008. – 621 p. – URL: https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TERRAMECHANICS%20AND%20MOBILITY/epdf.pub_tyre-and-vehicle-dynamics-second-edition.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

References

1. GOST R 52900-2007 (2008), *Shiny pnevmaticheskie dlya legkovykh avtomobiley i pricepov k nim. Tekhnicheskie usloviya* [Pneumatic tyres for passenger cars and their trailers. Specifications], FGUP "STANDARTINFORM", Moscow, Russia.

2. GOST R 4.494-94 (1981), *Sistema pokazateley kachestva produktsii. Shiny dlya vnedorozhnykh kar'ernykh avtomobiley, traktorov, stroitel'nykh, dorozhnykh, pod"emno-transportnykh, rudnichnykh i sel'skokhozyaystvennykh mashin. Nomenklatura pokazateley* [Product quality index system. Tyres for off-road mining trucks, tractors, construction, road, lifting and transport, mining and agricultural machines. Nomenclature of indices], IPK Izdatel'stvo standartov, Moscow, Russia.

3. Zel'dovich, Ya.B. and Myshkis, A.D. (1972), *Elementy prikladnoy matematiki* [Elements of applied mathematics], Nauka, Moscow, Russia.

4. Dik, A.B. (1988), *Raschet statsionarnykh i nestatsionarnykh kharakteristik tormozyashchego pri dvizhenii s uvodom* [Calculation of stationary and non-stationary characteristics of a braking wheel in cornering conditions], Ph.D. Thesis, Omsk, Russia.

5. Dik, A.B. (2025), *Matematicheskie modeli pnevmaticheskoy shiny* [Mathematical models of a pneumatic tire], Infra-Inzheneriya, Moscow, Vologda, Russia.

6. Dik, A.B. (1983), "Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik tormozyashchego kolesa" [Study of the dynamic characteristics of a braking wheel], *Issledovanie tormozheniya avtomobilya i raboty pnevmaticheskikh shin* [Research on vehicle braking and pneumatic tire operation], Omsk, Russia, pp. 38–53.

7. Echeistov, Yu.A. and Naydenov, A.K. (1971), "Tormozhenie avtomobil'nogo kolesa na tverdoy doroge" [Braking of a car wheel on a hard road], *Avtomobil'naya promyshlennost'*, no. 6, pp. 24–26.

8. Ervin, R.D., Macadam, C.C. and Fancher, P.S. (1975), *The longitudinal traction characteristics of truck tires as measured on dry pavements, Ann Arbor, USA. Available at: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/881/31900.0001.001.pdf (Accessed* 1 March 2026).

9. Wassertheurer, B. (2019), *Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn* [Tire modeling for driving dynamics simulation on snow, ice and wet roads], 224 p. Available at: https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000097330/51664039 (Accessed 1 March 2026).

10. Clark, S.K. (ed.) (1971), *Mechanics of Pneumatic Tires*, NBS Monograph No. 122, Washington, DC, USA. Available at: https://archive.org/details/mechanicsofpneum122gehm (Accessed 1 March 2026).

11. Hirschberg, W., Rill, G. and Weinfurter, H. (2007), "Tire Model TMeasy", *Vehicle System Dynamics*, vol. 45, no. S1, pp. 101–119. DOI: 10.1080/00423110701776284. Available at: https://tugraz.elsevierpure.com/en/publications/tire-model-tmeasy (Accessed 1 March 2026).

12. Dimitrov, V. (2018), *Fahrzeugmodellierung für die objektive Fahrdynamikbewertung von Realfahrten* [Vehicle modeling for objective vehicle dynamics evaluation of real driving maneuvers], Diplomarbeit, TU Graz, Graz, Austria. Available at: https://diglib.tugraz.at/fahrzeugmodellierung-fuer-die-objektive-fahrdynamikbewertung-von-realfahrten-2018 (Accessed 1 March 2026).

13. Pacejka, H.B. (2008), *Tyre and Vehicle Dynamics*, 2nd ed., Delft University of Technology, Delft, Netherlands. Available at: https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TERRAMECHANICS%20AND%20MOBILITY/epdf.pub_tyre-and-vehicle-dynamics-second-edition.pdf (Accessed 1 March 2026).

Dik A.B.

A SEMI-EMPIRICAL MODEL FOR DESCRIBING STATIONARY CHARACTERISTICS OF A TIRE

Abstract. *The article presents a semi-empirical model for calculating the relationships between the force and kinematic parameters of a tire as an element that forms the active safety of a vehicle. This model is limited to describing the stationary characteristics of the tire, which practically do not change over time or change so slowly that the influence of dynamic phenomena can be neglected (quasi-static characteristics).*

Keywords*: mathematical model of a tire, description of stationary and frictional characteristics of tires, force and kinematic parameters of a wheel with an elastic tire.*

Сведения об авторе

Дик Александр Борисович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия,
кандидат технических наук, профессор-консультант кафедры «Автомобильный транспорт, строительные и дорожные машины»

Information about the author

Dick Alexander Borisovich
Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University», Irkutsk, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Professor-consultant of the Department "Motor Transport, Construction and Road machinery"

УДК 614.84: 629.3

Петров А.В.

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИЙНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОЖАРНОГО АВТОМОБИЛЯ

Аннотация. *В статье рассмотрена проблема моделирования системы «процесс эксплуатации пожарного автомобиля». Обоснована целесообразность применения энтропийной диагностической модели для анализа данной многомерной стохастической системы. В качестве главного критерия оценки процесса эксплуатации предложено использовать категорию «безопасность пожарного автомобиля». Рассмотрен вариант формализации тестируемого свойства системы – безопасности автомобиля – в виде величины риска травмирования сотрудника МЧС при работе на пожарном автомобиле. Намечены основные направления работы по моделированию процесса эксплуатации пожарного автомобиля.*

Ключевые слова*: пожарный автомобиль, процесс эксплуатации, безопасность процесса эксплуатации, риск, энтропия, диагностическая модель.*

Постановка задачи

Описание процесса эксплуатации автомобиля – сложная и многомерная задача. Для специальной техники, в частности, для пожарного автомобиля (ПА), эта задача становится ещё более сложной, т.к. к транспортной работе добавляются процессы выполнения специфических операций с применением установленного на шасси автомобиля дополнительного оборудования. Исследования данного вопроса в основном идут обособленно: одно направление ориентируется на закономерности теории эксплуатационных свойств автомобиля, другое – на разработки в области тактики пожаротушения. Представляется целесообразным применение системного подхода, объединяющего указанные направления. Учитывая вероятностный характер взаимодействия элементов системы «процесс эксплуатации ПА», актуальным является вопрос формирования модели указанной системы для дальнейшего использования её при проектировании новых моделей специальной техники.

Анализ последних исследований

Начиная с 2019 года сотрудниками кафедры аварийно-спасательных работ и техники Донецкого института ГПС МЧС России подготовлен ряд научных публикаций, посвященных проблеме обеспечения безопасности эксплуатации пожарного автомобиля. В работе [6] было предложено рассматривать безопасность как универсальную категорию, охватывающую все процессы жизненного цикла ПА. В работах [7, 8, 9] процесс эксплуатации ПА рассматривался в виде сложной системы типа «человек-машина-среда», состоящей из подсистем:

- «водитель – ПА – дорожная среда»;
- «боевой расчет – ПА – пожар»;
- «технический персонал (или водитель) – ПА – зона обслуживания и ремонта»;
- «дежурный караул – ПА – пожарно-спасательная часть».

Графическая модель данной системы, описывающая взаимосвязь ее структурных элементов, показана на рис. 1.

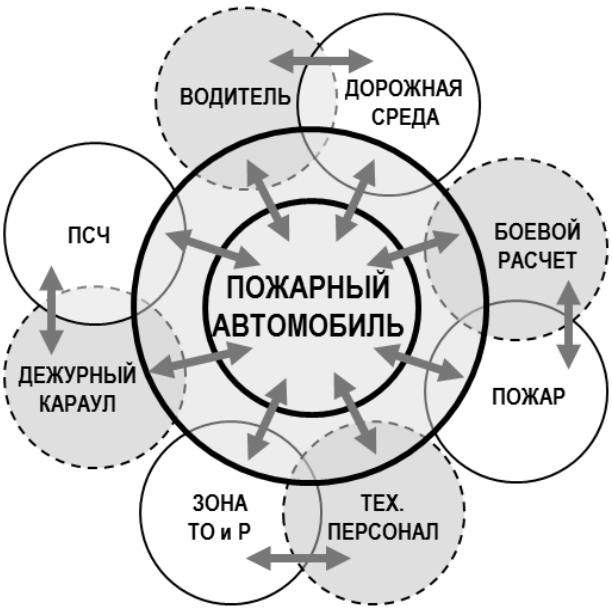


Рис. 1. Модель системы «Процесс эксплуатации пожарного автомобиля»

Целью изучения данной системы является обеспечение безопасности процесса эксплуатации ПА. В качестве возможных подходов к описанию и анализу системы рассматривались логико-вероятностный метод И.А. Рябинина [6, 9], имитационное моделирование [8, 9], методы теории информации [7, 9] и др.

Однако, сложность изучаемой человеко-машинной системы (ее можно характеризовать различными терминами: «организационно-техническая», «эргатическая», «социотехническая»), а также вероятностный (случайный) характер взаимодействия между элементами системы не позволяют создать ее адекватную модель. Отсутствие же модели не дает возможности достичь цели исследования – оценить безопасность конкретного ПА в заданных условиях эксплуатации и предложить план мероприятий по повышению безопасности.

Поиск возможных путей решения данного противоречия привел к альтернативному варианту, который описан в монографии А.Н. Тырсина [13]. Высказывается и аргументировано (с позиций прикладной математики) обосновывается гипотеза, что вместо построения максимально адекватной модели сложной системы в целом достаточно лишь достоверно оценивать ее состояние. Для этого нужно построить диагностическую модель.

В этом контексте важно отметить, что и в области философии науки и техники поднимается вопрос о диагностическом анализе как методологии познания сложных систем. В работе С.В. Кучерявенко [5] высказывается мнение, что диагностический анализ позволяет выявить соотношение между стабильностью и изменчивостью каждого явления мира, его нормой и патологией.

Сложные системы в разных отраслях, как правило, имеют стохастический (вероятностный) характер поведения и являются многомерными. Фундаментальным свойством стохастических систем является энтропия. О перспективности подхода, основанного на анализе изменений энтропии параметров и динамики информационных процессов, для анализа безопасности эксплуатации ПА говорилось в работах [7, 9]. В работе [13] изложен новый подход к энтропийному моделированию таких систем. В

диссертационной работе Г.Г. Геворгяна [2] рассматривается векторное энтропийное моделирование в задачах мониторинга многомерных стохастических систем, а также приводятся результаты решения прикладных задач в различных областях: в медицинской диагностике, в экономике, в сфере безопасности производства на угледобывающих предприятиях.

Цель работы

Целью данной статьи является исследование возможности оценки безопасности процесса эксплуатации ПА при помощи энтропийной диагностической модели, а также определение структуры данной модели.

Основная часть

Термины «диагностика» и «диагностирование» применяются во многих сферах деятельности человека. Чаще всего – в медицине и в технической эксплуатации различных машин. В любом случае, диагностика предполагает оценку состояния объекта диагностирования (постановку диагноза) по некоторому набору контрольных параметров. Проблема состоит в том, насколько достоверным будет диагноз. Недостаточное качество диагностики или ее высокая стоимость часто являются препятствиями для совершенствования существующих технологий. В качестве примера, связанного с темой работы, можно описать действующую систему технического обслуживания (ТО) транспортных средств.

В настоящее время надлежащий уровень технического состояния ПА, как и автомобилей транспортной группы, поддерживается методами планово-предупредительной системы ТО и ремонта. Наблюдается ужесточение отечественных норм пробегов ПА до ТО-1 и ТО-2. Например, периодичность ТО-2, в соответствии с п. 229 Руководства по организации материально-технического обеспечения МЧС России [12], составляет для основных ПА (автоцистерн, пожарных насосных станций и т.д.) – 7 тыс. км, но не реже одного раза в год; для специальных ПА (автолестниц, коленчатых подъемников, рукавных автомобилей и т.д.) – 5 тыс. км, но не реже одного раза в год. Такой жесткий контроль призван гарантировать безопасность, но характеризуется завышенными затратами времени и финансов.

Альтернативой планово-предупредительной системе является обслуживание по фактическому состоянию. Недостаток такого подхода – высокие требования к системе диагностирования технического состояния автомобиля. Преодолеть этот недостаток можно за счет оптимизации процесса диагностирования путем выявления наиболее информативных диагностических параметров.

В работе Г.Д. Кокорева [4], посвященной совершенствованию системы технической эксплуатации автомобилей в сельском хозяйстве, вводится термин «инженерно-кибернетический подход». В рамках этого подхода для оценки эффективности диагностирования автомобилей используется информационная энтропия в качестве количественной характеристики неопределенности технического состояния объекта диагностирования. Для агрегатов и систем автомобиля составляются специальные матрицы диагностирования, по которым методами теории информации рассчитывается, какие из контролируемых параметров будут обладать максимальной информационной ценностью. Именно эти параметры должны проверяться в первую очередь и, таким образом, техническая проблема может быть выявлена за более короткое время.

В приведенном примере диагностирование рассматривается в узком техническом контексте – как оценка состояния узлов и механизмов автомобиля без их разборки. В данной работе задача ставится намного шире – диагностировать состояние всей системы

эксплуатации ПА. Тем не менее, стоит отметить, что для решения прикладной задачи повышения эффективности диагностики автомобилей в современных научных разработках, например, в [4], используется энтропийный (информационный) подход.

Ориентируясь на классическую работу И.А. Биргера «Техническая диагностика» [1], изданную в 1978 году, а также на ГОСТ 20911-89 [3], но учитывая специфику исследуемой социотехнической системы, структуру диагностики можно представить в виде блок-схемы (рис. 2).

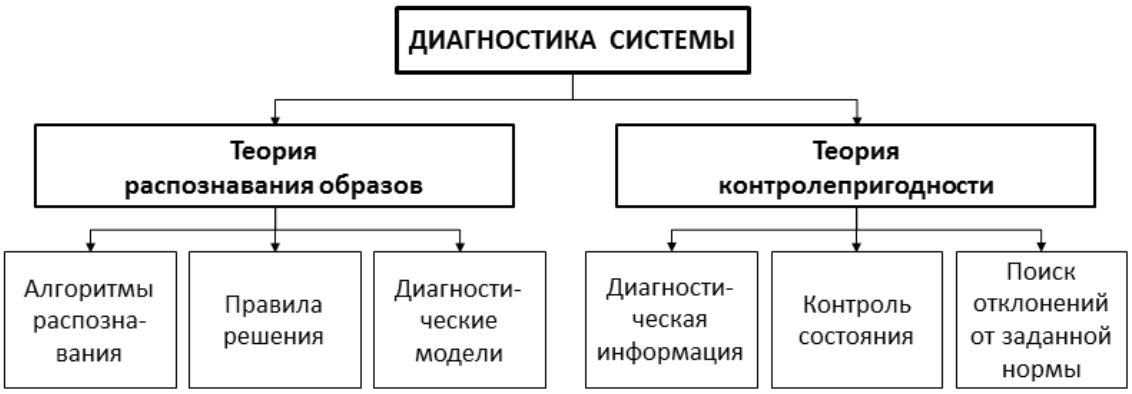


Рис. 2. Структура диагностики системы

Теория распознавания образов, используя диагностические модели при исследовании системы, определяет решающие правила для распознавания текущего состояния и вида отклонений от заданной нормы. Благодаря известным характеристикам отклонений появляется возможность разработки оптимальных алгоритмов распознавания.

Теория контролепригодности решает вопросы рациональной последовательности поиска отклонений, контроля состояния системы. Решения базируются на использовании диагностической информации, характеризующей состояние системы. Под контролепригодностью понимается приспособленность системы к диагностированию.

Переход от прямого моделирования работы системы к диагностической модели позволяет упростить работу исследователя. Вместо того чтобы описывать математическими методами взаимодействие человека и машины, необходимо определить набор основных факторов, характеризующих состояние элементов системы, а далее работать с комплексом данных методами теории информации [14, 15].

Чем сложнее система, тем, естественно, большее количество факторов (контрольных параметров) требуется определить. Поэтому первый вопрос при организации диагностики: «Какие параметры контролировать?». Здесь нужно отталкиваться от четкого понимания структуры системы, использовать ее онтологию [10]. Составив список параметров, необходимо оценить, насколько трудоемка процедура их определения (контролепригодность системы) и, при необходимости, наметить пути улучшения контролепригодности.

Рассмотрим выбор факторов для исследуемой системы. Тестируемое свойство системы – безопасность ПА – удобно формализовать в виде величины риска травмирования сотрудника МЧС при работе на пожарном автомобиле [11]. Все контролируемые параметры должны оказывать, в той или иной степени, влияние на величину риска.

Для определения степени риска травмирования необходимо применять методы, основанные на использовании двух параметров, которые позволяют охарактеризовать

каждый фактор риска. Одним из этих параметров является тяжесть вреда. В качестве второго параметра используется вероятность нанесения вреда (получения травмы).

С учетом ориентации на функцию риска как ключевую для описания системы, модель, представленную на рис. 1, целесообразно трансформировать в новую визуальную форму (рис. 3), не изменяя при этом смыслового наполнения подсистем процесса эксплуатации ПА. Такое представление системы удобно для понимания ее многомерности и вероятностного характера.

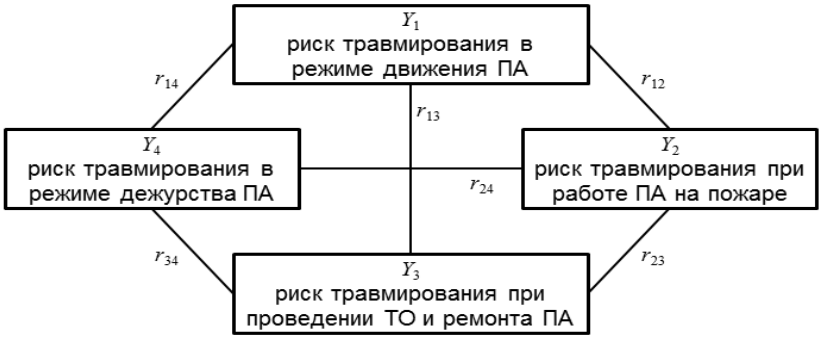


Рис. 3. Риск-ориентированная модель системы «Процесс эксплуатации пожарного автомобиля»

В соответствии с моделью (рис. 3) стохастическая система может быть представлена в виде многомерного непрерывного случайного вектора Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4), имеющего некоторую совместную плотность распределения вероятностей $p_Y = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ [2, 13]. Каждая компонента *Yi* вектора Y представляет собой одномерную случайную величину, характеризующую функционирование соответствующего элемента рассматриваемой системы. При этом элементы Y_i могут быть как взаимозависимыми (коррелированными в общем случае нелинейно), так и не зависеть друг от друга. На рис. 3 r_{12}, r_{13}, … r_{34} – коэффициенты корреляции (взаимозависимости) между элементами системы.

В работе [13] доказано, что если все компоненты Y_i имеют дисперсии $\sigma^2_{Y_i}$, то энтропия H(Y) случайного вектора Y равна

$$H(\mathrm{Y}) = \sum_{i=1}^{m} \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^{m} \kappa_i + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{m} \ln\left(1 - R^2_{Y_k / Y_1 Y_2 \ldots Y_{k-1}}\right), \quad (1)$$

где $\kappa_i = H\left(Y_i / \sigma_{Y_i}\right)$ – энтропийный показатель типа закона распределения случайной величины Y_i;

$R^2_{Y_k / Y_1 Y_2 \ldots Y_{k-1}}$ – индексы детерминации регрессионных зависимостей;

$k = 2, 3, \ldots m$.

Первые два слагаемых $H(\mathrm{Y})_V = \sum_{i=1}^{m} H(Y_i) = \sum_{i=1}^{m} \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^{m} \kappa_i$ представляют собой энтропию случайного вектора с взаимно независимыми компонентами и названы энтропией хаотичности, а третье – $H(\mathrm{Y})_R = \sum_{k=2}^{m} \ln\left(1 - R^2_{Y_k / Y_1 Y_2 \ldots Y_{k-1}}\right)$ – энтропией самоорганизации.

Согласно (1) энтропия H(Y) обладает триализмом. Существуют три причины ее изменения: изменение степени рассеяния ее компонент, изменение форм распределений ее компонент и изменение тесноты корреляционных связей между ее компонентами.

В работе [2] используется векторное представление энтропии (1) в виде

$$H(\mathrm{Y}) = \left(H(\mathrm{Y})_V ; H(\mathrm{Y})_R\right). \quad (2)$$

Формула (2) предполагает рассмотрение энтропии $H(\mathrm{Y})$ не как скаляра, а в векторной форме, т.е. компоненты – энтропия хаотичности и энтропия самоорганизации – должны рассматриваться как самостоятельные величины.

Выражения (1) и (2) были исследованы в работе [2] с позиции их использования в виде диагностической модели сложных стохастических систем. Сделан вывод, что энтропийная модель (1), (2) удовлетворяет всем признакам модели сложной системы и может использоваться для ее описания и эффективного управления.

В своей монографии [13] А.Н. Тырсин отмечает, ссылаясь при этом на публикации многих других исследователей, что повышение эффективности функционирования систем можно рассматривать с позиции увеличения или уменьшения ее энтропии. Поэтому энтропийная модель позволяет решать задачи эффективного управления стохастической системой. Самый очевидный вариант управления представляет собой оказание управляющего воздействия на систему с целью увеличения или уменьшения ее энтропии. Увеличение энтропии всей системы можно достичь за счет роста неопределенности (дисперсий) одного или нескольких ее элементов, или уменьшая степень взаимосвязи элементов (увеличение определителя корреляционной матрицы). Уменьшение энтропии системы, наоборот, достигается уменьшением дисперсий ее элементов, или увеличением степени взаимосвязи элементов.

При управлении открытой системой имеется некоторый ресурс (энергия) для воздействия на систему. Одним из ключевых направлений для эффективного решения подобных задач является концепция «точек роста», которая позволяет выделить особенно чувствительные к увеличению энтропии элементы системы и при, например, ограниченном малом количестве выделенного ресурса использовать его наиболее выигрышно. Суть концепции в том, что управляющее воздействие целенаправленно концентрируют в одной или нескольких конкретных «точках роста». Поскольку система представляет собой множество взаимосвязанных элементов, то воздействие на правильно подобранную точку спровоцирует процессы, приводящие к наибольшему изменению энтропии во всей системе.

Таким образом, разработанный в сфере прикладной математики подход к диагностике сложных систем может рассматриваться как потенциально эффективный инструмент для оценки безопасности эксплуатации ПА и, что особо важно, как инструмент для управления безопасностью. Сложность состоит в том, как наполнить теоретическую оболочку энтропийной модели конкретными данными и перейти от абстрактного описания к реальным ситуациям, представленным на рис. 3.

Первоочередная задача – нахождение аналитических зависимостей для определения величины риска травмирования при различных режимах эксплуатации ПА: в движении, во время дежурства, на пожаре, при проведении ТО и ремонта. К этим зависимостям выдвигаются следующие требования:

– учет параметров ПА, влияющих на безопасность в конкретных условиях;

– максимальная, по возможности, контролепригодность учитываемых параметров ПА.

Выводы

Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие выводы:

1) диагностическая модель процесса эксплуатации пожарного автомобиля имеет преимущества по сравнению с прямым моделированием работы системы;

2) в качестве диагностической модели сложной технической системы перспективной является энтропийная модель;

3) для реализации диагностической модели необходимо провести исследования в области оценки риска травмирования пожарных в процессе эксплуатации пожарного автомобиля.

Список литературы

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. – Москва : Наука, 1978. – 239 с.
2. Геворгян Г. Г. Векторное энтропийное моделирование в задачах мониторинга многомерных стохастических систем : дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2018. – 153 с.
3. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Москва : Издательство стандартов, 1989.
4. Кокорев Г. Д. Повышение эффективности системы технической эксплуатации автомобилей в сельском хозяйстве на основе инженерно-кибернетического подхода : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Рязань, 2014. – 36 с.
5. Кучерявенко С. В., Быстрова А. Н. Диагностический анализ как методология познания сложных систем. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 131 с.
6. Петров А. В. Безопасность как базовая категория процесса эксплуатации пожарных автомобилей // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – Вып. 1 (5). – С. 480–484.
7. Петров А. В., Берко А. В. К вопросу о моделировании безопасности пожарного автомобиля // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – Вып. 3 (7). – С. 394–397.
8. Петров А. В. Перспективы агентного моделирования процесса эксплуатации пожарных автомобилей // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – Вып. 2 (6). – С. 319–322.
9. Петров А. В., Хацько М. С. Подходы к оценке безопасности пожарного автомобиля // Пожарная и аварийная безопасность : сборник материалов XV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России, Иваново, 17–18 ноября 2020 г. – Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 270–274.
10. Петров А. В. Процесс эксплуатации пожарного автомобиля: разработка онтологии // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2021. – Вып. 3 (10). – С. 319–323.
11. Петров А. В. Современные научные подходы к управлению охраной труда пожарных // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации : сборник материалов Дней науки с международным участием, посвященных 90-летию Гражданской обороны России (30 мая – 3 июня 2022 г.) : в 2 ч. – Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2022. – Ч. 1. – С. 179–183.
12. Руководство по организации материально-технического обеспечения Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий : утв. приказом МЧС России № 737 от 01.10.2020 г. – Москва, 2020.
13. Тырсин А. Н. Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем. – Воронеж : Научная книга, 2016. – 156 с.
14. Мойся Д. Л. Определение маневренности и анализ устойчивости движения модели седельного автопоезда с помощью математического моделирования // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 2. – С. 70–77.

15. Мойся Д. Л., Куплинов А. В., Бобров В. В. К повышению устойчивости автопоездов от бокового опрокидывания при прохождении поворота // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2024. – № 2. – С. 33–43.

References

1. Birger, I.A. (1978), *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics], Nauka, Moscow, Russia.

2. Gevorgyan, G.G. (2018), *Vektornoe entropiynoe modelirovanie v zadachakh monitoringa mnogomernykh stokhasticheskikh sistem* [Vector entropy modeling in monitoring problems of multidimensional stochastic systems], Ph.D. Thesis, Ekaterinburg, Russia.

3. GOST 20911-89 (1989), *Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya* [Technical diagnostics. Terms and definitions], Izdatel'stvo standartov, Moscow, Russia.

4. Kokorev, G.D. (2014), *Povyshenie effektivnosti sistemy tekhnicheskoy ekspluatatsii avtomobiley v sel'skom khozyaystve na osnove inzhenerno-kiberneticheskogo podkhoda* [Improving the efficiency of the system of technical operation of vehicles in agriculture based on the engineering-cybernetic approach], Abstract of D.Sc. Thesis, Ryazan, Russia.

5. Kucheryavenko, S.V. and Bystrova, A.N. (2012), *Diagnosticheskiy analiz kak metodologiya poznaniya slozhnykh sistem* [Diagnostic analysis as a methodology for understanding complex systems], TPU Publishing House, Tomsk, Russia.

6. Petrov, A.V. (2020), "Bezopasnost' kak bazovaya kategoriya protsessa ekspluatatsii pozharnykh avtomobiley" [Safety as a basic category of the operation process of fire trucks], *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*, issue 1 (5), pp. 480–484.

7. Petrov, A.V. and Berko, A.V. (2020), "K voprosu o modelirovanii bezopasnosti pozharnogo avtomobilya" [On the issue of modeling the safety of a fire truck], *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*, issue 3 (7), pp. 394–397.

8. Petrov, A.V. (2020), "Perspektivy agentnogo modelirovaniya protsessa ekspluatatsii pozharnykh avtomobiley" [Prospects of agent-based modeling of the fire trucks operation process], *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*, issue 2 (6), pp. 319–322.

9. Petrov, A.V. and Khatsko, M.S. (2020), "Podkhody k otsenke bezopasnosti pozharnogo avtomobilya" [Approaches to assessing the safety of a fire truck], *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost': sbornik materialov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Fire and emergency safety: proceedings of the XV International scientific-practical conference], Ivanovo Fire and Rescue Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ivanovo, Russia, November 17–18, 2020, pp. 270–274.

10. Petrov, A.V. (2021), "Protsess ekspluatatsii pozharnogo avtomobilya: razrabotka ontologii" [The operation process of a fire truck: development of an ontology], *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*, issue 3 (10), pp. 319–323.

11. Petrov, A.V. (2022), "Sovremennye nauchnye podkhody k upravleniyu okhranoy truda pozharnykh" [Modern scientific approaches to occupational safety management of firefighters], *Aktual'nye problemy obespecheniya bezopasnosti v Rossiyskoy Federatsii: sbornik materialov Dney nauki s mezhdunarodnym uchastiem* [Current problems of ensuring security in the Russian Federation: proceedings of the Science Days with international participation], Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russia, May 30 – June 3, 2022, part 1, pp. 179–183.

12. EMERCOM of Russia (2020), *Rukovodstvo po organizatsii material'no-tekhnicheskogo obespecheniya Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy*

oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy [Guidelines for the organization of logistics support of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters], approved by Order No. 737 dated October 1, 2020, Moscow, Russia.

13. Tyrsin, A.N. (2016), *Entropiynoe modelirovanie mnogomernykh stokhasticheskikh sistem* [Entropy modeling of multidimensional stochastic systems], Nauchnaya kniga, Voronezh, Russia.

14. Moysya, D.L. (2024), "Opredelenie manevrennosti i analiz ustoychivosti dvizheniya modeli sedel'nogo avtopoezda s pomoshch'yu matematicheskogo modelirovaniya" [Determination of maneuverability and analysis of motion stability of a tractor-semitrailer model using mathematical modeling], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki*, no. 2, pp. 70–77.

15. Moysya, D.L., Kuplinov, A.V. and Bobrov, V.V. (2024), "K povysheniyu ustoychivosti avtopoezdov ot bokovogo oprokidyvaniya pri prokhozhdenii povorota" [On improving the stability of road trains against lateral rollover when cornering], *Vestnik Donetskoy akademii avtomobil'nogo transporta*, no. 2, pp. 33–43.

Petrov A. V.

ON THE QUESTION OF THE POSSIBILITY OF USING AN ENTROPY DIAGNOSTIC MODEL TO DESCRIBE THE OPERATION OF A FIRE TRUCK

***Abstract**. The article considers the problem of modeling the "fire truck operation process" system. The expediency of using an entropy diagnostic model for the analysis of this multidimensional statistical system is substantiated. It is proposed to use the category "fire truck safety" as the main criterion for evaluating the operation process. A variant of formalization of the tested property of the system – car safety – in the form of the risk of injury to an EMERCOM employee while working on a fire truck is considered. The main directions of work on modeling the operation of a fire truck are outlined.*

***Keywords**: fire truck, operation process, operation safety, risk, entropy, diagnostic model.*

Сведения об авторах:

Петров Александр Викторович
ФГКОУ ВО «Донецкий институт ГПС МЧС России», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация
доцент кафедры аварийно-спасательных работ и техники,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: petroff77@list.ru

Information about the authors:

Petrov Alexander Viktorovich
FGKOU VO «Donetsk Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia», Donetsk, DPR, Russian Federation
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: petroff77@list.ru

УДК 622.673: 14.001.6

Савенко Э.С.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ ДИНАМИКИ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Аннотация. *В статье рассмотрена концепция динамического взаимодействия дискретных инерционных элементов подъемной машины, соединенных между собой упругими торсионными связями. Приведена методика расчета валов подъемных машин для обеспечения надежности и долговечности. Определены основные параметры цикличности нагружения до разрушения валов, суммарный срок службы при циклической нагрузке, необходимые конструктивные параметры вала, обеспечивающие заданную расчетную долговечность, рассмотрена динамика взаимодействия элементов машин. Представлена концепция динамики взаимодействия элементов машин, для которых рассматриваемый вал является элементом трансмиссии или своего рода передаточным звеном, а также динамическое взаимодействие дискретных инерционных элементов подъемной машины, соединенных между собой упругими торсионными связями.*

Ключевые слова: *подъемная машина, трансмиссионная цепь, торсионные элементы, главный вал, редуктор, трансмиссия, надежность, долговечность, разрушение, усталость, отказ*

Постановка задачи

Подъемная машина состоит из одного или двух барабанов, жестко соединенных с валом, называемым главным валом машины, который в двух или в трех точках опирается на опорные подшипники, и посредством муфты соединяется с низкооборотным валом редуктора. Быстроходный вал редуктора также посредством муфты соединяется с валом ротора электродвигателя постоянного или переменного тока. Существуют также безредукторные машины, оснащенные приводом с тихоходными двигателями постоянного тока.

В общем случае, таким образом, трансмиссионная цепь передачи движения от электродвигателя к канатам, с помощью которых происходит подъем и спуск грузов, состоит из дискретных вращающихся тел (ротора двигателя, муфт, шестерен и колес редуктора, одного или двух барабанов) и упругих торсионных элементов, представляющих собой главный вал машины, валы ступеней редуктора и вал ротора двигателя [1, 2].

Редуктор машины, как некое комплексное звено трансмиссии, представляет собой в механическом смысле достаточно сложный агрегат, и в особенности его динамическое состояние. Начнем наш анализ с развития теоретических концепций динамики машин, исходя из представления редуктора как совокупности элементарных звеньев общей трансмиссии.

Анализ последних исследований

Валы, как передаточные звенья трансмиссии, являются массовыми и ответственными деталями современных машин и механизмов. Исследованию их

работоспособности посвящены работы Решетова Д. Н., Серенсена С. В., Маслова Г. С., Парамонова З. А., Коломейцева А. А., Шендеровича Р. М., Громана М. Б. и многих других.

При расчете валов и выборе их рациональных конструкций имеет большое значение методика расчета, которая обеспечит надежность и долговечность машины. Практика показывает, что разрушение валов машин в большинстве случаев носит усталостный характер, поэтому расчет их на усталостную прочность и долговечность является главной задачей создателей машин [3, 4].

Цель статьи

Предложить математическую модель расчета валов подъемных машин для обеспечения надежности и долговечности.

Задачи работы:

- определить основные параметры цикличности нагружения до разрушения валов;
- определить суммарный срок службы вала, выраженный в часах «чистого» машинного времени его работы при данной циклической нагрузке;
- представить методику определения расчетной долговечности валов;
- определить необходимые конструктивные параметры вала, обеспечивающие заданную расчетную долговечность;
- рассмотреть динамику взаимодействия тех элементов машин, для которых рассматриваемый вал является элементом трансмиссии или своего рода передаточным звеном;
- рассмотреть задачу динамического взаимодействия дискретных инерционных элементов подъемной машины, соединенных между собой упругими торсионными связями.

Основная часть

Основным фактором, влияющим на прочность и долговечность валов при переменных нагрузках, является число циклов изменения напряжений или нагружений. Цикл нагружения характеризуется максимальным и минимальным напряжением – $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, амплитудным и средним напряжением – σ_a, σ_m. Одним из важнейших показателей цикла является коэффициент асимметрии $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$. Связь между этими параметрами дается следующими простыми соотношениями [5, 6, 7]:

$$\sigma_a=\frac{\sigma_{\max}-\sigma_{\min}}{2}=\frac{1-R}{2}\sigma_{\max},\quad \sigma_m=\frac{\sigma_{\max}+\sigma_{\min}}{2}=\frac{1+R}{2}\sigma_{\max} \quad (1)$$

В случае $\sigma_{\max}=-\sigma_{\min}$ (симметричный цикл) коэффициент асимметрии $R=-1$. Обычно об усталостных свойствах металлической детали судят по ее наработке в циклах нагружений $N_ц$ при заданном напряжении $\sigma_{\max}=\sigma_a$ симметричного цикла.

Зависимость $\sigma_{\max}$ от $N_ц$ для симметричных циклов известна под названием кривой Вэлера [5, 6], играющие важную роль в решении практических задач о долговечности.

Принято считать, что деталь выдерживает более 10^7 циклов нагружений при некоторой вполне конкретной величине $\sigma_{\max}=\sigma_{-1}$, которая в этом случае называется пределом усталости или выносливости (обозначение σ_{-1} связано с тем, что при симметричном цикле $R=-1$).

Еще одним показателем цикла является его период $T_ц$, связанный с частотой вращения вала ν.

$$T_ц = \frac{2\pi}{\nu} = \frac{60}{n_{об}}, \quad (2)$$

где $n_{об}$ – количество оборотов вала в минуту.

При действии на вращающийся вал неизменно ориентированной в пространстве постоянной поперечной нагрузки, создающей постоянный по величине максимальный изгибающий момент $M_{из} = const$ в определенном сечении, текущее напряжение цикла в момент времени t определяется выражением

$$\sigma(t) = \frac{M_{из} d}{2J} \sin \nu t, \quad (3)$$

где d – диаметр вала.

$$J = Wd/2,$$

где J - момент инерции; W – момент сопротивления.

Как видно из (3), в данном случае цикл нагружения представляет собой классический пример симметричного цикла, при котором

$$\sigma_{\max} = \sigma_a = \sigma_{-1} = \frac{M_{из} d}{2J} .. \quad (4)$$

Определив таким способом σ_{-1} по формуле (4), при помощи известной диаграммы Вэлера находится общее число циклов нагружений $N_ц(\sigma_{-1})$ (наработка на отказ), которое в состоянии выдержать данный вал до разрушения, в результате чего можно определить суммарный срок службы вала, выраженный в часах «чистого» машинного времени его работы при данной циклической нагрузке:

$$T_{сл} = \frac{N_ц(\sigma_{-1}) T_ц}{3600} = \frac{N_ц(\sigma_{-1}) T_ц}{60 n_{об}}. \quad (5)$$

При заданной долговечности вала $T_{сл}$, следовательно, при известной величине $N_ц$ в (5), решается обратная задача – с помощью диаграммы Вэлера находится σ_{-1}, и затем, используя (4), нетрудно определить необходимые конструктивные параметры вала, обеспечивающие заданную расчетную долговечность.

Так упрощенно и в общих чертах выглядит методология расчета вала на долговечность. Однако вал помимо изгибающих нагрузок испытывает, естественно, и действие крутящего момента $M_{кр}$ (для чего он, собственно, и предназначен), в связи с чем картина напряженного состояния усложняется, и приведенная схема расчета будет выглядеть несколько иначе.

В инженерной расчетной практике утвердился метод расчета вала, исходя из условия прочности на кручение при действии статического крутящего момента $M_{кр}$ с учетом по одной из гипотез прочности (обычно третьей), совместного действия изгиба и кручения. В рамках такого подхода факторы переменности и цикличности действующих напряжений в конечном итоге «ложатся» на принимаемые запасы прочности по отношению к пределу текучести стали, которые в этом случае, разумеется, оказываются слишком завышенными.

Внешняя нагрузка определяется по коэффициентам запаса прочности, определяющим допустимые пределы текучести при изгибе $[\sigma_T]$ и при кручении $[\tau_T]$

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{k_\sigma \sigma_a /(\beta\varepsilon_\sigma) + \psi_\sigma \sigma_m}, \quad n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{k_\tau \tau_a /(\beta\varepsilon_\tau) + \psi_\tau \tau_m}, \qquad (6)$$

где $k_\sigma, k_\tau -$ коэффициенты концентрации напряжений при изгибе и кручении, зависящие от формы деталей и шероховатости поверхности; $\beta -$ коэффициент поверхностного упрочнения; $\varepsilon_\sigma, \varepsilon_\tau -$ коэффициенты масштабных факторов, учитывающие влияние размеров сечения вала.

Как видно, к настоящему времени проблема расчета валов на усталостную прочность в концептуальном плане достаточно полно решена, и вытекающие из теоретических построений расчетно-методические рекомендации являются вполне приемлемыми для инженерной практики. Однако все эти построения основываются на идеальной картине циклического нагружения, что, разумеется, далеко не соответствует действительности, но самое главное – остается открытым вопрос о фактических амплитудных и частотных свойствах реальных нагрузок в реальной машине. Решение этой проблемы требует рассмотрения динамики взаимодействия тех элементов машин, для которых рассматриваемый вал является элементом трансмиссии или своего рода передаточным звеном.

При определении частоты собственных изгибно-крутильных колебаний вал рассматривается как многопролетная балка, нагруженная по заданной схеме. В первом приближении частота собственных изгибных колебаний длинного вала вычисляется по формуле

$$\omega = \sqrt{c/m} = \sqrt{g/f} \qquad (7)$$

где c – жесткость наиболее длинного пролета, m – масса этого же пролета, сосредоточенная в центре тяжести, f – наибольшая стрела прогиба от собственного веса балки в наиболее длинном ее пролете (прогиб под центром тяжести), g – ускорение свободного падения. В этом случае критическая частота вращения вала есть $\omega_{кр} = \sqrt{g/f}$.

В настоящее время в расчетной практике широко применяются как точные, так и приближенные способы определения собственных частот, основанные на применении методов Рэлея, Ритца, Бубнова, Галеркина [8, 9, 10]. Сущность одного из простейших методов, разработанного Рэлеем, состоит в том, что если заранее принять форму упругой линии балки $y(x)$ как статическую функцию прогибов, то искомую низшую частоту можно определить

$$\omega^2 \int_0^l m(x) y^2(x) dx = \int_0^l \frac{M_{из}^2(x)}{EJ(x)} dx,$$

где $m(x) -$ известная функция распределения массы по длине вала, $M_{из}^2(x) -$ изгибающий момент от массовой нагрузки, $l -$ длина балки.

При современном арсенале вычислительных и программных средств определение спектра собственных частот изгибно-крутильных колебаний сколь угодно сложного по конфигурации вала и системы взаимосвязанных валов не вызывает трудностей.

При постановке задач динамического взаимодействия дискретных инерционных элементов подъемной машины, соединенных между собой упругими торсионными связями, канат рассматривался как безынерционная упругая связь, и его масса приводилась к массам сосуда и барабану машины. Массы вращающихся барабанов, элементов редуктора и ротора двигателя принимались дискретными, а упругие связи между ними считались линейными и безынерционными. Соответствующие

обыкновенные дифференциальные уравнения движения записывались относительно моментов упругой динамической закрутки торсионных элементов.

Выводы

1) получены зависимости циклов изменения напряжений или нагружений до разрушения валов;

2) разработана модель суммарного срока службы вала, выраженная в часах «чистого» машинного времени его работы при данной циклической нагрузке;

3) предложен алгоритм определения необходимых конструктивных параметров вала, обеспечивающий заданную расчетную долговечность.

Список литературы

1. Савельев И. В. Курс общей физики : в 3 т. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – Т. 1. – 436 с.

2. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний : учебник для вузов. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 440 с.

3. Венатовская Л. А. Исследование колебаний упругих тел методами компьютерной алгебры : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 32 с.

4. Гулиа Н. В., Клоков В. Г., Юрков С. А. Детали машин : учебник для вузов / под общ. ред. Н. В. Гулиа. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 416 с.

5. Константинов В. Ф. Детали машин и основы конструирования. Проектирование механического привода : учебное пособие для СПО. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 124 с.

6. Киселев Б. Р. Детали машин. Привод : учебник для СПО. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 296 с.

7. Детали механизмов и машин : учебник для вузов / Э. Я. Живаго, Л. Н. Гудимова, И. С. Баклушина, Н. Н. Горелов ; под ред. Э. Я. Живаго. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 292 с.

8. Молотников В. Я., Молотникова А. А. Прикладная механика : учебник для вузов. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 408 с.

9. Ким Де Чан, Махро И. Г., Левит Д. И. Физика. Механика. Курс лекций с примерами решения задач : учебное пособие для вузов. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 408 с.

10. Тюняев А. В. Основы конструирования деталей машин. Валы и оси : учебно-методическое пособие. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 316 с.

References

1. Savel'ev, I.V. (2018), *Kurs obshchey fiziki: v 3 t.* [Course of general physics: in 3 vols.], vol. 1, Lan', Saint Petersburg, Russia.

2. Strelkov, S.P. (2024), *Vvedenie v teoriyu kolebaniy* [Introduction to the theory of oscillations], 5th ed., Lan', Saint Petersburg, Russia.

3. Venatovskaya, L.A. (2018), *Issledovanie kolebaniy uprugikh tel metodami komp'yuternoy algebry* [Study of vibrations of elastic bodies by computer algebra methods], Lan', Saint Petersburg, Russia.

4. Gulia, N.V., Klokov, V.G. and Yurkov, S.A. (2025), *Detali mashin* [Machine parts], 4th ed., Lan', Saint Petersburg, Russia.

5. Konstantinov, V.F. (2025), *Detali mashin i osnovy konstruirovaniya. Proektirovanie mekhanicheskogo privoda* [Machine parts and fundamentals of design. Design of mechanical drive], 2nd ed., Lan', Saint Petersburg, Russia.

6. Kiselev, B.R. (2025), *Detali mashin. Privod* [Machine parts. Drive], 3rd ed., Lan', Saint Petersburg, Russia.
7. Zhivago, E.Ya., Gudimova, L.N., Baklushina, I.S. and Gorelov, N.N. (2024), *Detali mekhanizmov i mashin* [Details of mechanisms and machines], Lan', Saint Petersburg, Russia.
8. Molotnikov, V.Ya. and Molotnikova, A.A. (2024), *Prikladnaya mekhanika* [Applied mechanics], Lan', Saint Petersburg, Russia.
9. Kim De Chan, Makhro, I.G. and Levit, D.I. (2022), *Fizika. Mekhanika. Kurs lektsiy s primerami resheniya zadach* [Physics. Mechanics. Lecture course with examples of problem solving], 3rd ed., Lan', Saint Petersburg, Russia.
10. Tyunyaev, A.V. (2023), *Osnovy konstruirovaniya detaley mashin. Valy i osi* [Fundamentals of designing machine parts. Shafts and axles], 4th ed., Lan', Saint Petersburg, Russia.

Savenko E.S.

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF THEORETICAL CONCEPTS OF DYNAMICS OF LIFTING MACHINES

Abstract. *The article discusses the concept of dynamic interaction of discrete inertial elements of a lifting machine connected to each other by elastic torsion joints. The method of calculation of shafts of hoisting machines to ensure reliability and durability is given. Basic parameters of cyclic loading to destruction of shafts, total service life at cyclic load, required structural parameters of shaft providing specified design life are determined, dynamics of interaction of machine elements is considered. The concept of interaction dynamics of machine elements is presented, for which the shaft in question is a transmission element or a kind of transmission link, as well as dynamic interaction of discrete inertial elements of the lifting machine, connected to each other by elastic torsion joints.*

Keywords: *lifting machine, transmission chain, torsion elements, main shaft, gearbox, transmission, reliability, durability, destruction, fatigue, failure*

Сведения об авторах:

Савенко Эдуард Станиславович
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиал федерального бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, РФ, доцент,
к.т.н., доцент,
e-mail: e.s.savenko@donnasa.ru

Information about the authors:

Savenko Eduard Stanislavovich
"Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture" — branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Makeevka, Russian Federation, associate professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: e.s.savenko@donnasa.ru

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТРАНЫ, ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.11

Донченко В.В., Андреев С.А., Калинина В.В.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. *В статье излагаются вопросы оценки качества функционирования городских транспортных систем. Обосновывается важность рассмотрения транспортного спроса населения как ключевого фактора, определяющего функционирование городского транспорта. Представлены результаты анализа различных исследований, рассматривавших применение показателей «уровня обслуживания», как индикатора эффективности работы транспортной системы и ее элементов. Показано, что в случае использования «уровней обслуживания» для оценки загруженности участков улично-дорожных сетей приоритет получают решения, направленные на увеличение пропускной способности УДС, что приводит к дальнейшему «автомобилеориентированному» развитию городских транспортных систем и к генерации дополнительного (сгенерированного) транспортного спроса. Рассмотрено использование показателей «уровня обслуживания» для оценки работы пассажирского транспорта общего пользования (ПТОП) по различным компонентам качества предоставляемых услуг и приведена методика расчета интегрального показателя уровня обслуживания ПТОП, которая может быть использована при разработке стандартов транспортного обслуживания населения. Для оценки эффективности и качества работы городских транспортных систем предложено использовать более корректные показатели, основанные на удельном суммарном пробеге транспортных средств и удельном пассажирообороте городского транспорта. Предложен ряд формул для оценки подобных показателей. Обоснованы преимущества и сферы их использования.*

Ключевые слова: *уровень обслуживания, транспортный спрос, мобильность, генерация поездок, суммарный пробег транспортных средств, эффективность работы транспортной системы, пассажирский транспорт общего пользования.*

Постановка задачи

Необходимость оценки качества функционирования городских транспортных систем возникает в целом ряде случаев:

– при определении уровня загруженности улично-дорожной сети и планировании ее развития;

−при оценке качества функционирования системы ПТОП и выявлении проблем в ее состоянии и развитии, разработке и оценке эффективности мероприятий по ее совершенствованию;

−при планировании инвестиций в транспортную систему;

−при разработке и оценке эффективности транспортных проектов, планов и программ;

−при разработке и оценке эффективности различных мер и решений в области транспортной политики, мероприятий по организации дорожного движения;

−при оценке проектов в области землепользования и развития городских территорий;

−при проведении оценок воздействия транспортных и градостроительных проектов на состояние окружающей среды и здоровье населения.

Результаты оценки качества функционирования городских транспортных систем могут также использоваться в интегральной оценке результатов деятельности руководителей регионов РФ и муниципальных образований. Используемые в настоящее время в системах управления транспортом валовые показатели (объемы перевозок пассажиров и грузов, пассажиро- и грузооборот, экономические показатели и др.) в общем случае (без рассмотрения конкретного контекста) не решают задачи выявления и прогнозирования транспортных проблем, оценки качества работы транспортных систем и эффективности конкретных проектов. В этой ситуации актуальность приобретает разработка новых подходов к оценке и прогнозированию результатов конкретных транспортных проектов и решений.

Анализ последних исследований

Исследованиям вопросов количественной оценки качества функционирования городских транспортных систем в последние годы в российской практике уделялось достаточно ограниченное внимание. В этом плане можно отметить работы В.В.Сильянова, А.Н.Новикова, С.В.Еремина, Шевцовой А.Г. [8], А.Ю. Михайлова, Р.Н. и З.В. Горбуновых [34] и ряда других. В то же время за рубежом вопросам количественного анализа и оценки качества функционирования транспортных систем в предыдущие и последние годы было посвящено значительное количество исследований. В частности, можно выделить работы в этой области Т.Литмана [1], Р.Серверо [15], Ф.Гудвина [20], М.Хансена [18], Дж.Миллера [16], А.Мэя [37] и др. Однако большинство перечисленных исследований не рассматривало оценку и прогнозирование качества функционирования городских транспортных систем в контексте совместного и взаимоувязанного развития улично-дорожной инфраструктуры и систем пассажирского транспорта общего пользования.

Цель работы

Целью данной работы является разработка предложений по совершенствованию методологии оценки и прогнозирования качества функционирования городских транспортных систем.

Основная часть

1. Транспортный спрос как основа формирования и функционирования транспортных систем.

Говоря о городском транспорте, об оценке его функционирования, о городских транспортных проблемах и направлениях их решения мы, как правило, рассматриваем т.н. «транспортное предложение» - физическую транспортную систему и характеристики ее функционирования, параметры предоставляемых транспортных услуг

(состояние и характеристики инфраструктуры, подвижного состава, условия движения транспортных средств, наличие заторов, объемы и качество транспортных услуг и т.д.). Но за характеристиками работы городского транспорта стоит транспортный спрос (населения, экономики). Транспорт нужен тогда, когда он удовлетворяет существующий или прогнозируемый транспортный спрос. С другой стороны, рост транспортного предложения может вести к стимулированию возникновения нового транспортного спроса (например, строительство новых жилых кварталов вблизи новой ветки метро). Рыночный подход к рассмотрению работы транспортной системы предполагает представление пользователям в качестве «товара» транспортных услуг - пропускной способности УДС и услуг ПТОП со всеми их качественными характеристиками. Удовлетворение транспортного спроса формирует мобильность – количество совершенных поездок, пройденных автомобиле-километров или выполненных пассажиро-километров (рис. 1).

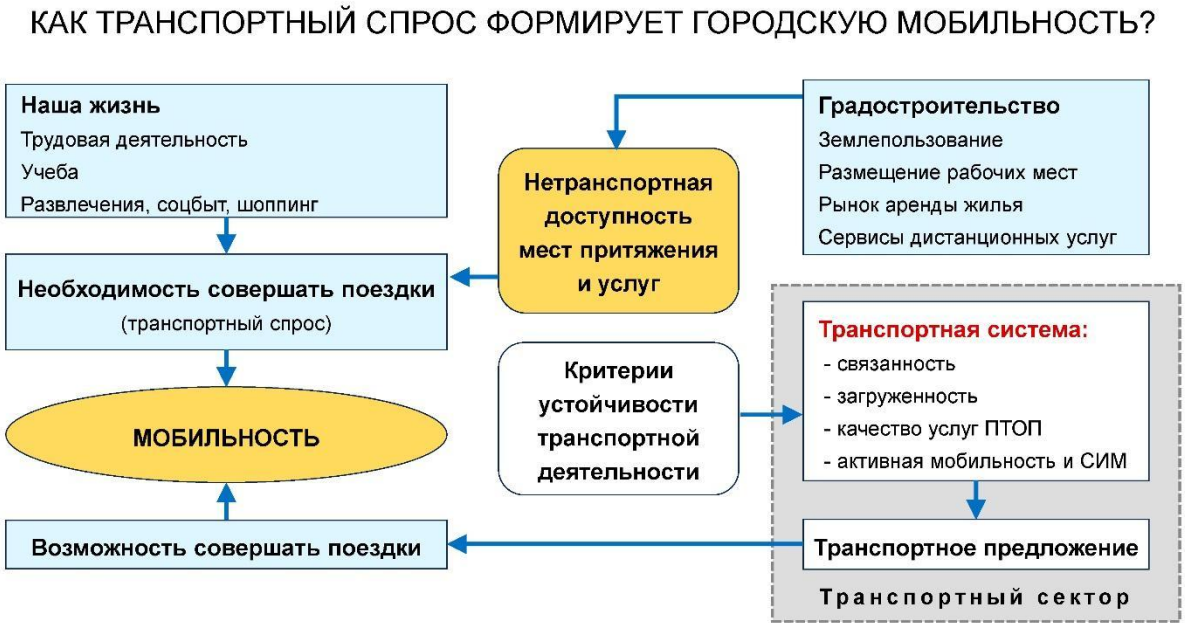


Рис. 1. Как транспортный спрос формирует городскую мобильность

Базовый уровень транспортного спроса населения формируется за счет следующих ключевых факторов:

- демографические характеристики населения, уровень его благосостояния и доходов;
- общая площадь города и его пространственная конфигурация;
- политика в области градостроительства и землепользования;
- размещение рабочих мест и характер жилой застройки (плотность, смешанный характер и др.);
- развитие и размещение социально-бытовой и торговой инфраструктуры;
- связанность городской территории.

Транспортный спрос во многом определяется транспортным поведением пользователей. В частности, относительно специфики транспортного поведения пользователей следует отметить, что:

- когда дороги перегружены, потребители выбирают более близкие места притяжения, а когда движение более свободное - более удаленные места;

- люди, совершающие поездки, меняют вид транспорта, чтобы избежать заторов;
- длительные поездки считаются экономически выгодными для совершающих их лиц при небольших заторах, но не при больших;
- люди, как правило, тратят на поездки в среднем около 75 минут в день (т.н. «бюджет времени поездок»), независимо от условий перевозки (Левинсон и Кумар, 1995; Лоутон, 2001) [2,3]. Рост задержек в заторах приводит к изменениям маршрутов, выбираемых видов транспорта и мест притяжения. Исследования показывают, что увеличение скорости передвижения часто приводит к большей мобильности, а не к экономии времени.

Транспортный спрос населения в городах в общем случае распределяется и обеспечивается по нескольким каналам транспортного предложения - использование личного автотранспорта, услуги пассажирского транспорта общего пользования (различные виды наземного ПТОП, включая ГЭТ, метро и городскую железную дорогу), использование средств активной мобильности, микромобильности, совместной мобильности [4].

Выбор пользователями для поездки того или иного вида транспорта/передвижения определяется уровнем связанных с ним совокупных издержек (затрат) – суммарным монетизированным выражением затрат на поездку времени и средств, а также стоимостной оценкой «сопротивления поездке» (показателей качества/привлекательности предоставляемых транспортных услуг). Любые улучшения в транспортной системе (улучшение условий дорожного движения, развитие маршрутной сети и повышение качества услуг ПТОП, изменение тарифов и т.д.) влияют на выбор пользователями вида транспорта/передвижения, т.е. на распределение транспортного спроса. Кроме этого, целенаправленное «переключение» транспортного спроса населения может осуществляться различными мерами и механизмами управления мобильностью – парковочной политикой, ценовой и тарифной политиками на транспорте, физическими ограничениями движения (сокращение числа полос движения и их сужение и т.д.) и др. (рис. 2). Изменения в транспортной системе, даже при сохранении неизменности факторов, определяющих базовый уровень транспортного спроса, генерируют изменения в распределении этого спроса.

В автомобилеориентированном обществе транспортный спрос во многих случаях реализуется через поездки с использованием **личных автомобилей**. При высоком транспортном спросе населения и ограниченной пропускной способности улично-дорожной сети (например, в часы пик) возникают транспортные заторы, характеризующиеся целым спектром негативных последствий – транспортными задержками, выбросами вредных веществ и климатических газов, дорожно-транспортными происшествиями [4].

«*Затор — это особое состояние, возникающее, когда потоки автомобилей на уличной сети блокируют перекрестки, останавливая движение транспорта. Заторов можно избежать при правильном проектировании перекрестков и соблюдении правил дорожного движения. Увеличение пропускной способности региональных автомагистралей, как правило, увеличивает риск заторов, увеличивая интенсивность движения на наземных улицах, где возникают заторы» (Т. Литман) [1]. Надо понимать, что во многих случаях затор является не индикатором недостатка пропускной способности УДС, а индикатором плохой организации городской среды в целом (в частности, неоптимальной организации городского землепользования, недостатков городской застройки, недостатков в функционировании ПТОП и т.д.).*

Администрации городов оценивают и прогнозируют транспортную ситуацию, выявляют «узкие места» на УДС, т.е. те места, где наиболее часто возникают заторы, и принимают решения об инвестициях в транспортную инфраструктуру с целью

увеличения ее пропускной способности. Такой подход, широко распространенный в России, в международной практике получил название «предвидеть и устранить» («predict&provide»).

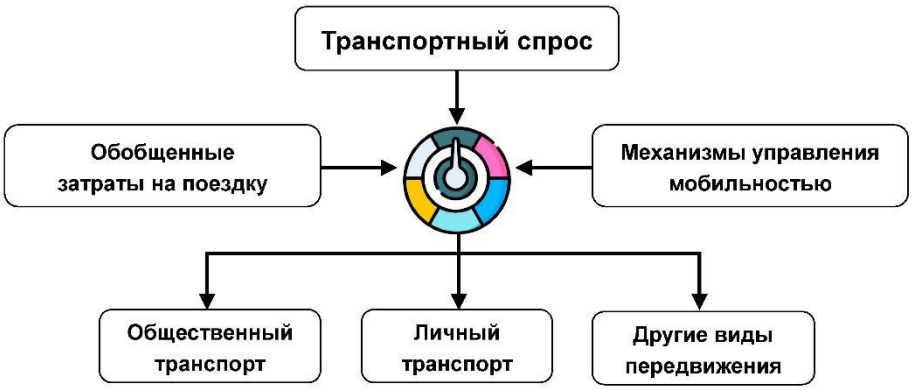


Рис. 2. Распределение транспортного спроса по каналам транспортного предложения.

2. Использование «уровня обслуживания» как индикатора эффективности работы транспортной системы и ее элементов.

Согласно существующей практике, решения об инвестициях в совершенствование и развитие городских транспортных систем принимаются на основе использования количественных индикаторов условий движения или перевозок. В части *дорожного движения* подробный обзор индикаторов заторов приведен в [5]. Наибольшее распространение на практике еще с середины 60-х годов прошлого века получил показатель «уровень обслуживания» (Level of Service (LOS)) - качественная мера, которая описывает и оценивает условия движения транспорта (условия перевозки) и их восприятие водителями и пассажирами. В более общем смысле цель использования LOS состоит в том, чтобы обеспечить, чтобы все люди, совершающие поездки, могли достигать своих целей вовремя и с минимальным уровнем дискомфорта и неудобств [33, 34, 35].

Впервые LOS был представлен в 1965 году в "Руководстве по пропускной способности автомобильных дорог" (Highway Capacity Manual - HCM), опубликованном Советом по транспортным исследованиям США. Самая последняя версия HCM была опубликована в январе 2022 года [6]. Уровень обслуживания определяет, насколько эффективно движение транспортных средств по улице или дороге и до настоящего времени этот показатель являлся одним из наиболее важных в сфере планирования дорожного движения, имеющим решающее значение как для транспортного планирования, так и для организации землепользования. Именно этот показатель часто используется администрациями в качестве количественного индикатора необходимости модернизации улично-дорожной инфраструктуры – реконструкции/уширения существующих и строительства новых улиц/дорог. Обычно LOS оценивается через такие факторы, как скорость и время в пути, уровень транспортных задержек, свобода манёвра, прерывания движения, комфорт, удобство и безопасность. Использование LOS требует проведения расчетов, основанных на количественных показателях, таких как скорость, объем (интенсивность) и плотность движения, уровень транспортных задержек.

LOS используется для определения того, где, когда и как осуществлять инвестиции в транспортную инфраструктуру, для оценки необходимости и последствий разработки транспортных проектов. Было разработано несколько методик расчета LOS для оценки

эффективности работы таких различных элементов транспортных систем, как перекрестки, пешеходная инфраструктура, услуги ПТОП и въезды на автострады. Инженеры—транспортники основываются на LOS при определении размера и масштабности проектов развития инфраструктуры, то есть того, какие изменения следует внедрить и где. В российской и зарубежной практике эксплуатации и строительства дорог LOS часто рассчитывается как отношение приведенной наблюдаемой интенсивности движения транспортного потока к проектной пропускной способности дороги. В российской практике соответствующий показатель получил название «коэффициент загрузки дороги движением» [7,8]. Число качественных уровней LOS, рассматриваемых в разных источниках, различно. Они обычно обозначаются буквенной аббревиатурой. Например, в [9] по мере роста интенсивности движения выделяется следующие 6 уровней обслуживания для дорог:

A) свободный поток при малых интенсивностях и высоких скоростях движения;

B) достаточно свободный поток, но скорость начинает ограничиваться дорожными условиями, появляются обгоны;

C) стабильный поток, но большинство водителей ограничены в свободе выбора скорости движения, много обгонов;

D) приближение к нестабильному состоянию потока; водители не имеют возможности самостоятельно выбирать скорость движения;

E) нестабильный поток; возможны кратковременные остановки транспортных средств;

F) вынужденный или распадающийся поток; недопустимые заторы; остановка и движение автомобилей в режиме "стоп-трогание".

Примерно такая же классификация использовалась и в России (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика уровней обслуживания движения

Уровень обслуживания движения	Коэффициент загрузки z	Коэффициент скорости движения c	Коэффициент насыщения движением ρ	Характеристика потока автомобилей	Состояние потока	Эмоциональная загрузка водителя	Удобство работы водителя	Экономическая эффективность работы дороги
A	<0,20	>0,90	<0,10	Автомобили движутся в свободных условиях, взаимодействие между автомобилями отсутствует	Свободное движение одиночных автомобилей с большой скоростью	Низкая	Удобно	Неэффек-тивная
B	0,20-0,45	0,70-0,90	0,10-0,30	Автомобили движутся группами, совершается много обгонов	Движение автомобилей малыми группами (2-5 шт.). Обгоны возможны	Нормальная	Мало удобно	Мало эффек-тивная
C	0,45-0,70	0,55-0,70	0,30-0,07	В потоке еще существуют большие интервалы между автомобилями, обгоны запрещены	Движение автомобилей большими группами (5-14 шт.). Обгоны затруднены	Высокая	Неудобно	Эффек-тивная
D	0,70-0,90	0,40-0,55	0,70-1,00	Сплошной поток автомобилей, движущихся с малыми скоростями	Колонное движение автомобилей с малой скоростью. Обгоны невозможны	Очень высокая	Очень неудобно	Неэффек-тивная
E	0,90-1,00	<0,40	1,00	Поток движется с остановками, возникают заторы, режим пропускной способности	Плотное	Очень высокая	Очень неудобно	Неэффек-тивная
F	>1,00	0,30	1,00	Полная остановка движения, заторы	Сверх плотное	Крайне высокая	Крайне неудобно	Неэффек-тивная

Примечание – К участкам автомобильной дороги, обслуживающей движение в режиме перегрузки, относятся участки автомобильной дороги с уровнем обслуживания D, E или F.

Источник: [37]

В тех случаях, когда проезжая часть дорог работает неэффективно (высокий уровень загрузки, LOS D, E, F), проблема заторов во многих случаях решается за счет

увеличения пропускной способности улично-дорожной сети (расширение проезжей части, строительство дублирующих дорог, закрытие трамвайных маршрутов и т.д.). В связи с этим использование LOS в практике территориального и транспортного планирования во многих странах мира до последнего времени являлось (и продолжает являться!) ключевым фактором, способствующим автомобилеориентированному развитию городов. Это приводит к увеличению количества городских дорог и их пропускной способности, разрастанию и масштабной застройке городских территорий, в первую очередь в их периферийной части. Помимо этого, стремление повысить LOS способствует созданию опасных, высокоскоростных улиц, что, в свою очередь, увеличивает риск ДТП и тяжесть их последствий.

3. Применение уровней обслуживания (LOS) в землепользовании. Уровень обслуживания (LOS) за рубежом часто используется и в качестве критически важного показателя при определении прав собственности или юридических соглашений между органами власти и землевладельцами, разрешающими планируемую застройку территорий. В США некоторые правила землепользования строго запрещают застройку в тех случаях, когда это может повлиять на увеличение LOS для близлежащих улиц и перекрестков. Кроме того, с помощью LOS за рубежом часто измеряется воздействие на окружающую среду и одобрение новой застройки часто зависит от низкого или приемлемого воздействия на LOS для близлежащих улиц и перекрестков.

Таким образом, LOS также используется для оценки возможности реализации проектов по развитию землепользования (например, жилого, коммерческого и промышленного строительства) вдоль улиц и дорог. В зарубежной практике в случаях, когда новая жилая или коммерческая застройка приводит к увеличению загруженности близлежащих дорог и перекрестков, предложения по застройке территорий во многих случаях отвергаются или застройщикам предлагается затратить средства на смягчение возникающих негативных последствий путем увеличения пропускной способности улично-дорожной сети.

Многочисленные исследования показали, что плотная и смешанная (многофункциональная) городская застройка необходима для увеличения нетранспортной доступности мест притяжения и, таким образом, способствует сокращению числа поездок на автомобиле и количества пройденных автомобиле-километров [10, 36]. Однако зависимость транспортного планирования от оценки загруженности дорожной инфраструктуры (использования показателя LOS) во многих случаях приводит к тому, что инвестиции и модели развития отдают приоритет перевозкам с использованием личного автотранспорта, а не другим решениям (использование пассажирского транспорта общего пользования, управление мобильностью, развитие активной мобильности, обеспечение нетранспортной доступности объектов и т.д.). В итоге население оказывается в замкнутом круге «автомобильной зависимости».

4. Генерация поездок как последствие реализации транспортных проектов, основанных на LOS. Как правило, на практике при оценке LOS ошибочно полагают, что транспортный спрос является статичной величиной, отрицая влияние на него изменений в условиях движения. В то же время, в ряде литературных источников отмечается, что городской транспортный спрос похож на газ, который расширяется, заполняя доступное пространство (T. Litman, 2012 и P. Jacobsen, 1997) [1, 11]. Перегруженность дорог и плохая организация работы общественного транспорта заставляют людей откладывать поездки, которые не являются срочными, выбирать альтернативные пункты назначения и виды транспорта, а также отказываться от поездок, которых можно избежать. Любые улучшения в транспортной системе (на дорогах, на ПТОП), которые снижают транспортные издержки пользователей, привлекают поездки с других маршрутов, с

другого времени суток и других видов транспорта, а также способствуют более длительным и частым поездкам, поездкам в новые места назначения и, что очень важно, возникновению новых поездок, которые не осуществлялись в прошлых условиях. Это все в совокупности называется сгенерированными поездками (в случае дорожного движения – сгенерированным трафиком), которые представляют дополнительные поездки по конкретным маршрутам, на которых произошли изменения.

Т.Литман дает следующее определение сгенерированного трафика [1]:

«Сгенерированный трафик: дополнительные поездки транспортных средств в пиковые периоды по определенной дороге, которые происходят при увеличении ее пропускной способности. Он может включать поездки, связанные с изменениями во времени их осуществления, маршруте движения, виде используемого транспорта, выбираемом пункте назначения и частоте поездок».

Сгенерированные поездки на конкретном маршруте/дороге можно разделить на:

- «переключённые» поездки. Поездки в те же места притяжения с теми же целями, которые так или иначе ранее уже выполнялись в другое время, по другим маршрутам, другими видами транспорта, но вследствие изменившихся условий дополнительно переключились на рассматриваемый маршрут/дорогу. Во многом это регулярные поездки и поездки по важным и неотложным делам (трудовые поездки, поездки на учебу, на срочные мероприятия и др.);

- «индуцированные» поездки. Новые поездки, которые, как правило, ранее не планировались пользователями транспорта, но стали возможными и привлекательными вследствие изменений совокупных затрат (изменений условий движения/поездки на конкретном маршруте). Такие поездки связаны с т.н. латентным (скрытым) спросом. К индуцированным поездкам относят также поездки с теми же целями, но к другим местам назначения - в новые точки притяжения, в том числе, находящиеся на большем расстоянии, которые стали возможными (доступными) в новых условиях из-за изменений в транспортной системе. Обычно такие поездки не являются регулярными и/или неотложными (поездки с рекреационными, социально-бытовыми и семейными целями). За счет индуцированных поездок увеличивается общее количество выполненных пассажиро-километров и автомобиле-километров (Vehicle Miles Traveled, VMT) по сравнению с теми, которые были бы совершены в противном случае (Hills, 1996; Litman, 2012) [1, 12].

В краткосрочной перспективе большая часть сгенерированного трафика состоит из поездок, переключаемых с других маршрутов, времени поездок и видов транспорта, что в литературе называется *тройной конвергенцией (интеграцией)* (Downs, 1992) [13]. В долгосрочной перспективе все большая часть сгенерированных новых поездок приходится на индуцированные поездки. В некоторых ситуациях увеличение пропускной способности проезжей части дороги может снизить общую эффективность улично-дорожной сети, что называется Парадоксом Браеса (Braess's Paradox) (Youn, Jeong and Gastner, 2008)[1] [14].

Типы сгенерированного трафика представлены в таблице 2, на основе анализа, выполненного Т. Литманом [1].

[1] Парадокс Браеса — парадокс, приписываемый немецкому математику Дитриху Браесу (1968). Он гласит, что добавление дополнительных мощностей в сеть при условии, что двигающиеся по сети сущности сами выбирают свой маршрут, может снизить общую производительность сети. Парадокс Браеса важен в городском планировании, управлении дорожным движением и дизайне сетей. Он показывает, что интуитивные решения, такие как добавление большего количества дорог для уменьшения пробок, иногда могут усугубить проблему. Принципы Парадокса Браеса могут применяться к различным типам сетей, где ресурсы являются общими, а индивидуальные пользователи принимают решения, влияющие на коллективные результаты. Примеры включают маршрутизацию интернет-трафика, управление электрической сетью и даже организационные структуры, где добавление ресурсов или путей может привести к неэффективности из-за сложных взаимодействий между отдельными компонентами системы.

Таблица 2

Типы сгенерированного трафика

Тип сгенерированного трафика	Категория поездок	Врем. рамки	Последствия для числа поездок	Влияние на совокупные затраты
Более короткий маршрут. «Улучшенная дорожная инфраструктура» позволяет водителям использовать более прямой маршрут	Переключенные поездки	Кратко-срочные	Небольшое снижение	Снижение
Более длинный маршрут «Улучшенная дорожная инфраструктура» привлекает трафик с более прямых, но более перегруженных маршрутов	Переключенные поездки	Кратко-срочные	Небольшое увеличение	Незначительное увеличение
Изменение времени поездки Снижение загруженности в пиковые периоды уменьшает необходимость переносить поездки на внепиковые периоды.	Переключенные поездки	Кратко-срочные	Нет	Незначительное увеличение
Изменение вида используемого транспорта; Существующие варианты поездок Улучшенный транспортный поток делает вождение автомобиля относительно более привлекательным по сравнению с использованием других видов транспорта	Индуцированные поездки на автомобилях	Кратко-срочные	Увеличение автомобильного движения	От среднего до большого увеличения
Изменение вида используемого транспорта; Изменения в выборе мест для поездок Снижение спроса приводит к сокращению железнодорожных и автобусных перевозок, ухудшению условий для пеших и велосипедных передвижений и увеличению числа владельцев автомобилей и поездок с их использованием.	Индуцированные поездки на автомобилях	Долго-срочные	Увеличение автомобильного движения, снижение использования других видов транспорта/ передвижения	Значительное увеличение, снижение социальной справедливости
Изменение пункта назначения; Существующее землепользование Снижение транспортных затрат позволяет водителям выбирать более отдаленные пункты назначения. Модели землепользования не меняются.	Более длинные поездки	Кратко-срочные	Увеличение	От среднего до большого увеличения
Изменение пункта назначения; Изменения в землепользовании Улучшение доступности позволяет вносить изменения в землепользование, особенно связанных с застройкой городских окраин.	Более длинные поездки	Долго-срочные	Больше использования автомобилей и автомобиле-зависимости	От умеренного до значительного увеличения; затраты, связанные с обеспечением «социальной справедливостью»
Новые поездки; Никаких изменений в землепользовании Сокращение времени в пути позволяет заменить вождение автомобиля другими видами деятельности, не связанными с поездками, или совершать новые и/или более длительные поездки.	Индуцированные поездки	Кратко-срочные	Увеличение	Значительное увеличение
Зависимость от автомобилей Синергетический эффект от расширения автомобиле-ориентированного развития землепользования и транспортной системы.	Индуцированные поездки	Долго-срочные	Увеличение автомобильного движения, сокращение использования альтернатив	Значительное увеличение, снижение «социальной справедливости»

Сгенерированные поездки отражают экономический “закон спроса”, который для данного случая гласит, что потребление транспортных услуг увеличивается по мере снижения их цены (т.е. совокупных издержек на поездки). В свою очередь совокупные издержки на поездки по улично-дорожной сети напрямую связаны с LOS через уровень

возникающих транспортных задержек, увеличение расхода топлива, износа автомобиля и др. (рис. 3). Генерация дополнительных поездок может иметь как положительный (увеличение числа поездок), так и отрицательный знак (сокращение числа поездок). Последнее имеет место, если пропускная способность городских дорог снижается. При этом часть прежнего транспортного потока может полностью исчезнуть (Cervero 2006; Miller 2006) [15, 16], что иногда называют «испарением трафика» [17].

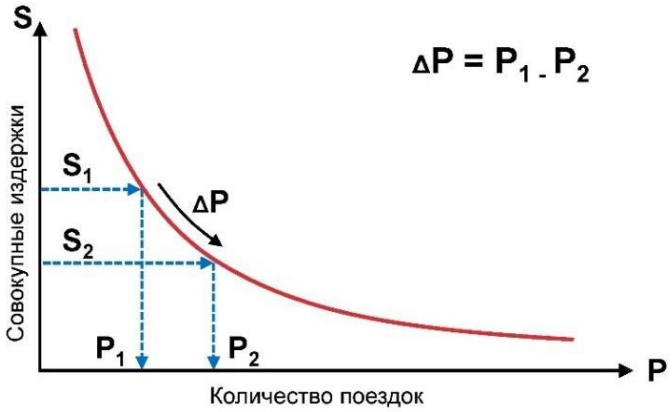


Рис. 3. Зависимость количества поездок от связанных с ними совокупных издержек

Улучшение состояния дорожной инфраструктуры, увеличение ее пропускной способности, способствующее уменьшению заторов, изменяет уровень обслуживания и снижает обобщенные (совокупные) затраты на автомобильные поездки (т.е. их «цену» для пользователя), что стимулирует дальнейшее более активное использование автотранспорта. В краткосрочной перспективе сгенерированный трафик отражает сдвиг по кривой спроса вправо - снижение заторов «удешевляет» вождение в расчете на одну милю или километр с точки зрения времени в пути и эксплуатационных расходов на транспортное средство (рис.3). На многих городских территориях существует и латентный (скрытый) спрос на поездки, то есть на дополнительные поездки в пиковые периоды, которые возникнут в долгосрочной перспективе, если будут устранены заторы на рассматриваемой улично-дорожной сети. Индуцированные поездки в долгосрочной перспективе отражают сдвиг самой кривой спроса в сторону увеличения (вправо).

Это происходит в связи с тем, что транспортные системы и модели землепользования становятся все более автомобилезависимыми и поэтому людям приходится всё больше ездить, чтобы поддерживать заданный уровень доступности товаров, услуг и видов деятельности. Кроме этого может возникать и дополнительный эффект - увеличение пропускной способности автомагистралей может приводить к увеличению количества транспортных средств на прилегающих дорогах (Hansen et al., 1993) [18], стимулируя более рассредоточенное территориальное развитие, зависящее от автомобилей. Хотя эти косвенные воздействия трудно поддаются количественной оценке, они потенциально значительны и должны учитываться при транспортном планировании (Louis Berger & Assoc., 1998) [19]. Рисунок 4 [1] иллюстрирует закономерности возникновения сгенерированного трафика. Объемы трафика растут до тех пор, пока не возникнет ситуация перегруженности дороги (затора), затем темпы роста снижаются и достигают равновесия, о чем свидетельствует горизонтальная часть кривой. Прогноз спроса, составленный исходя из первоначальной динамики роста трафика, укажет на необходимость увеличения пропускной способности дороги, игнорируя существующую тенденцию к постепенному снижению объемов трафика по мере исчерпания резервов пропускной способности. Если будут добавлены, например,

дополнительные полосы движения, то, как и прогнозировалось, возникнет еще один период роста трафика. Это и будет дополнительно сгенерированный трафик, который также через определенное время достигнет нового уровня насыщения.

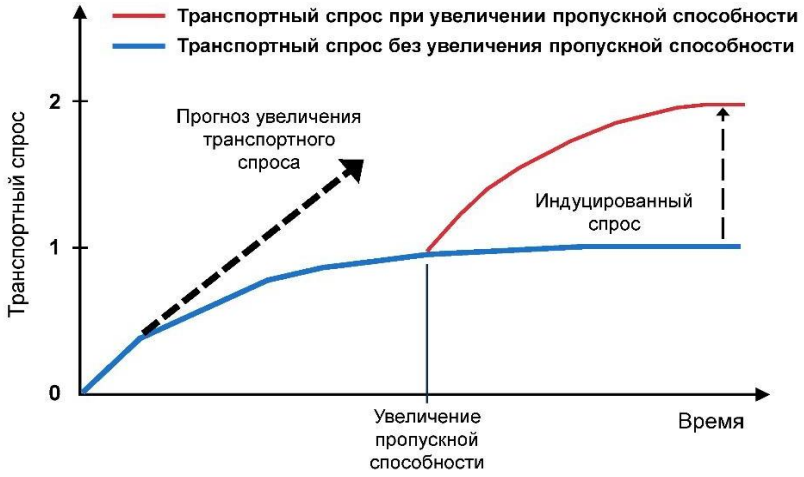


Рис. 4. Формирование сгенерированного трафика (дорожного движения) [1]

В результате дорожные заторы, как правило, поддерживают в дорожном движении самоограничивающее равновесие: как только заторы становятся проблемой, это препятствует дальнейшему росту числа поездок в пиковые периоды. Расширение дорог, которое в краткосрочной перспективе уменьшает заторы, привлекает дополнительные поездки в пиковые периоды, пока заторы снова не достигнут уровня, ограничивающего дальнейший рост объемов движения. Поэтому может быть неверным утверждать, что сокращение заторов в долгосрочной перспективе экономит время в пути. В некоторых ситуациях строительство новых автомагистралей стимулирует разрастание территории городов (модели автомобилезависимого городского землепользования на окраинах), что еще больше увеличивает количество поездок автотранспортом на душу населения. В связи с изложенным выделяют четыре этапа последствий увеличения пропускной способности дорог:

• первый - сокращение времени ожидания в заторах и увеличение средней скорости движения для регулярных пользователей данной дороги;

• второй - изменения во времени и маршруте движения, пункте назначения и выбираемом виде транспорта, позволяющие другим пользователям воспользоваться преимуществами возросших скоростей движения;

• третий - изменения в землепользовании. Более «рассредоточенное» развитие территорий, застройка, ориентированная на использование автомобилей; генерация нового транспортного спроса;

• четвертый - общее увеличение зависимости от автомобилей. Ухудшение условий для движения автотранспорта, для пешеходного и велосипедного движения, снижение качества обслуживания пассажирским транспортом общего пользования, общее ухудшение отношения органов власти к альтернативным видам транспорта и новые попытки решить транспортные проблемы за счет расширения проезжей части и строительства новых дорог.

5. Количественная оценка объемов сгенерированного движения. В таблице 3 представлены некоторые данные об эластичности (краткосрочной и долгосрочной) объемов дорожного движения (трафика) относительно изменений некоторых параметров, характеризующих уровень обслуживания дороги (LOS).

Таблица 3

Некоторые результаты анализа объемов трафика, сгенерированного конкретными транспортными проектами (по материалам [1])

Автор	Вид показателя эластичности	Полученные результаты
Cervero, 2003	Долгосрочная эластичность VMT по отношению к скорости	0,64 (увеличение скорости на 10% приводит к увеличению VMT на 6,4%)
Noland, 2001	Эластичность числа поездок на автомобиле по отношению к количеству км полос движения (городские дороги): ● краткосрочная (в течение года) ● долгосрочная (примерно 5 лет)	 0,5 0,8
Hansen and Huang, 1997	Среднесрочная эластичность интенсивности дорожного движения по отношению к пропускной способности для автомагистралей	0,9 на муниципальном уровне. В течение пяти лет 60-90% добавленной пропускной способности дорог будет заполнено новыми транспортными средствами
SACTRA, 1994	Эластичность числа автомобильных поездок по отношению ко времени поездки: ● краткосрочная ● долгосрочная	 0,5 1,0 Сокращение времени движения по дороге на 20% обычно увеличивает объемы трафика на 10% в краткосрочной перспективе и на 20% в долгосрочной.
Goodwin, 1996	Эластичность числа автомобильных поездок в городах по отношению ко времени поездки: ● краткосрочная ● долгосрочная	 0,27 0,57
National Highway Institute, 1995	Эластичность поездок по автомобильным дорогам по отношению к обобщенным затратам пользователей (времени в пути и финансовым затратам)	0,5
Noland and Lem, 2002	Средняя эластичность VMT по отношению к суммарному километражу полос движения	От 0,2 до 0,6
Small, 1992	Эластичность интенсивности движения по отношению к увеличению пропускной способности	0,5 – 0,8
Lee, Klein and Camus, 1998; FHWA, 2000	Эластичность спроса на поездки по отношению к общим затратам пользователей (время в пути и транспортные расходы): ● краткосрочная ● долгосрочная	 0,8 1,0 Если общие затраты пользователей (время в пути и транспортные расходы) снизятся на 10%, то, по прогнозам, поездки увеличатся на 8% в течение 5 лет и еще на 2% в течение 20 лет
Cervero and Hanson, 2000	Эластичность VMT по отношению к суммарному километражу полос движения	0,56
Barr, 2000	Эластичность VMT на душу населения по отношению к количеству полос движения на квадратную милю (плотность УДС)	0,7
Rodier, et al., 2001	Эластичность VMT в регионе по отношению увеличению пропускной способности полос движения	0,8 -1,1
Burt and Hoover, 2006	Эластичность числа поездок на легких коммерческих автомобилях по отношению к увеличению количества километров дорожных полос на 1 человека водительского возраста; То же - для легковых автомобилей	 0,49 0,27
Hymel, Small и Van Dender, 2010	Эластичность числа автомобильных поездок: - по отношению к плотности дорог на уровне штата: ● краткосрочная ● долгосрочная -по отношению к общему количеству автомобиле- миль: ● краткосрочная ● долгосрочная Эластичность использования транспортных средств в зависимости от загруженности дорог	 0,019 0,093 0,037 0,186 - 0,045 (увеличение общей загруженности дорог в регионе на 10% сокращает пробег в регионе на 0,45% в долгосрочной перспективе)
Kockelman, 2010	Долгосрочная эластичность VMT по отношению к суммарной протяженности полос движения	0,5 – 1,0
Schiffer, Steinvorth и Milam, 2005	Эластичность VMT в зависимости от увеличения количества протяженности полос движения: - краткосрочная -долгосрочная	 0 - 0,40 0,50 – 1,0

Как было отмечено выше, увеличение пропускной способности дорог приводит к генерации дополнительного транспортного спроса, который со временем «поглощает» добавленную пропускную способность и значительно снижает эффективность инвестиций в дорожную инфраструктуру [1,21] (см. табл. 4 и рис.5).

Таблица 4

Некоторые данные о поглощении сгенерированным трафиком новой пропускной способности дорог в краткосрочной и долгосрочной перспективе (в %) [1]

Автор	Краткосрочная (1-3 года)	Долгосрочная (3+ лет)
SACTRA		50-100%
Goodwin	28%	57%
Johnson and Ceerla		60-90%
Hansen & Huang		90%
Fulton, et al.	10-40%	50-80%
Marshall		76-85%
Noland	20-50%	70-100%

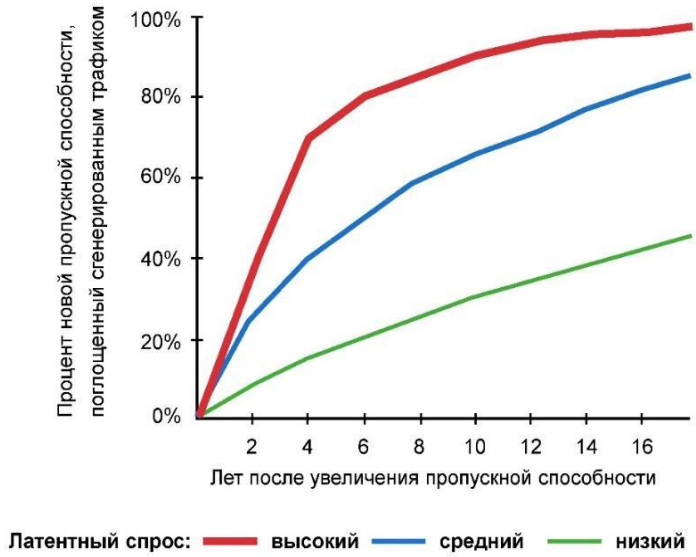


Рис. 5. Эластичность объема дорожного движения по отношению к пропускной способности дорог с учетом уровня латентного спроса [1]

Сгенерированный трафик обычно накапливается в течение нескольких лет (Goodwin, 1998) [20]. В типичных городских условиях более половины добавленной пропускной способности дорог заполняется трафиком в течение пяти лет после завершения проекта за счет дополнительных поездок транспортных средств, в том числе тех, которые в противном случае не случились бы, при этом в последующие годы наблюдается дальнейший, но более медленный рост. На рисунке 5 показан типичный рост сгенерированного трафика, отмеченный в различных исследованиях (по данным [1]). Из данного рисунка видно, что поглощение добавленной пропускной способности имеет существенно более высокую динамику на территориях с более высоким уровнем латентного спроса (территории с более высокой плотностью населения, с превалированием монофункциональной застройки).

6. Уровень обслуживания пассажирским транспортом общего пользования ($LOS_{ПТОП}$).

Пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) является альтернативным каналом транспортного предложения, который принимает на себя часть транспортного спроса населения. Также как и для дорожного движения (трафика), число поездок на ПТОП определяется рядом факторов, которые в совокупности определяют обобщенную стоимость (обобщенные затраты) поездки для пользователя. Обобщенные затраты могут быть выражены показателями уровня обслуживания ПТОП ($LOS_{птоп}$). Пользователь транспорта, реализуя поездку в определенный пункт назначения, выбирает тот вид транспорта, услуги которого имеют для него в данных условиях меньшую обобщенную стоимость (затраты).

С точки зрения влияния на распределение транспортного спроса населения следует рассматривать следующие характеристики услуг ПТОП – их стоимость и качество. Стоимость услуг ПТОП определяется тарифной политикой, реализуемой местными администрациями. Она может оцениваться отношением средних расходов домохозяйств на ПТОП в месяц к средним доходам домохозяйств за тот же период. Качество же обслуживания трудно поддается содержательному описанию, поскольку не существует общепринятых наборов стандартов или критериев, с помощью которых его можно измерить. Его восприятие во многих случаях субъективно и должно оцениваться в конкретных условиях осуществления перевозок.

Уровень обслуживания $LOS_{ПТОП}$ является интегральным показателем. Показатели $LOS_{ПТОП}$ мотивируют тех, у кого есть выбор, к изменению их транспортного поведения. Существует проблема количественной оценки качества услуг ПТОП и интеграции различных частных показателей качества услуг в один общий индекс. Для определения $LOS_{ПТОП}$ целесообразно использовать следующую совокупность показателей качества услуг, ориентированных на пользователей: доступность, время поездки, надежность совершения поездки, «прямолинейность» обслуживания (количество пересадок), частота обслуживания и плотность пассажиров в транспортном средстве.

Такие показатели должны быть:

- зависимы от характеристик конкретной поездки или ее части (звена);
- связаны с процессом перевозки, а не с характеристиками транспортных средств и инфраструктуры;
-количественно измеримы.

В таблицах в качестве примера приведены возможные количественные градации перечисленных выше характеристик услуг общественного транспорта, предложенные в [22].

Доступность. В [22] предлагается определять доступность на двух уровнях:

- базовая доступность, определяемая исходя из принципиальной доступности или недоступности услуг ПТОП для пользователей соответственно показателями, равными 1,0 и 0. В последнем случае дальнейший расчет уровня $LOS_{ПТОП}$ теряет смысл;
- относительная доступность определяется через время доступа к общественному транспорту, т.е. как время, необходимое для того, чтобы добраться до места посадки в ПТОП от места начала поездки, а затем от пункта выхода из общественного транспорта до пункта назначения поездки. Этот показатель может быть определен через время или расстояние до мест посадки (табл. 5). Эти время или расстояние устанавливаются в зависимости от используемого вида передвижения для достижения инфраструктуры ПТОП.

Таблица 5

Показатели уровня обслуживания, связанные с доступностью остановочных пунктов ПТОП

Уровень обслуживания	Время (мин.)	Расстояние		
		Пешеходное движение (м)	На автомобиле (км)	Система «park&ride» (км) (перехватывающие парковки)
A	<2,0	0 до 100	<0,8	-
B	2,0 до 4,0	101 до 200	0,8 до 1,6	0,4 до 1,2
C	4,0 до 7,5	201 до 400	1,6 до 3,2	1,2 до 3,2
D	7,5 до 12	401 до 600	3,2 до 4,8	3,2 до4,8
E	12 до 20,0	601 до 1 000	4,8 до 8,0	4.8 до 8,0
F	>20,0	>1 001	>8,0	>8,0

Источник: [22]

Время поездки. Показатель времени поездки, по сути, оценивает способность ПТОП конкурировать с личным автотранспортом. Этот показатель представляет собой отношение времени в пути с использованием ПТОП ко времени в пути к той же точке назначения на автомобиле (см. табл. 6).

Таблица 6

Показатели уровня обслуживания, связанныt со временем поездки

Уровень обслуживания	Значение показателя	Комментарии
A	< 1,00	Наилучшее обслуживание. ПТОП быстрее, чем личный автомобиль
B	1,00 до 1,10	ПТОП на 10% медленнее, чем автомобиль
C	1,11 до 1,34	ПТОП до 33% медленнее по сравнению с автомобилем
D	1,35 до 1,50	ПТОП на 50% медленнее по сравнению с автомобилем
E	1,51 до 2,00	ПТОП не более чем в два раза медленнее автомобиля
F	>2,01	ПТОП более чем в 2 раза медленнее автомобиля; услуги доступны только для людей, зависящих от ПТОП

Источник: [22]

Надежность поездок. Надежность обычно оценивается процентом рейсов ПТОП, выполненных с опозданием относительно расписания на 3 и более минут или с опережением расписания более чем на 1 минуту. Показатель надежности поездок ПТОП безусловно связан с показателем частоты движения (обслуживания) на конкретном маршруте: чем чаще предоставляется услуга, тем ниже важность более раннего или более позднего обслуживания (таблица 7). Аналогичным образом, чем реже предоставляется услуга, тем важнее ее надежность. Национальный комитет по городскому транспорту США (NCUT) рекомендовал для часов пик уровень $LOS_{ПТОП}$ C, при котором периодичность обслуживания составляет от 9 до 12 минут [22]. В ряде исследований утверждалось также, что надежность является менее важным показателем, чем частота обслуживания ПТОП.

Частота обслуживания. Данный показатель зависит от спроса, который, в свою очередь, связан с плотностью населения в пункте окончания каждой поездки. В таблице 8 предложены интервалы, основанные на различной плотности населения.

Таблица 7

Показатели уровня обслуживания в зависимости от надежности поездок (% рейсов, выполненных по расписанию) и частоты обслуживания

Уровень обслуживания	Частота обслуживания			
	≤ 8 мин[2]	8 до 12 мин	13 до 20 мин	>21 мин
A	85 до 100	90 до 100	95 до 100	98 до 100
B	75 до 84	80 до 89	90 до 94	95 до 98
C	66 до 74	70 до 79	80 до 89	90 до 94
D	55 до 65	60 до 69	65 до 79	75 до 89
E	50 до 54	50 до59	50 до 64	50 до 74
F	<50	<50	<50	<50

Источник: [22]

Таблица 8

Показатели уровня обслуживания в зависимости от частоты обслуживания и плотности населения

Уровень обслуживания	4000 чел/км²		От 3000 до 4000 чел./км²		От 2000 до 3000 чел./км²		От 750 до 2000 чел./км2		Время ожидания для обслуживания по запросу, мин
	Интервал в час пик, мин.	Внепиковый интервал, мин	Интервал в час пик, мин	Внепиковый интервал, мин	Интервал в час пик, мин	Внепиковый интервал, мин	Интервал в час пик, мин	Внепиковый интервал, мин	
A	<2	≤5	≤4	≤9	≤9	≤14	≤9	≤14	9
B	2 до 4	5 до 9	5 до 9	10 до 14	10 до 14	15 до 19	10 до 14	15 до 29	10 до 14
C	5 до 9	10 до 14	10 до 14	15 до 19	15 до 24	20 до 30	15 до 24	30 до 44	15 до 25
D	10 до 14	15 до 20	15 до19	20 до 29	25 до 39	31 до 45	25 до 39	45 до 59	26 до 60
E	15 до 20	21 до 30	20 до 30	30 до 60	40 до 60	46 до 60	40 до 60	60 до 90	>60
F	>20	>30	>30	>60	>60	>60	>60	>90	День или более

Источник: [22]

«**Прямолинейность» обслуживания.** Люди, как правило, не любят делать пересадки. Для них также важно время, затрачиваемое на пересадки. Уровни обслуживания в зависимости от этих факторов приведены в таблице 9.

Таблица 9

Показатели уровня обслуживания в зависимости от количества и длительности пересадок

Уровень обслуживания	Число пересадок	Время, затрачиваемое на пересадки, минут
A	0	-
B	1	<5
C	1	5 до 10
D	1	>10
D	2	<5
E	2	>5
F	3 и более	-

Источник: [22]

Плотность пассажиров в транспортном средстве. Плотность пассажиров является индикатором эффективности планирования и организации пассажирских перевозок. Этот показатель имеет решающее значение для обеспечения удовлетворенности пассажиров качеством услуг ПТОП. В таблице 10 представлены

[2] Среднее время ожидания равно половине интервала

значения плотности пассажиров для разных уровней обслуживания в соответствии с рекомендациями Национального комитета по городскому транспорту США (NCUT) [22]. Безусловно представленные нормативы могут быть иными для условий других городских транспортных систем.

Таблица 10

Показатели уровня обслуживания в зависимости от наполняемости и уровня удобства салона

Уровень обслуживания	Плотность пассажиров
A	Для всех пассажиров предусмотрены отдельные сиденья или ряды мягких сидений с высокими спинками
B	1 место на пассажира; параллельные ряды мягких сидений с минимальной площадью не менее 0,46 м2 на человека
C	1 место на пассажира; параллельные ряды жестких (формованных пластиковых) сидений площадью не менее 0,46 м2 на человека
D	Посадочные места по периметру салона: от 0,28 до 0,46 м2 на человека, или от 100 до 110 процентов расчетной посадочной нагрузки.
E	от 0,19 до 0,28 м2 на человека, или от 111 до 125 процентов расчетной посадочной нагрузки.
F	0,19 м2 на человека или менее, или более 125 процентов расчетной посадочной нагрузки.

Источник: [22]

Перечисленные выше в таблицах 5–10 показатели $LOS_{ПТОП}$ являются частными, отражающими оценку качества обслуживания по отдельным показателям. Для использования этих показателей при оценке работы ПТОП требуется их агрегирование. В [22] был предложен подход, основанный на системе пятибалльных оценок по уровням обслуживания и введении весовых коэффициентов для каждого из рассмотренных выше показателей (табл. 11). Для того, чтобы определить интегральный $LOS_{ПТОП}$, необходимо умножить количество баллов за каждый частный LOS по каждому показателю на весовые коэффициенты; общее количество набранных баллов делится на общее количество весовых баллов (11), что в итоге даст интегральное значение $LOS_{ПТОП}$.

Таблица 11

Значения баллов для определения интегрального значения $LOS_{ПТОП}$

Уровень обслуживания	**Баллы**	**Уровень обслуживания**	**Баллы**
A	5	D	2
B	4	E	1
C	3	F	0

Источник: [22]

Таблица 11

Значения весовых коэффициентов для определения интегрального значения $LOS_{ПТОП}$

Показатель	**Весовой коэффициент**	**Показатель**	**Весовой коэффициент**
1	2	4	2
2	3	5	1
3	2	6	1

Источник: [22]

Также как и для дорожного движения, изменение уровня обслуживания ПТОП ($LOS_{ПТОП}$) в результате совершенствования организации работы системы общественного транспорта приводит к циклическому процессу генерации спроса на поездки. Можно выделить следующие этапы этого циклического процесса:

- первый – сокращение времени поездки и ожидания на остановках и пересадках, количества пересадок, наполнения ТС. Обеспечение качества услуг, сопоставимого с использованием личного АТ. Перечисленное происходит в результате расширения маршрутной сети, улучшения планирования и управления ПТОП, при одновременном ограничении на использование личного АТ (парковочная политика, платность пользования дорогами и др.);
- второй – генерация новых поездок на ПТОП: изменения со стороны пользователей транспорта, в первую очередь в выборе вида транспорта и пунктов назначения, позволяющие воспользоваться появившимися преимуществами ПТОП – переход от использования личного автотранспорта к использованию ПТОП для поездок в те же пункты назначения, выбор новых пунктов назначения, ставших более доступными в результате улучшений ПТОП;
- третий – изменения в землепользовании, связанные с развитием и улучшением работы ПТОП - появление новой застройки и рост территории городов, переход к транзитно-ориентированному развитию городов, генерация нового транспортного спроса;
- четвертый – общее увеличение зависимости от ПТОП. Рост спроса на поездки по мере расширения сети приводит к увеличению загруженности системы ПТОП и, в итоге, к снижению качества обслуживания населения – что требует новых инвестиций в систему ПТОП.

Что происходит, когда обе системы (личный автотранспорт/дорожная инфраструктура и пассажирский транспорт общего пользования) развиваются независимо? В этом случае инвестиции в дорожную инфраструктуру и ПТОП в целях улучшения их LOS проводятся без должной координации. За счет этого:

-создаются условия для продолжения автомобиле-ориентированного развития городов и дальнейшего расширения их территорий;

- не обеспечивается должная загрузка ПТОП и средства, затраченные на его модернизацию, оказываются использованы с недостаточной эффективностью;

- в целом не обеспечивается должная эффективность использования средств, выделяемых на совершенствование функционирования городских транспортных систем.

7. Изменение подхода к оценке качества функционирования городских транспортных систем – от использования уровней обслуживания к пройденному суммарному километражу.

В последние годы чрезмерное внимание к использованию показателя уровня обслуживания (LOS) в процессах планирования (в первую очередь – улично-дорожной инфраструктуры и землепользования) подвергается значительной критике [23, 28, 29, 30]. Поскольку расчет LOS производится для относительно короткого промежутка времени в течение дня (для «часов пик»), использование данного показателя для оценки качества движения транспортных потоков на городских дорогах приводит в большинстве случаев к принятию «автомобиле-ориентированных» решений. При этом возникает ситуация, когда обеспечение непрерывности движения потока отдельных автомобилей приобретает приоритет над другими факторами, которые могут улучшить транспортную ситуацию и условия жизни в городских районах, такими, как усилия по повышению доступности, безопасности и устойчивости на основе решений, связанных с развитием услуг ПТОП, управлением мобильностью, развитием альтернативных видов

передвижения, совершенствованием политики в области землепользования и развитием ИТС и цифровых сервисов [24, 25].

Сказанное определяет необходимость изменения подходов к оценке транспортных и градостроительных проектов, а также к оценке качества функционирования городских транспортных систем в целом – переходе от использования LOS к использованию альтернативных показателей, ориентированных на другие цели транспортной политики. Такими альтернативными показателями могут являться показатели, построенные на суммарном пробеге транспортных средств (vehicle-miles/km traveled - VMT). Подобные предложения были впервые реализованы в США в начале 2010-х годов [24, 25, 26, 31, 32]. В отличие от LOS, который в случае дорожного движения измеряет удобство автомобильных поездок и задержки на пересечениях, VMT оценивает общее количество и протяженность поездок на транспорте в определённом районе и то, как оно меняется вследствие реализации проекта. В то время, как LOS фокусируется на движении автомобилей, игнорируя другие виды транспорта, VMT измеряет общее количество миль, пройденных всеми наземными транспортными средствами в регионе за определённый период (обычно год). VMT представляет показатель, характеризующий реализованный спрос на проезд транспортных средств по дорогам общего пользования. Анализ VMT важен для экономического, экологического и инфраструктурного планирования. Он помогает прогнозировать потребление топлива, загрязнение атмосферного воздуха, износ дорожной инфраструктуры и планировать бюджеты на её обслуживание. Хотя термин «пройденный транспортным средством путь» может звучать как нечто само собой разумеющееся, применение этой, казалось бы, простой концепции имеет серьезные последствия для транспортного планирования и политики.

Некоторыми важными преимуществами использования VMT являются [26, 32]:

-более точная оценка эффективности и качества транспортных и градостроительных проектов. VMT учитывает региональные последствия, а не только последствия на локальном уровне;

-стимулирование развития и использования альтернативных видов транспорта. VMT призван поощрять инвестиции в те виды транспорта и схемы использования земель, которые способствуют уменьшению количества поездок на автомобилях за счёт использования более коротких поездок и более экологичных и массовых видов транспорта;

-возможность оценки влияния проектов на разные цели. Например, на снижение выбросов парниковых газов, улучшение качества транспортного обслуживания населения, развитие мультимодальных перевозок, сохранение открытых пространств и т. д.

В то же время данная новая концепция использования VMT не должна означать полного отказа от использования LOS для оценки отдельных элементов и подсистем городских транспортных систем. В частности, использование показателя уровня обслуживания в системе пассажирского транспорта общего пользования ($LOS_{ПТОП}$) по-прежнему остается важным инструментом обеспечения и контроля качества услуг, предоставляемых населению. Аналогично использование уровней обслуживания остается актуальным для объектов велосипедной и пешеходной инфраструктуры. LOS широко используется в различных процессах, поэтому полностью отказаться от них сложно. Например, инженеры по организации дорожного движения часто применяют LOS для корректировки режимов работы светофоров или оценки влияния новых мероприятий на трафик.

8. Показатели, основанные на VMT и методы их расчета.

VMT рассчитывают, суммируя километры, пройденные легковыми и грузовыми автомобилями, транспортными средствами наземного пассажирского транспорта общего

пользования по дорогам региона. Формула расчёта: VMT = (Средний объем ежедневного движения (AADT) × длина сегмента дороги) x 365. Затем VMT всех дорог и их сегментов суммируют, чтобы получить VMT для рассматриваемого географического региона. VMT в общем случае не учитывает количество пассажиров внутри транспортного средства. Например, автомобиль с пятью пассажирами и автомобиль с одним пассажиром, проехавший одно и то же количество километров в год, имеют одинаковый VMT. При оценке транспортных и градостроительных проектов учитывается чистое изменение VMT относительно базовых условий (т.е. до реализации проекта).

Министерство транспорта США (DOT) определяет количество пройденных транспортными средствами миль (VMT) как "общее годовое количество миль, пройденных транспортными средствами, деленное на общую численность населения штата или урбанизированной территории" [24, 32]. Этот показатель, наряду со временем в пути и совокупными затратами на поездки, используется для оценки спроса на использование транспортных средств и принятия политических решений в отношении развития дорог и другой транспортной инфраструктуры. Федеральное управление автомобильных дорог США ежемесячно публикует данные о дорожном движении. Согласно этому новому методу, если средний показатель VMT на человека в рамках проекта превышает установленное пороговое значение, необходимо принять меры для его снижения. Вместо строительства дополнительных полос движения такие меры могут включать в себя такие стратегии, как совершенствование перевозок общественным транспортом, увеличение доли совместно используемых автомобилей (такси, кар-шеринг) или введение платности парковки. Такие меры по смягчению последствий реализации градостроительных и транспортных проектов в большей степени соответствуют целям городов по сбалансированному использованию различных видов транспорта и передвижения с учетом интересов всех возрастных групп населения.

Расчёт VMT может быть достаточно проблематичным. В принципе можно было бы напрямую оценить данный показатель на основе информации с датчиков учета движения. Но таких датчиков не так много и они, в основном, устанавливаются на федеральных дорогах. Можно использовать треки движения автомобилей, фиксируемые коммерческими сервисами (например, приложениями-навигаторами). Однако обычно информация о поездках поступает из опросов, которые, к сожалению, не всегда точны. Существуют два количественных метода для оценки влияния проектов на VMT (на основе данных опросов) [26]:

-применение моделей эластичности спроса на поездки на основе эмпирических исследований, которые количественно оценивают эффект индуцированных поездок;

- использование подхода на основе модели спроса на поездки. Обычно в расчёт включают информацию, специфичную для генерируемых проектом VMT (например, исследования рынка о предполагаемой клиентской базе коммерческого проекта и др.).

Некоторые аспекты, которые следует учитывать при оценке VMT при реализации проекта:

-расположение места реализации проекта. Например, если проект реализуется в районе с низким уровнем генерации поездок (VMT) или имеет характеристики, способствующие использованию общественного транспорта, пешего передвижения или велосипеда, то это может считаться положительным фактором его реализации;

-влияние проекта на поведение людей, совершающих поездки. Например, если проект расположен рядом с территорией, обслуживаемой качественным общественным транспортом, то это может привести к тому, что некоторые поездки будут осуществляться с его использованием, что повлияет на величину VMT;

-возможности снижения VMT. Например, оценка изменения VMT при строительстве крупного магазина в районе, где люди делают покупки, отвлекаясь от поездок в более отдалённые магазины, может показать снижение общего числа VMT;

-возможность уменьшения негативного воздействия. Если негативные воздействия проекта (воздействие на окружающую среду и климат, безопасность движения и др.) можно снизить до допустимого уровня различными организационно-техническими мерами (например, через внедрение электромобилей и электробусов), то проект считается имеющим менее значительное воздействие с точки зрения генерации им VMT. Если же этого сделать нельзя, то возникает значительное и неизбежное влияние проекта на VMT, как источник этих негативных воздействий.

В некоторых случаях доступны онлайн-инструменты для расчёта VMT на основе локальных данных. Например, в Калифорнии, округ Санта-Клара (США), используется веб-инструмент VMT Evaluation Tool для оценки проектов в области землепользования (vmttool.vta.org) [27]. Программа оптимизирована для Chrome, Firefox, Edge или Safari на компьютере с Windows или Mac. Данный инструмент оценки VMT предназначен для того, чтобы помочь в оценке VMT, генерируемых проектом, и отборе проектов в сфере землепользования, а также в расчете сокращений VMT, связанных с реализацией определенных мер. Инструмент предназначен для использования в трех основных областях землепользования:

строительство жилой недвижимости;

строительство офисной недвижимости;

строительство промышленной недвижимости.

Данная программа оценивает проекты с одним из этих видов землепользования или их комбинацией, а также с организацией розничной торговли на местном уровне или без нее. Другие типы землепользования, крупные или сложные проекты или долгосрочные планы землепользования, требуют других методов оценки и анализа VMT.

Как отмечено выше, использование показателя VMT не учитывает количество человек, перевозимых транспортными средствами. С точки зрения оценки загрузки улично-дорожных сетей и оценки возникающих при этом последствий такой подход вполне оправдан. В то же время с точки зрения производительности пассажирской транспортной системы очень важно и количество обслуженных пассажиров. В связи с этим, возможно, что более объективной оценкой будет являться сравнение количества выполненных пассажиро-километров (PKT-passenger-km travelled) в расчете на одного жителя рассматриваемой территории. Это достаточно известный показатель «удельной транспортной работы» или удельного пассажирооборота.

В связи с этим в целях оценки эффективности развития землепользования и качества функционирования городских транспортных систем следует использовать показатели, основанные на валовом пробеге транспортных средств и валовом пассажирообороте. В частности, могут использоваться следующие показатели:

1. Общая оценка возможности реализации транспортного или градостроительного проекта с точки зрения обеспечения устойчивости функционирования транспортной системы:

$$\frac{1}{P}\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A_{ij}L_i \le \frac{1}{P}\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A_{ij}^*L_i^* \qquad (1)$$

где: A_{ij}, A_{ij}^*- интенсивность движения транспортных средств j-того типа по i-тому участку УДС соответственно при реализации проекта и до реализации проекта (*);

L_i – длина i-того участка;

n – количество задействованных участков УДС;

m- количество типов ТС;

P – количество жителей, проживающих на рассматриваемой территории.

2. Оценка перегруженности УДС:

$$\frac{1}{P}\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A_{ij}L_i < K_{\text{порог}} \qquad (2)$$

3. Общая оценка уровня развития пассажирского транспорта общего пользования. Предполагаются значения показателя, превышающие некий установленный пороговый уровень $К^*_{\text{порог}}$:

$$\frac{\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A_{ij}\ M_j\ L_i}{\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A_{ij}L_i} \geq K^*_{\text{порог}} \qquad (3)$$

где: M_j- среднее количество людей, перевозимых j-тым типом транспортных средств.

Пороговые значения в приведенных выше формулах устанавливаются местными администрациями. Использование показателя LOS остается правомерным для оценки работы перекрестков, пешеходной и велосипедной инфраструктуры, других элементов УДС, для оценки качества услуг ПТОП и эффективности мероприятий по их совершенствованию.

Можно также сформулировать следующие два условия допустимости реализации проектов по застройке территорий (жилой, производственной) исходя из требования недопущения чрезмерной генерации дополнительного автомобиле-ориентированного транспортного спроса:

- увеличение количества VKT (проходимых автомобиле-километров/год) на рассматриваемой территории в результате реализации проекта должно быть меньше увеличения суммарного количества пассажиро-километров на той же территории:

$$\frac{\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A^*_{ij}L^*_i}{\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A_{ij}L_i} < \frac{\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A^*_{ij}M^*_jL^*_i}{\sum_1^n \quad \sum_1^m \quad A_{ij}M_jL_i} \qquad (4)$$

- существующий уровень обслуживания пассажирским транспортом общего пользования $LOS_{\text{птоп}}$ не должен снижаться и должен соответствовать как минимум уровню В по большинству перечисленных выше показателей.

9. Возможность использования VMT в целях налогообложения.

Во многих странах рост на дорогах числа автомобилей (легковых и грузовых), использующих электропривод, приводит к снижению доходов бюджета, получаемых через акцизы на топливо. Именно эти средства, как правило, выделяются на финансирование дорожной инфраструктуры. В связи с этим некоторые эксперты рекомендуют заменить налог на топливо (акциз) налогом на VMT. Согласно этому аргументу, использование VMT не позволит водителям электромобилей уклоняться от своего вклада в финансирование дорожной инфраструктуры и сохранит надежный фонд дорожных проектов по мере роста доли рынка электромобилей. В Российской Федерации данная проблема в ближайшие годы вряд ли приобретет актуальность. На международном уровне в таких странах, как Германия, Бельгия и Польша, действует налог на VMT крупногабаритных грузовиков, в то время как Новая Зеландия применяет налог VMT ко всем тяжелым транспортным средствам и автомобилям с дизельным двигателем. В США Программа OReGO в штате Орегон позволяет водителям, по сути, выбирать между уплатой государственного налога на топливо в размере 38 центов за галлон или регистрироваться в программе, которая позволяет им платить налог VMT и получать вместо этого налоговую скидку на топливо. В январе 2020 года в штате Юта (США) была запущена пилотная программа VMT tax для электромобилей, предоставляющая пользователям возможность платить либо 1,5 процента за милю, либо ежегодный сбор в размере 120 долларов (для электромобилей), либо 20 долларов (для гибридов).

10. Экологические аспекты использования VMT.

Самый известный пример использования VMT для решения экологических проблем является опыт штата Калифорния (США), где законодательное собрание в 2013

году провело базовую реформу Калифорнийского закона о качестве окружающей среды (CEQA), утвердив новый закон SB 734 (полностью введен в действие в 2020 году). SB 734 требует, чтобы все экологические исследования для предлагаемых проектов в штате включали в себя переход от LOS к суммарному пробегу транспортных средств (VMT) в качестве критического показателя воздействия проекта. Ранее штат, его местные муниципалитеты и региональные правительства оценивали экологические последствия проекта исключительно на основе того, приведет ли проект к заторам или к их устранению. Сосредоточившись на использовании VMT, а не на LOS, закон теперь возлагает ответственность за сокращение автомобильных поездок при планировании. Сторонники использования VMT в качестве показателя утверждают, что он дает более целостную оценку того, как проект повлияет на загруженность дорог, выбросы парниковых газов и качество воздуха по сравнению с LOS. Оценка количества VMT может служить одним из показателей для оценки эффективности политики, направленной на борьбу с изменением климата, снижение воздействия транспорта на состояние атмосферного воздуха и здоровье населения, поощрение использования общественного транспорта и других «устойчивых видов транспорта» [28, 29, 30]. В то же время дальнейшее развитие данного подхода может предполагать использование для оценок экологических воздействий не только количества проходимых VMT, но и числа выполненных пассажиро-километров (PKT) с учетом использования различных источников энергии. В этом случае рост удельного пассажирооборота городского электротранспорта общего пользования (трамваи, троллейбусы, электробусы, метро, городская железная дорога) может служить дополнительным показателем эффективности городской политики в части снижения экологических воздействий транспорта.

Выводы

Необходимость поиска устойчивых решений [10] при планировании и оценке работы транспортных систем обуславливает использование интегральных показателей, основанных на пробеге и пассажирообороте транспортных средств. Для оценки частных решений в области организации пассажирских перевозок и дорожного движения актуальным по-прежнему остается использование показателей уровня обслуживания, пороговые уровни которых должны определяться с учетом специфики конкретных условий движения и перевозок на рассматриваемых территориях.

Список литературы

1. Litman T. Generated Traffic and Induced Travel: Implications for Transport Planning. – Victoria Transport Policy Institute (VTPI), 2012. – 18 July. – URL: https://www.vtpi.org/gentraf.pdf (дата обращения: 05.12.2025).

2. Lawton K. T. The Urban Structure and Personal Travel: an Analysis of Portland Data and Some National and International Data // E-Vision 2000 Conference Proceedings. – RAND Corporation, 2001. – URL: https://www.rand.org/scitech/stpi/Evision/Supplement/lawton.pdf (дата обращения: 05.12.2025).

3. Levinson D., Kumar A. Activity, Travel, and the Allocation of Time // Journal of the American Planning Association. – 1995. – Vol. 61, No. 4. – P. 458-470. – URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944369508975656 (дата обращения: 06.12.2025).

4. Urban Planning and Travel Behaviour: Summary and Conclusions. – Paris : International Transport Forum (ITF), OECD, 2022. – 102 p. – (ITF Research Reports ; No. 189). – URL: https://www.itf-oecd.org/urban-planning-and-travel-behaviour (дата обращения: 06.12.2025).

5. Управление заторами в городах : [пер. с англ.] / ОЭСР, ЕКМТ. – Москва : Ассоциация территориальных инициатив (АТИ), 2020. – 188 с. – ISBN 978-5-91258-454-1.

6. Highway Capacity Manual: a Guide for Multimodal Mobility Analysis. – 7th ed. – Washington, D.C. : Transportation Research Board (TRB), 2022. – URL: https://www.trb.org/Publications/Blurbs/183400.aspx (дата обращения: 02.12.2025).

7. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог: утв. распоряжением Росавтодора от 30.04.2012. – Введ. 2012-08-01. – Отменен в 2022 г. – Москва : ФГУП «Информавтодор», 2012. – 78 с.

8. Сильянов В. В., Новиков А. Н., Еремин С. В., Шевцова А. Г. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 2024. – 330 с. – ISBN 978-5-361-01336-4.

9. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. – 6th ed. – Washington, D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2011. – URL: https://highways.dot.gov/safety/pedestrian-bicyclist/safety-tools/417-policy-geometric-design-highways-and-streets-6th (дата обращения: 01.12.2025).

10. Донченко В. В. Устойчивые городские транспортные системы. Изменение парадигмы планирования и развития городского транспорта : монография. – Москва : Агентство Радар, 2023. – 207 с.

11. Jacobsen P. Liquid vs. Gas Models for Traffic // Los Angeles Times. – 1997. – 14 May. – Section: Letters to the Editor. – URL: https://www.latimes.com/archives (дата обращения: 05.12.2025).

12. Hills P. What is Induced Traffic? // Transportation. – 1996. – Vol. 23, No. 1. – P. 5-16. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/BF00165216 (дата обращения: 06.12.2025).

13. Downs A. Stuck in Traffic: Coping with Peak-Hour Traffic Congestion. – Washington, D.C. : Brookings Institution Press ; Cambridge, Mass. : Lincoln Institute of Land Policy, 1992. – 221 p. – URL: https://www.brookings.edu/book/stuck-in-traffic/ (дата обращения: 03.12.2025).

14. Youn H., Jeong H., Gastner M. T. The Price of Anarchy in Transportation Networks: Efficiency and Optimality Control // Physical Review Letters. – 2008. – Vol. 101, No. 12. – Art. 128701. – URL: https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.101.128701 (дата обращения: 07.12.2025).

15. Cervero R. Freeway Deconstruction and Urban Regeneration in the United States // International Symposium for the Cheonggyecheon Restoration. – 2006. – URL: http://www.uctc.net/papers/763.pdf (дата обращения: 07.12.2025).

16. Miller J. J. Redistribution of Traffic, Disappearing Traffic: The Challenges of Reallocation of Public Space // Disappearing Traffic! The Challenge of Reallocating Public Space : proceedings of the conference. – Simon Fraser University, 2006. – URL: http://presentations.thecyclistwebhouse.com/VACCRedistribution_of_Traffic-Disappearing_Traffic/Index.htm (дата обращения: 05.12.2025).

17. Reclaiming City Streets For People: Chaos Or Quality Of Life? / European Commission. – Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2004. – URL: http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/streets_people.pdf (дата обращения: 06.12.2025).

18. Hansen M., Gillen D., Dobbins A., Huang Y.-M., Puvathingal M. Air Quality Impacts of Urban Highway Capacity Expansion: Traffic Generation and Land Use Changes. – Berkeley : Institute of Transportation Studies, University of California, 1993. – (UCB-ITS-RR-93-5). – URL: www.uctc.net (дата обращения: 03.12.2025).

19. Guidance for Estimating the Indirect Effects of Proposed Transportation Projects / Louis Berger & Assoc. ; National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. – Washington, D.C. : Transportation Research Board, 1998. – (NCHRP Report ; 403). – URL: www.trb.org (дата обращения: 07.12.2025).

20. Goodwin Ph. B. The End of Equilibrium // Theoretical Foundations of Travel Choice Modelling / ed. by T. Garling et al. – Elsevier, 1998. – ISBN 0080430627.

21. Литвинов А., Донченко В. Оценка эластичности транспортного спроса на основе моделей выбора способа передвижения в городах // International Journal of Advanced Studies. – 2020. – Т. 10, № 4. – С. 40–57. – DOI: 10.12731/2227-930X-2020-4-40-57.

22. Alter C. H. Evaluation of Public Transit Services: The Level-of-Service Concept // Transportation Research Record. – 1976. – No. 606. – P. 39–53. – URL: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1976/606/606-007.pdf (дата обращения: 03.12.2025).

23. Measuring Transportation: LOS versus VMT // City of Sacramento. – URL: https://...GPU_LOS-to-VMT-Page2(1).pdf (дата обращения: 03.12.2025).

24. VMT reduction planning for state transportation projects / ICF. – 2024. – URL: https://www.icf.com/insights/environment/sb-743-caltrans-vmt-guide (дата обращения: 03.12.2025).

25. Prestrud Ch. VMT reduction targets and challenges : presentation to the Washington State Transportation Commission / Washington Policy Center. – 2024. – 18 January.

26. Litman T., Shebeeb O., Milam R. T. VMT as a Metric of Sustainability: Why and How to Implement Vehicle Travel Reduction Targets // ITE Journal. – 2024. – July. – URL: https://www.vtpi.org/ITEJ_VMT_as_a_Metric_July2024.pdf (дата обращения: 03.12.2025).

27. Santa Clara Countywide VMT Evaluation Tool: Quick Start Guide. – 2020. – 22 May. – URL: https://www.vta.org/sites/default/files/2020-10/SCCVMTEvaluationTool_QuickStartGuide_2020-5-22_FINAL.pdf (дата обращения: 06.12.2025).

28. Moving from LOS to VMT is more complicated than it might seem / State Smart Transportation Initiative. – 2024. – 2 October. – URL: https://ssti.us/2024/10/02/moving-from-los-to-vmt-is-more-complicated-than-it-might-seem/ (дата обращения: 06.12.2025).

29. Nguyen J., Yuen T. How Measuring Vehicle Miles Traveled Can Promote Health Equity. Case Studies & Lessons Learned from Early Adopters of VMT / ChangeLab Solutions. – 2019. – URL: https://www.changelabsolutions.org/sites/default/files/2019-10/CLS-BG216-VMT_GUIDE_FINAL_v05-ACCESS_20191015.pdf (дата обращения: 06.12.2025).

30. Assessing Transportation Impacts Using Vehicle Miles Traveled Rather Than Level of Service Can Incentivize Infill Development / National Centre for Sustainable Transportation, US DOT University Transportation Centre. – 2020. – 28 February. – URL: https://ncst.ucdavis.edu/research-product/assessing-transportation-impacts-using-vehicle-miles-traveled-rather-level-service (дата обращения: 06.12.2025).

31. California SB 743: Why All States Should Use Vehicle Miles Traveled (VMT) vs Level of Service / StreetLIGHT Company. – 2020. – 13 May. – URL: https://www.streetlightdata.com/sb-743-california-vehicle-miles-traveled-vmt/ (дата обращения: 04.12.2025).

32. Zorach N. M. MDOT: "Making VMT Reduction A Mobility Goal Is Punitive, Combative, And Might Hurt People's Feelings" // The Handbuilt City. – 2021. – 27 August. – URL: https://handbuiltcity.org/2021/08/27/mdot-making-vmt-reduction-a-mobility-goal-is-punitive-combative-and-might-hurt-peoples-feelings/ (дата обращения: 04.12.2025).

33. Блинкин М. Я. Качество планирования городских транспортных сетей в зеркале классических моделей теории транспортного потока // Urban Studies and

Practices. – 2015. – Пилотный выпуск. – С. 56–67. – DOI: 10.17323/usp00201556-67. – URL: https://doi.org/10.17323/usp00201556-67 (дата обращения: 04.12.2025).

34. Михайлов А. Ю., Горбунов Р. Н., Горбунова З. В. Уровень обслуживания как показатель надёжности улично-дорожной сети // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 15–25. – DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-4-15. – URL: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-4-15 (дата обращения: 07.12.2025).

35. Горбунов Р. Н., Горбунова З. В., Колчин В. С. Методика оценки качества обслуживания в рамках улично-дорожной сети на базе временного и буферного индексов : отчет о НИР / Иркутский национальный исследовательский технический университет. – Иркутск, 2019. – DOI: 10.25198/2077-7175-2019-8-80. – URL: http://intellekt-izdanie.osu.ru/arch/2019_8_80.pdf (дата обращения: 05.12.2025).

36. Litman T. Understanding Smart Growth Savings: Evaluating Economic Savings and Benefits of Compact Development. – Washington, D.C. : Victoria Transport Policy Institute, 2020. – Feb. – (Report No. 1685041). – URL: https://trid.trb.org/view/1685041 (дата обращения: 05.12.2025).

37. May A. D., Karlstrom A., Marler N. et al. Developing Sustainable Urban Land Use and Transport Strategies: A Decision Maker's Guidebook / ed. by A. D. May. – Leeds, UK : European Commission, 2005. – 52 p. – URL: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/guidebook.pdf (дата обращения: 05.12.2025).

References

1. Litman, T. (2012), *Generated Traffic and Induced Travel: Implications for Transport Planning*, Victoria Transport Policy Institute (VTPI), 18 July. Available at: https://www.vtpi.org/gentraf.pdf (Accessed 5 December 2025).

2. Lawton, K.T. (2001), "The Urban Structure and Personal Travel: an Analysis of Portland Data and Some National and International Data", *E-Vision 2000 Conference Proceedings*, RAND Corporation. Available at: https://www.rand.org/scitech/stpi/Evision/Supplement/lawton.pdf (Accessed 5 December 2025).

3. Levinson, D. and Kumar, A. (1995), "Activity, Travel, and the Allocation of Time", *Journal of the American Planning Association*, vol. 61, no. 4, pp. 458-470. Available at: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944369508975656 (Accessed 6 December 2025).

4. International Transport Forum (ITF), OECD (2022), *Urban Planning and Travel Behaviour: Summary and Conclusions*, ITF Research Reports No. 189, Paris. Available at: https://www.itf-oecd.org/urban-planning-and-travel-behaviour (Accessed 6 December 2025).

5. OECD, ECMT (2020), *Upravlenie zatorami v gorodakh* [Managing Urban Traffic Congestion], Assotsiatsiya territorial'nykh initsiativ (ATI), Moscow, Russia.

6. Transportation Research Board (TRB) (2022), *Highway Capacity Manual: a Guide for Multimodal Mobility Analysis*, 7th ed., Washington, D.C. Available at: https://www.trb.org/Publications/Blurbs/183400.aspx (Accessed 2 December 2025).

7. ODM 218.2.020-2012 (2012), *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke propusknoy sposobnosti avtomobil'nykh dorog* [Methodological recommendations for assessing the capacity of highways], FGUP "Informavtodor", Moscow, Russia.

8. Sil'yanov, V.V., Novikov, A.N., Eremin, S.V. and Shevtsova, A.G. (2024), *Teoriya transportnykh potokov v proektirovanii dorog i organizatsii dvizheniya* [Theory of traffic flows in road design and traffic management], 2nd ed., Transport, Moscow, Russia.

9. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2011), *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 6th ed., Washington, D.C.

Available at: https://highways.dot.gov/safety/pedestrian-bicyclist/safety-tools/417-policy-geometric-design-highways-and-streets-6th (Accessed 1 December 2025).

10. Donchenko, V.V. (2023), *Ustoychivye gorodskie transportnye sistemy. Izmenenie paradigmy planirovaniya i razvitiya gorodskogo transporta* [Sustainable urban transport systems. Changing the paradigm of urban transport planning and development], Agentstvo Radar, Moscow, Russia.

11. Jacobsen, P. (1997), "Liquid vs. Gas Models for Traffic", *Los Angeles Times*, 14 May, Section: Letters to the Editor. Available at: https://www.latimes.com/archives (Accessed 5 December 2025).

12. Hills, P. (1996), "What is Induced Traffic?", *Transportation*, vol. 23, no. 1, pp. 5-16. Available at: https://link.springer.com/article/10.1007/BF00165216 (Accessed 6 December 2025).

13. Downs, A. (1992), *Stuck in Traffic: Coping with Peak-Hour Traffic Congestion*, Brookings Institution Press, Lincoln Institute of Land Policy, Washington, D.C., Cambridge, Mass. Available at: https://www.brookings.edu/book/stuck-in-traffic/ (Accessed 3 December 2025).

14. Youn, H., Jeong, H. and Gastner, M.T. (2008), "The Price of Anarchy in Transportation Networks: Efficiency and Optimality Control", *Physical Review Letters*, vol. 101, no. 12, art. 128701. Available at: https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.101.128701 (Accessed 7 December 2025).

15. Cervero, R. (2006), "Freeway Deconstruction and Urban Regeneration in the United States", *International Symposium for the Cheonggyecheon Restoration*. Available at: http://www.uctc.net/papers/763.pdf (Accessed 7 December 2025).

16. Miller, J.J. (2006), "Redistribution of Traffic, Disappearing Traffic: The Challenges of Reallocation of Public Space", *Disappearing Traffic! The Challenge of Reallocating Public Space: proceedings of the conference*, Simon Fraser University. Available at: http://presentations.thecyclistwebhouse.com/VACCRedistribution_of_Traffic-Disappearing_Traffic/Index.htm (Accessed 5 December 2025).

17. European Commission (2004), *Reclaiming City Streets For People: Chaos Or Quality Of Life?*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. Available at: http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/streets_people.pdf (Accessed 6 December 2025).

18. Hansen, M., Gillen, D., Dobbins, A., Huang, Y.-M. and Puvathingal, M. (1993), *Air Quality Impacts of Urban Highway Capacity Expansion: Traffic Generation and Land Use Changes*, UCB-ITS-RR-93-5, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. Available at: www.uctc.net (Accessed 3 December 2025).

19. Louis Berger & Assoc., National Research Council (U.S.). Transportation Research Board (1998), *Guidance for Estimating the Indirect Effects of Proposed Transportation Projects*, NCHRP Report No. 403, Transportation Research Board, Washington, D.C. Available at: www.trb.org (Accessed 7 December 2025).

20. Goodwin, Ph.B. (1998), "The End of Equilibrium", in Garling, T. et al. (eds.), *Theoretical Foundations of Travel Choice Modelling*, Elsevier.

21. Litvinov, A. and Donchenko, V. (2020), "Otsenka elastichnosti transportnogo sprosa na osnove modeley vybora sposoba peredvizheniya v gorodakh" [Estimation of transport demand elasticity based on mode choice models in cities], *International Journal of Advanced Studies*, vol. 10, no. 4, pp. 40-57. DOI: 10.12731/2227-930X-2020-4-40-57.

22. Alter, C.H. (1976), "Evaluation of Public Transit Services: The Level-of-Service Concept", *Transportation Research Record*, no. 606, pp. 39-53. Available at: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1976/606/606-007.pdf (Accessed 3 December 2025).

23. City of Sacramento (n.d.), "Measuring Transportation: LOS versus VMT". Available at: https://...GPU_LOS-to-VMT-Page2(1).pdf (Accessed 3 December 2025).

24. ICF (2024), "VMT reduction planning for state transportation projects". Available at: https://www.icf.com/insights/environment/sb-743-caltrans-vmt-guide (Accessed 3 December 2025).

25. Prestrud, Ch. (2024), *VMT reduction targets and challenges*, presentation to the Washington State Transportation Commission, Washington Policy Center, 18 January.

26. Litman, T., Shebeeb, O. and Milam, R.T. (2024), "VMT as a Metric of Sustainability: Why and How to Implement Vehicle Travel Reduction Targets", *ITE Journal*, July. Available at: https://www.vtpi.org/ITEJ_VMT_as_a_Metric_July2024.pdf (Accessed 3 December 2025).

27. Santa Clara County (2020), *Santa Clara Countywide VMT Evaluation Tool: Quick Start Guide*, 22 May. Available at: https://www.vta.org/sites/default/files/2020-10/SCCVMTEvaluationTool_QuickStartGuide_2020-5-22_FINAL.pdf (Accessed 6 December 2025).

28. State Smart Transportation Initiative (2024), "Moving from LOS to VMT is more complicated than it might seem", 2 October. Available at: https://ssti.us/2024/10/02/moving-from-los-to-vmt-is-more-complicated-than-it-might-seem/ (Accessed 6 December 2025).

29. Nguyen, J. and Yuen, T. (2019), *How Measuring Vehicle Miles Traveled Can Promote Health Equity. Case Studies & Lessons Learned from Early Adopters of VMT*, ChangeLab Solutions. Available at: https://www.changelabsolutions.org/sites/default/files/2019-10/CLS-BG216-VMT_GUIDE_FINAL_v05-ACCESS_20191015.pdf (Accessed 6 December 2025).

30. National Centre for Sustainable Transportation, US DOT University Transportation Centre (2020), "Assessing Transportation Impacts Using Vehicle Miles Traveled Rather Than Level of Service Can Incentivize Infill Development", 28 February. Available at: https://ncst.ucdavis.edu/research-product/assessing-transportation-impacts-using-vehicle-miles-traveled-rather-level-service (Accessed 6 December 2025).

31. StreetLIGHT Company (2020), "California SB 743: Why All States Should Use Vehicle Miles Traveled (VMT) vs Level of Service", 13 May. Available at: https://www.streetlightdata.com/sb-743-california-vehicle-miles-traveled-vmt/ (Accessed 4 December 2025).

32. Zorach, N.M. (2021), "MDOT: 'Making VMT Reduction A Mobility Goal Is Punitive, Combative, And Might Hurt People's Feelings'", *The Handbuilt City*, 27 August. Available at: https://handbuiltcity.org/2021/08/27/mdot-making-vmt-reduction-a-mobility-goal-is-punitive-combative-and-might-hurt-peoples-feelings/ (Accessed 4 December 2025).

33. Blinkin, M.Ya. (2015), "Kachestvo planirovaniya gorodskikh transportnykh setey v zerkale klassicheskikh modeley teorii transportnogo potoka" [Quality of urban transport network planning in the mirror of classical traffic flow theory models], *Urban Studies and Practices*, pilot issue, pp. 56-67. DOI: 10.17323/usp00201556-67. Available at: https://doi.org/10.17323/usp00201556-67 (Accessed 4 December 2025).

34. Mikhaylov, A.Yu., Gorbunov, R.N. and Gorbunova, Z.V. (2018), "Uroven' obsluzhivaniya kak pokazatel' nadyozhnosti ulichno-dorozhnoy seti" [Level of service as an indicator of the reliability of the street and road network], *World of Transport and Transportation*, vol. 16, no. 4, pp. 15-25. DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-4-15. Available at: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-4-15 (Accessed 7 December 2025).

35. Gorbunov, R.N., Gorbunova, Z.V. and Kolchin, V.S. (2019), *Metodika otsenki kachestva obsluzhivaniya v ramkakh ulichno-dorozhnoy seti na baze vremennogo i bufernogo indeksov* [Methodology for assessing the quality of service within the street and road network based on time and buffer indices], research report, Irkutsk National Research Technical

University, Irkutsk, Russia. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-8-80. Available at: http://intellekt-izdanie.osu.ru/arch/2019_8_80.pdf (Accessed 5 December 2025).

36. Litman, T. (2020), *Understanding Smart Growth Savings: Evaluating Economic Savings and Benefits of Compact Development*, Report No. 1685041, Victoria Transport Policy Institute, Washington, D.C., February. Available at: https://trid.trb.org/view/1685041 (Accessed 5 December 2025).

37. May, A.D., Karlstrom, A., Marler, N. et al. (2005), *Developing Sustainable Urban Land Use and Transport Strategies: A Decision Maker's Guidebook*, ed. by A.D. May, European Commission, Leeds, UK. Available at: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/guidebook.pdf (Accessed 5 December 2025).

Donchenko V.V., Andreev S.A., Kalinina V.V.

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF FUNCTIONING OF URBAN TRANSPORT SYSTEMS

Abstract. *The article discusses the issues of assessing the performance of urban transport systems. The importance of considering public transport demand as a key factor determining the functioning of urban transport is substantiated. The results of an analysis of various studies examining the use of "service level" indicators as an indicator of the performance of the transport system and its elements are presented. It is shown that when using "service levels" to assess the congestion of road network sections, priority is given to solutions aimed at increasing the capacity of the road network, which leads to further "car-oriented" development of urban transport systems and to the generation of additional (generated) transport demand. The use of "service level" indicators for assessing the performance of public passenger transport (PPT) for various components of the quality of the provided services is considered. A methodology for calculating the integral indicator of the service level of PTT, which can be used in the development of public transport service standards, is presented. To assess the efficiency and quality of urban transport systems, it is proposed to use more accurate indicators based on the specific total mileage of vehicles and the specific passenger turnover of urban transport. A number of formulas for assessing such indicators are proposed. Their advantages and areas of application are substantiated.*

Keywords: *service level, transport demand, mobility, trip generation, total vehicle mileage, transport system efficiency, public passenger transport.*

Сведения об авторах:

Донченко Вадим Валерианович
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», Москва, Россия,
Зам. директора Центра развития общественного транспорта
к.т.н., ст. научный сотрудник,
e-mail: v.v.donchenko@yandex.ru

Андреев Сергей Александрович
Исполнительный комитет Координационного транспортного совещания государств-участников СНГ, Москва, Россия,
Заместитель председателя Исполкома КТС СНГ,
e-mail: sa_029@bk.ru

Калинина Виктория Васильевна
Министерство транспорта и дорожной инфраструктуры Московской области, Москва, Россия,
Первый заместитель министра транспорта и дорожной инфраструктуры,
e-mail: malaquita@yandex.ru

Information about the authors:

Donchenko Vadim Valerianovich
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport", Moscow, Russia
Deputy Director of the Public Transport Development Center
C.T.S., Senior Research Fellow
e-mail: v.v.donchenko@yandex.ru

Andreev Sergey Alexandrovich
Executive Committee of the Coordinating Transport Conference of the CIS Member States, Moscow, Russia,
Deputy Chairman of the Executive Committee of the CIS Coordinating Transport Conference,
e-mail: sa_029@bk.ru

Kalinina Victoria Vasilievna
Ministry of Transport and Road Infrastructure of the Moscow Region, Moscow, Russia,
First Deputy Minister of Transport and Road Infrastructure,
e-mail: malaquita@yandex.ru

УДК 656.13 : 629.07 : 656.052

Медрес Е.Е., Евтюков С.А., Васильев Я.В., Солодкий А.И.

МЕТОД ЛИЧНОСТНОГО ИНДЕКСА БИСТАБИЛЬНОСТИ ВОДИТЕЛЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИХ СТИЛЯ ВОЖДЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НАСЫЩЕННОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Аннотация. *В статье представлен новый методический аппарат определения личностного индекса бистабильности (ЛИБ) водителей, представляющий собой шестикомпонентный вектор, который позволяет многомерно и количественно оценивать деятельность водителя-оператора. Разработана математическая модель, основанная на нечеткой логике с гистерезисными функциями принадлежности, связывающая параметры ЛИБ с вероятностью отказа в подсистеме «Водитель». Показано, как ЛИБ формирует активный профиль водителя в 6-мерном фазовом пространстве, позволяя формально определять стили вождения через задание подмножеств (агрессивный, кооперативный, невнимательный, стабильный). Верификация метода проведена на экспериментальных данных, полученных от 150 водителей на типологических маршрутах Москвы и Санкт-Петербурга. Результаты подтверждают высокую описательную способность ЛИБ для классификации водителей и выявления предикторов срыва саморегуляции в условиях смешанного потока и заторов. Предложенный метод составляет основу для систем реального времени, предназначенных для мониторинга состояния оператора и реализации персонализированных управляющих воздействий в системах ADAS следующего поколения.*

Ключевые слова: *диагностика водителя, личностный индекс бистабильности (ЛИБ), стиль вождения, многомерный анализ, нечеткая логика с гистерезисом, прогнозирование срывов, фазовое пространство, ADAS.*

Введение

Эффективность систем обеспечения безопасности дорожного движения (БДД) и помощи водителю (ADAS) упирается в ограниченность инструментов оценки состояния ключевого звена системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда» (ВАДС) – человека-оператора. Существующие подходы, как правило, оперируют узким набором параметров (скорость, ускорение, направление взгляда) или субъективными психологическими шкалами, которые слабо формализуемы и не учитывают динамическую, нелинейную природу когнитивно-эмоциональных процессов. Отсутствие комплексного, количественного и операционализируемого метода описания деятельности водителя затрудняет прогнозирование критических ситуаций и разработку предиктивных систем управления.

Целью данной работы является разработка и апробация нового методологического аппарата для многомерной диагностики стиля вождения и прогнозирования когнитивных срывов. Для этого решаются следующие задачи: 1) формализация ключевых аспектов деятельности водителя в виде шестимерного вектора состояния –

Личностного индекса бистабильности (ЛИБ); 2) разработка математической модели на основе нечеткой логики с гистерезисом для оценки риска отказа; 3) демонстрация возможностей ЛИБ для классификации стилей вождения через анализ положений точек в фазовом пространстве; 4) экспериментальная верификация метода на реальных данных.

Материалы и методы

Гистерезис в транспортных потоках крупных агломераций это явление, при котором состояние потока (скорость, плотность, интенсивность) зависит не только от текущих условий, но и от предыстории системы [1,2]. Это приводит к неоднозначности характеристик потока при одинаковых внешних параметрах. Изучение гистерезиса важно для понимания фазовых переходов между свободным и заторможенным движением, а также для разработки эффективных систем управления трафиком.

В этом ключе необходимость междисциплинарных исследований, объединяющих теорию гистерезиса, психофизиологию водителя и современные методы анализа данных, которая косвенно ранее может быть прослежена по работам [3-9], позволит перейти от реактивных к предиктивным и адаптивным системам управления транспортными потоками, повысив их безопасность и эффективность в условиях роста сложности и насыщенности дорожных сетей.

На основе положений, показанных в [10-11], концепция Личностного индекса бистабильности (ЛИБ) в рамках настоящей статьи может быть описана следующим образом:

1. Вводится шестикомпонентный вектор, количественно описывающий деятельность водителя:

$$ЛИБ = (T_a, N_c, T_s, N_{co}, T_f, N_{fo})^T, \quad (1)$$

где: T_a (Время адаптации) – время, необходимое водителю для адекватной реакции на изменение дорожной обстановки; N_c (Число конфликтных действий) – количество рискованных или ошибочных действий (резкие перестроения, экстренные торможения) за единицу времени; Ts (Время стабильности) — продолжительность периода предсказуемого, плавного управления; N_{co} (Число коллективных операций) – количество кооперативных действий (уступка приоритета, поддержание дистанции, информирующие сигналы); T_f (Время смещения фокуса) – длительность отвлечения внимания от задачи управления на второстепенные объекты; N_{fo} (Число фоновых операций) – количество автоматизированных, не требующих осознанного контроля действий.

Каждая пара параметров (например, T_a–Nc) образует двумерное фазовое пространство с седловой точкой, характеризующей переход между режимами деятельности.

2. Математический аппарат оценки риска на основе нечеткой логики с гистерезисом.

Поскольку классические вероятностные методы слабо отражают качественную природу человеческого фактора и инерционность принятия решений, риск отказа $P_{отказ}$ моделируется через функцию принадлежности от ЛИБ: $P_{отказ} = \mu(ЛИБ)$, $\mu \in [0,1]$. Для каждого параметра ЛИБ вводится своя гистерезисная функция принадлежности, учитывающая не только текущее значение, но и скорость его изменения (производную), что отражает «память» системы. Функции представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Функции принадлежности параметров ЛИБ и их интерпретация

Параметр	Функция принадлежности	Интерпретация
Время адаптации T_a	$\mu_{T_a} = [1 + e^{-\beta(T_a - T_0)}]^{-1} + \mathrm{h_a} \cdot \frac{\mathrm{dT_a}}{\mathrm{dt}}$	Риск растет при увеличении времени адаптации
Число конфликтных действий N_c	$\mu_{N_c} = 1 - exp\,(-\lambda \frac{N_c}{N_{c0}}) + h_c \cdot sgn(\frac{dN_c}{dt})$	Риск растет с увеличением числа конфликтных действий
Время стабильности T_s	$\mu_{T_s} = exp\,(-\gamma \frac{T_{s0}}{T_s}) - h_s \cdot \left\lvert \frac{dT_s}{dt} \right\rvert$	Риск снижается при увеличении времени стабильности
Число коллективных операций N_{co}	$\mu_{N_{co}} = tanh\,(\alpha \frac{N_{co}}{N_{co0}}) + h_{co} \cdot \frac{dN_{co}}{dt}$	Риск снижается при увеличении кооперативных действий
Время смещения фокуса Tf	$\mu_{T_f} = \frac{1}{2}[tanh(\kappa(T_f - T_{f0})) + 1] + h_f \cdot \Delta T_f$	Риск растет при увеличении времени отвлечения внимания
Число фоновых операций N_{fo}	$\mu_{N_{fo}} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{N_{fo}}{N_{fo0}}\right)^{\delta}} - h_{fo} \cdot \frac{dN_{fo}}{dt}$	Риск снижается при увеличении фоновой активности

Примечание к Таблице 1: использованы следующие обозначения: $T_0, N_{c0}, T_{s0}, N_{co0}, T_f0, N_{fo0}$ - пороговые значения параметров; $\beta, \lambda, \gamma, \alpha, \kappa, \delta$ - коэффициенты крутизны переходов; $h_a, h_c, h_s, h_{co}, h_f, h_{fo}$ - гистерезисные коэффициенты для каждого параметра; d/dt - производная по времени (скорость изменения параметра); $\Delta T_f = T_f(t) - T_f(t - \Delta t)$ - разность значений за временной шаг.

3. Классификация стилей вождения в пространстве ЛИБ. Нормированные значения параметров ЛИБ задают точку P в 6-мерном пространстве: $P = (T_a, Nc, Ts, Nco, Tf, Nfo) \in R^6$. Стиль вождения определяется как подмножество этого пространства, например:

Агрессивный стиль: $A = \{P \mid Nc > 5, T_a < 1.5, Nco < 2\}$

Кооперативный стиль: $C = \{P \mid Nco > 4, Ts > 10, Nc < 3\}$

Невнимательный стиль: $N = \{P \mid Tf > 8, Nfo < 1\}$

Стабильный стиль: $S = \{P \mid Ts > 0.8, Nc < 0.2, Nfo > 0.6\}$

4. Экспериментальная верификация. Метод был апробирован на данных полевого эксперимента, в котором использовалась выборка из 150 водителей, данные о которых собирались на шести маршрутах Москвы (2 маршрута) и Санкт-Петербурга (4 маршрута) в течение 04.2023-04.2025 гг. Для каждого водителя на основе мультимодальной записи (видео, датчики, включая регистрацию по [12], CAN-шина) рассчитывались компоненты ЛИБ для характерных сегментов маршрута (свободный поток, пробка). Кластеризация проводилась по правилам, заданным подмножествами стилей.

Результаты

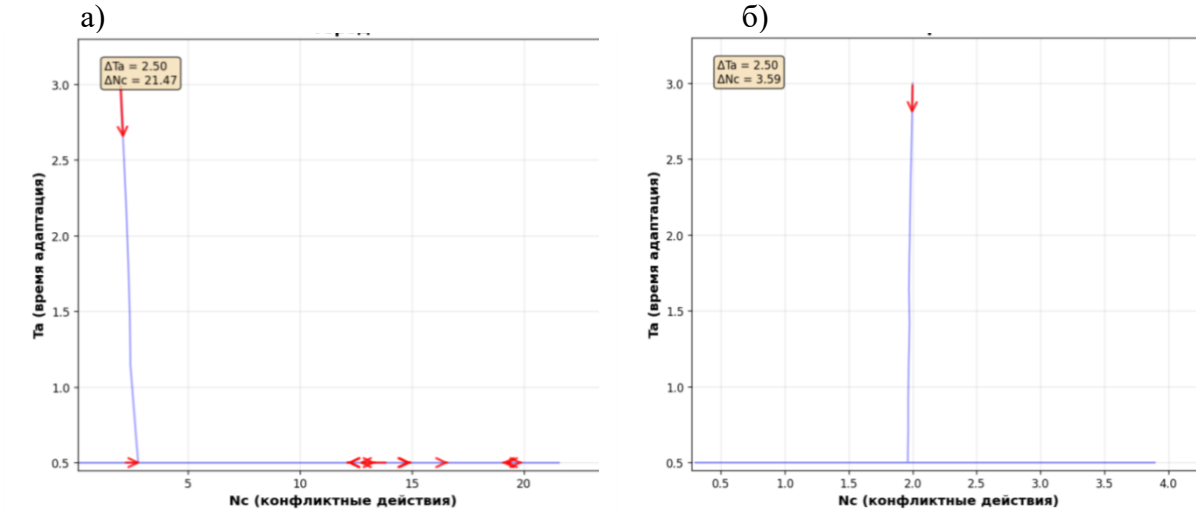
1. Расчет компонентов ЛИБ по экспериментальным данным показал четкое разделение водителей по кластерам, соответствующим стилям вождения. Таблица 2 (характеристики по стажу) косвенно подтверждает эту возможность: поведенческие паттерны у новичков (высокие Nc, низкие Ts) соответствуют зоне агрессивного / невнимательного стиля, а у экспертов (высокие Ts, Nfo) — стабильного / кооперативного. Фактические границы кластеров, выявленные по данным, близки к теоретически заданным в модели.

Таблица 2

Уровни влияния стажа с учетом психофизиологических и поведенческих характеристик водителей

Параметр / Стаж	Новичок (0-3 года)	Опытный (3-10 лет)	Эксперт (10 и более лет)
Опыт действий (критический)	Реактивный, по шаблону. Действует по инструкции, медленно распознает критические ситуации. Нуждается в подсказках.	Адаптивный, аналитический. Быстро оценивает риски, может прогнозировать развитие ситуации. Самостоятелен в принятии решений.	Проактивный, интуитивный. Предвидит критические ситуации до их возникновения. Действует на опережение. Автоматизированное расписание угроз.
Опыт действий (механический)	Сознательный контроль. Все операции требуют концентрации. Высокая когнитивная нагрузка при маневрировании.	Частичная автоматизация. Базовые навыки автоматизированы. Фокус внимания на стратегических задачах.	Полная автоматизация. Техника вождения на уровне «мышечной памяти». Низкая когнитивная нагрузка на рутинные операции.
Потребность в самоутверждении	Высокая. Стремится доказать свою компетентность. Может совершать рискованные маневры для подтверждения статуса. Чувствителен к критике.	Умеренная. Уверен в своих навыках, не нуждается в постоянном подтверждении. Адекватно воспринимает конструктивную критику.	Низкая. Полная уверенность в себе. Не зависит от внешней оценки. Спокойно признает ошибки и учится на них.
Мнение об окружающих (других участниках движения)	Настороженное, негативное. Склонен воспринимать других водителей как источник угрозы. Частые обвинения в адрес других.	Сбалансированное, реалистичное. Воспринимает других как равных участников движения. Понимает, что ошибки возможны у всех.	Эмпатичное, прощающее. Понимает мотивы и ошибки новичков. Склонен помогать другим участникам движения.
Доля страха и тревожности	Высокая. Постоянное напряжение, страх ошибки, боязнь сложных ситуаций (пробки, обгоны, парковка).	Умеренная. Страх ситуационный, возникает только в объективно опасных условиях. Быстрое восстановление после стресса.	Низкая, контролируемая. Отсутствие страха в штатных ситуациях. В критических ситуациях — мобилизация без паники.
Когнитивная карта	Фрагментарная, детализированная. Фокус на отдельных элементах дороги (знаки, разметка). Сложность с целостным восприятием ситуации.	Структурированная, гибкая. Целостное восприятие дорожной обстановки. Легко перестраивает маршрут при изменении условий.	Обобщенная, иерархическая. Восприятие дороги как системы взаимосвязей. Предвосхищение событий на основе паттернов.
Стиль принятия решений	Осторожный, медленный. Долгий анализ, склонность к перепроверкам. Частые колебания при маневрировании.	Уверенный, быстрый. Баланс между скоростью и безопасностью. Минимальные задержки при принятии решений.	Мгновенный, интуитивный. Решения принимаются на подсознательном уровне. Высокая скорость реакции без потери качества.
Эмоциональная регуляция в стрессе	Низкая. Легко впадает в панику или гнев. Долгое восстановление после стрессовых ситуаций. Широкая петля гистерезиса.	Средняя. Сохраняет относительное спокойствие. Использует осознанные стратегии саморегуляции.	Высокая. Сохраняет хладнокровие в любой ситуации. Автоматические механизмы психологической защиты.
Отношение к правилам	Буквалистское. Строгое соблюдение всех правил без учета контекста. Осуждает тех, кто их нарушает.	Гибкое, ситуативное. Правила соблюдаются, но с учетом реальной обстановки. Понимает «дух» закона.	Системное. Правила воспринимаются как часть общей системы безопасности. Готов к обоснованным нарушениям в исключительных случаях.
Типичные когнитивные искажения	Катастрофизация, Сверхобобщение, Черно-белое мышление	Излишняя уверенность, Недооценка редких рисков	Профессиональная деформация, Слепота к привычным рискам

2. Построение парных проекций фазового пространства ЛИБ выявило устойчивые паттерны. Наиболее информативной оказалась проекция T_a–Nc (см. Рисунок 1). Анализ показал наличие гистерезисных петель при переходе между режимами движения (свободный поток → затор → восстановление). Форма и площадь петли индивидуальны и служат мерой лабильности водителя. Интерпретация других пар проекций представлена в Таблице 3.



а) «город; б) «трасса»

Рис. 1. Пример гистерезисной петли на обобщенных данных по сегментации маршрутов между временем адаптации и числом конфликтных действий

Таблица 3

Интерпретация портретов парных проекций

Пара проекций	Тип петли	Интерпретация	Практическое значение
T_a-N_c	Эллиптическая	Адаптационно-конфликтная динамика	Индекс стрессоустойчивости
T_s-N_{co}	Спиральная	Кооперативно-стабильное взаимодействие	Показатель социального вождения
T_f-N_{fo}	Сложная многолепестковая	Когнитивно-операционная активность	Мера когнитивной нагрузки
T_a-T_s	Гистерезисная с перегибом	Взаимосвязь адаптации и стабильности	Индекс усталости
N_c-N_{fo}	Хаотическая	Конфликтно-фоновая динамика	Показатель отвлечения внимания

3. Классификация и динамика стилей. Применение формальных правил классификации (Таблица 4) к экспериментальным данным позволило распределить водителей по стилевым группам. Динамический анализ траекторий P(t) в течение поездки показал, что водители могут мигрировать между кластерами (например, от стабильного к агрессивному) при попадании в сложные условия (например, пробка на магистрали). Скорость и направление этой миграции являются прогностическими признаками надвигающегося срыва саморегуляции.

Таблица 4

Формальные правила при классификации

Стиль вождения	Критерии ЛИБ	Характеристики
Агрессивный	$T_a < 0,3$; $N_c > 0,7$; $T_f < 0,4$	Резкие маневры, частые конфликты
Кооперативный	$N_{co} > 0,6$; $N_c < 0,3$; $T_a > 0,7$	Плавное вождение, предсказуемость
Невнимательный	$T_f > 0,6$; $N_{fo} < 0,2$; $T_a > 0,5$	Рассеянность, медленная реакция
Стабильный	$T_s > 0.8$; $N_c < 0,2$, $N_{fo} > 0,6$	Постоянный стиль, низкий риск
Адаптивный	0,4 < все параметры < 0,6	Гибкое поведение, подстройка под условия

4. Прогностическая сила параметров. Корреляционный анализ выявил, что наиболее сильными предикторами резкого роста субъективной оценки сложности и числа критических событий являются: быстрый рост N_c на фоне снижающегося T_S; сочетание высокого T_f и низкого N_{fo}; рост T_a, сопровождающийся увеличением N_c (движение вверх по левой ветви гистерезисной петли на проекции T_a–N_c).

Обсуждение

Разработанный метод ЛИБ преодолевает ключевые ограничения существующих подходов. Во-первых, шестимерность описания позволяет уловить многогранность деятельности водителя, которую невозможно свести к 2-3 простым показателям. Во-вторых, использование нечеткой логики с гистерезисом адекватно формализует качественные, контекстно-зависимые и инерционные аспекты принятия решений человеком. В-третьих, представление стиля вождения как подмножества в метрическом пространстве переводит эту расплывчатую категорию в область строгого математического анализа.

Экспериментальные результаты подтверждают работоспособность метода. Выявление гистерезисных петель в проекциях (особенно T_a–N_c) является прямым доказательством нелинейной, бистабильной динамики системы «водитель», что согласуется с теоретическими предпосылками. Способность метода фиксировать переходы между стилями в реальной поездке открывает путь к созданию адаптивных систем, которые могут менять стратегию взаимодействия с водителем в зависимости от его текущего профиля ЛИБ.

Практическая значимость и перспективы развития метода можно обозначить следующими положениями:

- метод ЛИБ может стать основой для объективной оценки профессиональной пригодности водителей (в такси, каршеринге, грузоперевозках);
- интеграция расчета ЛИБ в реальном времени в бортовые системы ADAS позволит прогнозировать срыв не по его следствиям (закрытые глаза), а по комплексным предикторам (траектория в фазовом пространстве). Система сможет рекомендовать персональное вмешательство: для растущего N_c – активацию ассистентов, для растущего T_f – привлечение внимания;
- визуализация собственной траектории водителя в пространстве ЛИБ (его «фазовый портрет») может быть мощным инструментом обратной связи в программах повышения водительского мастерства;
- агрегированные данные ЛИБ от множества водителей на участке дороги могут служить входными параметрами для агент-ориентированных моделей, повышая адекватность прогноза возникновения заторов.

Выводы

Разработан и представлен новый методологический аппарат для диагностики деятельности водителя – Личностный индекс бистабильности (ЛИБ), представляющий собой шестикомпонентную векторную модель. Построена математическая модель оценки риска отказа на основе нечеткой логики с гистерезисными функциями принадлежности, связывающая параметры ЛИБ с вероятностью срыва саморегуляции водителя.

Показано, что пространство ЛИБ служит эффективным инструментом для формальной классификации стилей вождения (агрессивный, кооперативный, невнимательный, стабильный) через задание подмножеств.

Экспериментальная верификация метода на данных 150 водителей подтвердила его описательную и прогностическую способность, выявив гистерезисные петли в фазовых портретах и динамику миграции между стилевыми кластерами в условиях насыщенного потока. Метод ЛИБ создает строгий количественный фундамент для разработки систем предиктивного мониторинга состояния водителя и персонализированных интеллектуальных систем помощи, что является ключевым направлением повышения безопасности дорожного движения.

Список литературы

1. Laval J. A. Hysteresis in traffic flow revisited: An improved measurement method // Transportation Research Part B: Methodological. – 2011. – Vol. 45, Issue 2. – P. 385–391. – DOI: 10.1016/j.trb.2010.07.006.

2. Saifuzzaman M., Zheng Z., Haque Md. M., Washington S. Understanding the mechanism of traffic hysteresis and traffic oscillations through the change in task difficulty level // Transportation Research Part B: Methodological. – 2017. – Vol. 105. – P. 523–538. – DOI: 10.1016/j.trb.2017.09.023.

3. Доткулова А. С. Повышение безопасности дорожного движения на основе оценки поведения водителя : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10. – [Б. м.], 2022. – 154 с. – EDN VUZNVL.

4. Шашина Е. В. Разработка научно-методических основ оценки надёжности водителя автобуса в условиях возникновения конфликтных и чрезвычайных ситуаций : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10. – Москва, 2014. – 165 с. – EDN SVASHP.

5. Власов А. А. Теория транспортных потоков : монография. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 124 с.

6. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 3–46. – EDN NTKEJT.

7. Буйленко В. Я., Жанказиев С. В., Дементиенко В. В., Короткова Ю. А., Гаврилюк М. В. Психологические особенности человека при управлении автомобильным транспортом : учебное пособие. – Москва : МАДИ, 2017. – 172 с.

8. Амрахов И. Г. [и др.]. Психология воздействия на водителя внешних факторов ВАДС. – Воронеж, 2009. – 161 с.

9. Яшина М. В., Таташев А. Г., Доткулова А. С., Сусоев Н. П. Детерминированно–стомастическая модель трафика с вариацией психофизиологических свойств водителей // Синхроинфо. – 2019. – № 6. – С. 74–79.

10. Медрес Е. Е. Воздействия гистерезисных явлений на деятельность водителя в условиях насыщенных транспортных потоков // Транспортное дело России. – 2025. – № 4. – С. 247–249. – EDN OIMAQG.

11. Медрес Е. Е., Черных Н. В., Солодкий А. И. Повышение эффективности управления безопасностью дорожного движения на улично-дорожной сети агломерации // Транспортное дело России. – 2023. – № 3. – С. 172–174. – EDN NWQDNK.

12. Патент на полезную модель № 215950 U1 Российская Федерация, МПК A61B 5/024, A61B 5/0295. Инфракрасный регистратор кардиоинтервалов водителей транспортных средств / Б. С. Доброборский, Е. Е. Медрес. – № 2022117295 ; заявл. 24.06.2022 ; опубл. 11.01.2023. – EDN SGAYTC.

13. Патент № 2846797 C1 Российская Федерация, МПК B60W 30/08, G01S 13/931. Адаптивный способ предотвращения столкновений транспортных средств / Е. Е. Медрес. – № 2024135336 ; заявл. 25.11.2024 ; опубл. 15.09.2025, Бюл. № 26.

References

1. Laval, J.A. (2011), "Hysteresis in traffic flow revisited: An improved measurement method", *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, issue 2, pp. 385–391. DOI: 10.1016/j.trb.2010.07.006.

2. Saifuzzaman, M., Zheng, Z., Haque, Md.M. and Washington, S. (2017), "Understanding the mechanism of traffic hysteresis and traffic oscillations through the change in task difficulty level", *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 105, pp. 523–538. DOI: 10.1016/j.trb.2017.09.023.

3. Dotkulova, A.S. (2022), *Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove otsenki povedeniya voditelya* [Improving road safety based on driver behavior assessment], Ph.D. Thesis, Russia.

4. Shashina, E.V. (2014), *Razrabotka nauchno-metodicheskikh osnov otsenki nadyozhnosti voditelya avtobusa v usloviyakh vozniknoveniya konfliktnykh i chrezvychaynykh situatsiy* [Development of scientific and methodological foundations for assessing the reliability of a bus driver in the event of conflict and emergency situations], Ph.D. Thesis, Moscow, Russia.

5. Vlasov, A.A. (2014), *Teoriya transportnykh potokov* [Theory of traffic flows], PGUAS, Penza, Russia.

6. Shvetsov, V.I. (2003), "Matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov" [Mathematical modeling of traffic flows], *Avtomatika i telemekhanika*, no. 11, pp. 3–46.

7. Buylyenko, V.Ya., Zhankaziev, S.V., Dementienko, V.V., Korotkova, Yu.A. and Gavrilyuk, M.V. (2017), *Psikhologicheskie osobennosti cheloveka pri upravlenii avtomobil'nym transportom* [Psychological characteristics of a person when driving a vehicle], MADI, Moscow, Russia.

8. Amrakhov, I.G. et al. (2009), *Psikhologiya vozdeystviya na voditelya vneshnikh faktorov VADS* [Psychology of the impact of external factors of the driver-car-road-environment system on the driver], Voronezh, Russia.

9. Yashina, M.V., Tatashev, A.G., Dotkulova, A.S. and Susoev, N.P. (2019), "Determinirovanno–stokhasticheskaya model' trafika s variatsiey psikhofiziologicheskikh svoystv voditeley" [Deterministic-stochastic traffic model with variation of drivers' psychophysiological properties], *Sinkhroinfo*, no. 6, pp. 74–79.

10. Medres, E.E. (2025), "Vozdeystviya gisterezisnykh yavleniy na deyatel'nost' voditelya v usloviyakh nasyshchennykh transportnykh potokov" [Influence of hysteresis phenomena on driver activity in saturated traffic flows], *Transportnoe delo Rossii*, no. 4, pp. 247–249.

11. Medres, E.E., Chernykh, N.V. and Solodkiy, A.I. (2023), "Povyshenie effektivnosti upravleniya bezopasnost'yu dorozhnogo dvizheniya na ulichno-dorozhnoy seti aglomeratsii" [Improving the efficiency of road safety management on the road network of an agglomeration], *Transportnoe delo Rossii*, no. 3, pp. 172–174.

12. Dobroborskiy, B.S. and Medres, E.E. (2023), *Infrakrasnyy registrator kardiointervalov voditeley transportnykh sredstv* [Infrared recorder of cardiointervals of

vehicle drivers], Utility Patent No. 215950 U1, Russian Federation, Appl. No. 2022117295, filed 24.06.2022, publ. 11.01.2023.

13. Medres, E.E. (2025), *Adaptivnyy sposob predotvrashcheniya stolknoveniy transportnykh sredstv* [Adaptive method for preventing vehicle collisions], Patent No. 2846797 C1, Russian Federation, Appl. No. 2024135336, filed 25.11.2024, publ. 15.09.2025.

Medres E.E., Evtyukov S.A., Vasiliev Y.V., Solodky A.I.

THE METHOD OF THE PERSONAL INDEX OF DRIVERS' BISTABILITY FOR DIAGNOSING THEIR DRIVING STYLE AND PREDICTING BEHAVIOR IN CONDITIONS OF SATURATED TRAFFIC FLOW

Abstract. *The article presents a new methodological apparatus for determining the personal bistability index (LIB) of drivers, which is a six-component vector that allows multidimensional and quantitative assessment of the activity of the driver-operator. A mathematical model based on fuzzy logic with hysteresis membership functions has been developed that relates the LIB parameters to the probability of failure in the «Driver» subsystem. It is shown how the LIB forms an active driver profile in a 6-dimensional phase space, allowing it to formally define driving styles through the assignment of subsets (aggressive, cooperative, inattentive, stable). The method was verified based on experimental data obtained from 150 drivers on typological routes in Moscow and St. Petersburg. The results confirm the high descriptive ability of the LIB to classify drivers and identify predictors of disruptive self-regulation in conditions of mixed traffic and congestion. The proposed method forms the basis for real-time systems designed to monitor the operator's condition and implement personalized control actions in next-generation ADAS systems.*

Keywords: *driver diagnostics, personal bistability index (LIB), driving style, multidimensional analysis, fuzzy logic with hysteresis, prediction of disruptions, phase space, ADAS.*

Информация об авторах:

Медрес Екатерина Евгеньевна
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес: 190005, Россия, г.Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Кандидат экономических наук, доцент кафедры ТСиДМС
E-mail: fire_21@mail.ru

Евтюков Сергей Аркадьевич
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес: 190005, Россия, г.Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Доктор технических наук, профессор кафедры НТТМ
E-mail: s.a.evt@mail.ru

Васильев Ярослав Владимирович
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес: 190005, Россия, г.Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Доктор технических наук, доцент кафедры НТТМ
E-mail: xen2k@rambler.ru

Солодкий Александр Иванович
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес: 190005, Россия, г.Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Доктор экономических наук, профессор кафедры ТСиДМС
E-mail: asolodkiy@mail.ru

Information about the authors:

Medres Ekaterina Evgenevna
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.
Candidate of Economical Sciences, Associate Professor of the Department of TS&DMS
E-mail: fire_21@mail.ru

Evtyukov Sergey Arkadevich
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of NTTM
E-mail: s.a.evt@mail.ru

Vasiliev Yaroslav Vladimirovich
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of NTTM
E-mail: xen2k@rambler.ru

Solodky Alexander Ivanovich
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.
Doctor of Economical Sciences, Professor of the Department of TS&DMS
E-mail: asolodkiy@mail.ru

УДК 656.11

Семенов Ю.Н., Семенова О.С.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВОДИТЕЛЕМ ДОРОЖНОЙ ОБСТАНОВКИ

Аннотация. *Статья посвящена формализации когнитивного процесса оценки дорожной обстановки водителем транспортного средства. В качестве основного инструмента исследования используется системный подход совокупности элементов «Водитель – Автомобиль – Дорога – Среда – другие Участники движения». Подробно рассматривается функционал каждой из пяти подсистем ВАДСУ, при этом особое внимание уделяется ключевой роли водителя как центрального звена, синтезирующего информацию и принимающего решения. В исследовании представлена модель непрерывного оценивания дорожно-транспортной ситуации водителем, которая формализована как параллельный процесс визуального, акустического и кинестетического анализа. Предложена ментальная модель, позволяющая водителю сформировать целостное и адекватное восприятие окружающей среды. В работе сделан вывод, что безопасность является результатом динамического равновесия всех компонентов системы ВАДСУ, нарушение в работе любой подсистемы дестабилизирует систему и создаёт риск ДТП.*

Ключевые слова*: водитель, оценка дорожной обстановки, ВАДСУ.*

Постановка задачи

Эффективность и безопасность управления транспортным средством (ТС) в решающей степени зависят от способности водителя адекватно оценивать дорожную обстановку и прогнозировать развитие стандартных и нестандартных ситуаций. Недооценка рисков, ошибки в распознавании опасных факторов, запаздывание в принятии решений являются ключевыми причинами подавляющего большинства дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

Разработанные за рубежом системы активной безопасности (ADAS) оказывают водителю информационную и техническую поддержку, однако их возможности ограничены, так как они не учитывают полный комплекс субъективных психофизиологических факторов, влияющих на процесс оценки дорожной ситуации конкретным человеком [1]. В связи с этим, создание формализованной модели, описывающей процесс оценки дорожной обстановки водителем, представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой позволит перейти к созданию персонализированных систем помощи водителям и новых методов подготовки к осуществлению водительской деятельности.

Существующее противоречие между сложностью, динамичностью и неопределенностью дорожной обстановки как объекта оценки и ограниченными психофизиологическими возможностями водителя-оператора по ее восприятию и анализу проявляется в отсутствии единой теоретической модели, которая бы системно описывала, как водитель преобразует поток внешней сенсорной информации в оперативные решения по управлению автомобилем.

Анализ последних исследований

Анализ современных научных работ, посвященных оценке водителем дорожной обстановки, позволяет выделить несколько ключевых направлений, развивающихся в рамках междисциплинарного подхода, объединяющего психологию, физиологию, эргономику, теорию управления и информационные технологии.

Исторически первыми возникли поведенческие модели, которые устанавливали взаимосвязи между наблюдаемой водителем обстановкой (скорость транспортного потока, его плотность) и выходными действиями (торможение ТС, ускорение), не учитывая того, как водитель принимает решение. Это был «черный ящик», который не раскрывал внутренних механизмов обработки информации водителем.

В настоящее время доминирующей парадигмой является когнитивно-ситуативный подход, рассматривающий водителя как активного участника, непрерывно оценивающего дорожную ситуацию и прогнозирующего её развитие [2]. При этом процесс взаимодействия водителя с дорожной обстановкой делится на три ключевых этапа: восприятие – оценка/прогноз – решение/действие. Современные исследования направлены на углубленное изучение каждого этапа, в частности, на то, как ограничения внимания и рабочей памяти влияют на восприятие.

Развитием когнитивно-ситуативного подхода является теория множественных ресурсов Кристофера Викенса, в которой показано, что конкуренция за ресурсы внимания между основными задачами управления транспортным средством (маневрирование, торможение) и второстепенными (работа с навигационным и телекоммуникационным оборудованием) является основной причиной ошибок оценки дорожной ситуации [3]. Исследования с использованием методов нейровизуализации (электроэнцефалография, функциональная магнитно-резонансная томография) подтверждают, что процесс оценки дорожной обстановки задействует сложную сеть мозговых структур, включающую префронтальную кору для осуществления принятия решений, теменную долю для работы с пространственной ориентацией и зрительную кору. Усталость, стресс и эмоциональное состояние (гнев, тревожность) изменяют активность этих зон [4].

Изучение влияния возраста, стажа вождения, личностных черт и особенностей восприятия водителей выявило разные стратегии оценки дорожной обстановки. Ключевое различие заключается в распределении внимания – для неопытных водителей характерна туннельная фокусировка, их внимание приковано к ограниченной центральной зоне, водители с большим стажем применяют прогностическое сканирование, то есть систематически обводят взглядом периферию, что позволяет им заранее выявлять потенциальные опасности [5-6].

С развитием вычислительных мощностей активно развивается направление создания формальных моделей оценки дорожной обстановки. Байесовские модели получили широкое распространение для описания того, как водитель обновляет свои представления о намерениях других участников движения (например, пешехода или водителя другого автомобиля) на основе поступающей информации [7].

Модели на основе нечёткой логики дают возможность работать с нечёткими, качественными понятиями, которыми оперирует водитель («высокая скорость», «опасная дистанция», «слишком резкий манёвр») [8].

С появлением ADAS возникло новое направление исследований – взаимодействие «человек-автоматизированная система». Исследования в этом направлении показывают, что длительное использование автоматизации приводит к потере ситуационной осведомленности (так называемый «выход из контура»), что затрудняет быструю и точную оценку обстановки при необходимости немедленного перехода к ручному

управлению [9].

Основная цель современных разработок – создать интерфейсы, которые не отвлекают, а поддерживают и улучшают процесс оценки водителем окружающей обстановки. Ключевыми задачами таких систем является проактивная визуализация потенциальных угроз на проекционном дисплее и использование тактильной обратной связи для привлечения внимания к критическим объектам [10].

Проведенный анализ свидетельствует о значительном прогрессе в понимании процессов оценки дорожной обстановки водителем. Однако в современных исследованиях присутствуют проблемы фрагментарности, чрезмерного использования усредненных данных и невысокой точности прогнозов. Ключевой нерешенной задачей является отсутствие целостной динамической модели, которая бы в реальном времени объединяла данные о состоянии всех подсистем ВАДСУ («Водитель – Автомобиль – Дорога – Среда – другие Участники движения») с актуальным психофизиологическим портретом водителя, объясняя механизм синтеза информации, полученной из нескольких каналов, в управляющее решение.

Цель работы

Целью работы является разработка описательной модели функционирования системы ВАДСУ как целостной динамической системы, определяющей безопасность дорожного движения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести системный анализ существующих научных подходов к процессу оценки дорожной обстановки водителем ТС;
- раскрыть сущность и взаимосвязь компонентов системы ВАДСУ, их функциональную роль в обеспечении безопасности движения;
- обосновать ключевую роль водителя как центрального элемента системы;
- детализировать непрерывный циклический процесс восприятия и оценки дорожной обстановки водителем;
- описать механизм синтеза разрозненной информации в целостную ментальную модель ситуации, на основе которой происходит принятие решений и выполнение управляющих действий.

Объектом исследования является процесс управления автомобилем в условиях реальной дорожно-транспортной обстановки, предметом исследования – совокупность закономерностей, связей и факторов, определяющих механизм оценки и прогнозирования дорожной обстановки водителем.

Основная часть

Система ВАДСУ предполагает тесное и постоянное взаимодействие пяти компонентов (подсистем) – водителя, автомобиля, дороги, среды и других участников движения [11]. Несмотря на важность каждой подсистемы для безопасности дорожного движения, наиболее весомым компонентом является подсистема «Водитель». Водитель-оператор управляет средством повышенной опасности – автомобилем, оценивает дорожные условия и выбирает адекватный режим движения в соответствии с погодными условиями, выявляет наличие или отсутствие других участников движения и способ взаимодействия с ними. Водитель воспринимает зрительную, звуковую и кинестетическую (тактильную) информацию от всех компонентов системы, на основе которой формирует целостную ментальную модель дорожной обстановки. Эта модель позволяет ему оценивать уровень опасности, прогнозировать развитие событий и принимать решения о выборе траектории, скорости движения и необходимости совершения маневров.

Функционал подсистемы «Автомобиль» состоит в преобразовании команд водителя в безопасное движение транспортного средства по дорожной сети. Он реализуется через работу двигателя, который преобразует тепловую энергию в механическую; трансмиссии, передающей крутящий момент на ведущие колеса; шасси и подвески, обеспечивающих устойчивость и управляемость; тормозной системы, отвечающей за эффективное замедление; рулевого управления, задающего траекторию движения автомобиля. Большую роль в подсистеме «Автомобиль» играют системы активной и пассивной безопасности, которые помогают предотвращать ДТП или снижать тяжесть их последствий, а также системы освещения и сигнализации, обеспечивающие видимость дороги и объектов на ней и позиционирующие ТС в транспортном потоке.

Подсистема «Дорога» выполняет опорную, направляющую и информационную функции. Она предоставляет физическую основу для движения, обеспечивая сцепление шин с дорожным покрытием, и определяет пространственные границы через свои геометрические параметры – ширину, радиусы поворотов и уклоны. С помощью разметки и ограждений дорога упорядочивает движение транспортных потоков, а с помощью знаков, светофоров и информационных табло – регламентирует поведение участников, сообщая им необходимую информацию о правилах и условиях движения на данном участке.

Подсистема «Среда» охватывает совокупность внешних условий, в которых функционирует вся система ВАДСУ, и оказывает комплексное влияние на все остальные компоненты. Ее ключевой функционал определяется инфраструктурой (здания, сооружения, путепроводы и т.д.) и метеоусловиями (дождь, снег, туман, температура), которые непосредственно воздействуют на сцепные качества дороги, видимость, обзорность, техническое состояние автомобиля и опосредованно – на психофизиологические характеристики водителя. Таким образом, составляющие подсистемы «Среда» задают внешний контекст, который может как способствовать безопасному движению, так и создавать дополнительные риски.

Подсистема «другие Участники движения» находится в постоянном взаимодействии с водителем транспортного средства. Составляющие подсистемы – водители, управляющие другими ТС, пешеходы, велосипедисты, мотоциклисты – выступают потенциальными источниками риска, поскольку их поведение, уровень навыков и психофизиологическое состояние могут варьироваться в широких пределах и не всегда могут быть предсказуемыми.

О безопасности системы можно говорить тогда, когда все подсистемы находятся в состоянии динамического равновесия. Например, при переходе подсистемы «Среда» в состояние «гололедица», водитель должен адаптировать свой стиль вождения, подсистема «Автомобиль» с помощью системы ADAS исправить ошибки водителя, а подсистема «Дорога» (используя, например, противогололедную обработку) – улучшить сцепление шин автомобиля с дорожным покрытием. Сбой в работе любой из подсистем (ошибка водителя, отказ техники, скользкое покрытие, неадекватное действие другого участника дорожного движения) нарушит баланс всей системы и создаст риск возникновения аварийной ситуации. Таким образом, результатом слаженного взаимодействия всех компонентов системы будет являться безопасное дорожное движение, а результатом неслаженного – ДТП. Рассмотрим непрерывный циклический процесс оценки водителем дорожной обстановки (рисунок 1). Водитель одновременно воспринимает и обрабатывает информацию, поступающую от подсистем ВАДСУ, а затем синхронизирует ее для принятия решения. Процесс начинается с начального узла «Начало движения», который запускает главное действие «Оценка дорожной обстановки». Затем единый поток выполнения делится на три параллельных потока,

отражающих способность водителя к многоканальному восприятию информации, поступающей от подсистем ВАДСУ.

Первый поток – это «Визуальный анализ». В его рамках водитель визуально анализирует состояние подсистем «Дорога», «Среда», «Другие участники движения» и «Автомобиль». Для этого он последовательно (часто почти мгновенно) выполняет h_1 базовых действий $v_i, i = \overline{1, h_1}$: v_1 – оценивает погодные условия, v_2 – анализирует пространство спереди, сзади и сбоку автомобиля на предмет наличия препятствий; v_3 – идентифицирует и оценивает действия других участников движения; v_4 – анализирует знаки, дорожную разметку и сигналы светофора, v_5 – контролирует состояние важных узлов и систем ТС по указателям, сигнальным лампам и индикаторам неисправностей.

Второй параллельный поток – «Акустический анализ» – работает в фоновом режиме. В его рамках водитель непрерывно воспринимает и обрабатывает звуковую информацию от подсистем ВАДСУ: a_1 – анализирует звук работы двигателя, трансмиссии и ходовой части, a_2 – идентифицирует звуковые предупредительные сигналы внутри салона автомобиля; a_3 – воспринимает и распознает звуковые сигналы от других участников движения; a_4 – анализирует характер шума шин, зависящий от состояния дорожного покрытия. Этот поток работает в постоянной синхронизации с первым потоком, обеспечивая многоканальное и надежное восприятие обстановки, особенно в условиях ограниченной видимости и обзорности.

Третий параллельный поток – «Кинестетический анализ». В его рамках водитель воспринимает и интерпретирует физические воздействия и обратную связь через органы осязания и вестибулярный аппарат: k_1 – анализирует усилие на рулевом колесе, его вибрации и обратную связь; k_2 – воспринимает крен и продольные/поперечные ускорения кузова; k_3 – ощущает реакцию педалей при торможении и ускорении; k_4 – распознает вибрации кузова при движении ТС по дорожному покрытию.

После того как каждый из этих трех параллельных процессов завершает свой текущий цикл сбора информации, потоки управления достигают узла, синхронизирующего воспринятую информацию, требуя завершения каждого из них, прежде чем общий процесс сможет продолжиться.

Процесс синхронизации информации из трех параллельных потоков восприятия в единую ментальную модель можно представить в виде

$$M(t) = S(V(t), A(t), K(t) \mid H, E), \quad (1)$$

где S – функция синтеза, которая объединяет и согласовывает разнородные данные в единую картину, описывающую дорожную ситуацию;

$V(t)$ – вектор визуальной информации в момент времени *t*, компонентами которого являются результаты действий $v_1 \dots v_{h_1}$;

$A(t)$ – вектор акустической информации в момент времени *t*, компонентами которого являются результаты действий $a_1 \dots a_{h_2}$;

$K(t)$ – вектор тактильной (кинестетической) информации в момент времени *t*, компонентами которого являются результаты действий $k_1 \dots k_{h_3}$;

h_1, h_2, h_3 – количество выполняемых водителем действий в рамках визуального, акустического и кинестетического анализа;

$\mid H, E$ – условие, учитывающее человеческий фактор H и контекстные условия среды E.

Функция синтеза S работает по принципу многоуровневого объединения информации, получаемой из различных каналов, причем приоритет отдается сигналам, указывающим на потенциальную опасность. Если хотя бы один из каналов фиксирует сигнал, классифицируемый как критическая угроза, этот сигнал получает абсолютный приоритет.

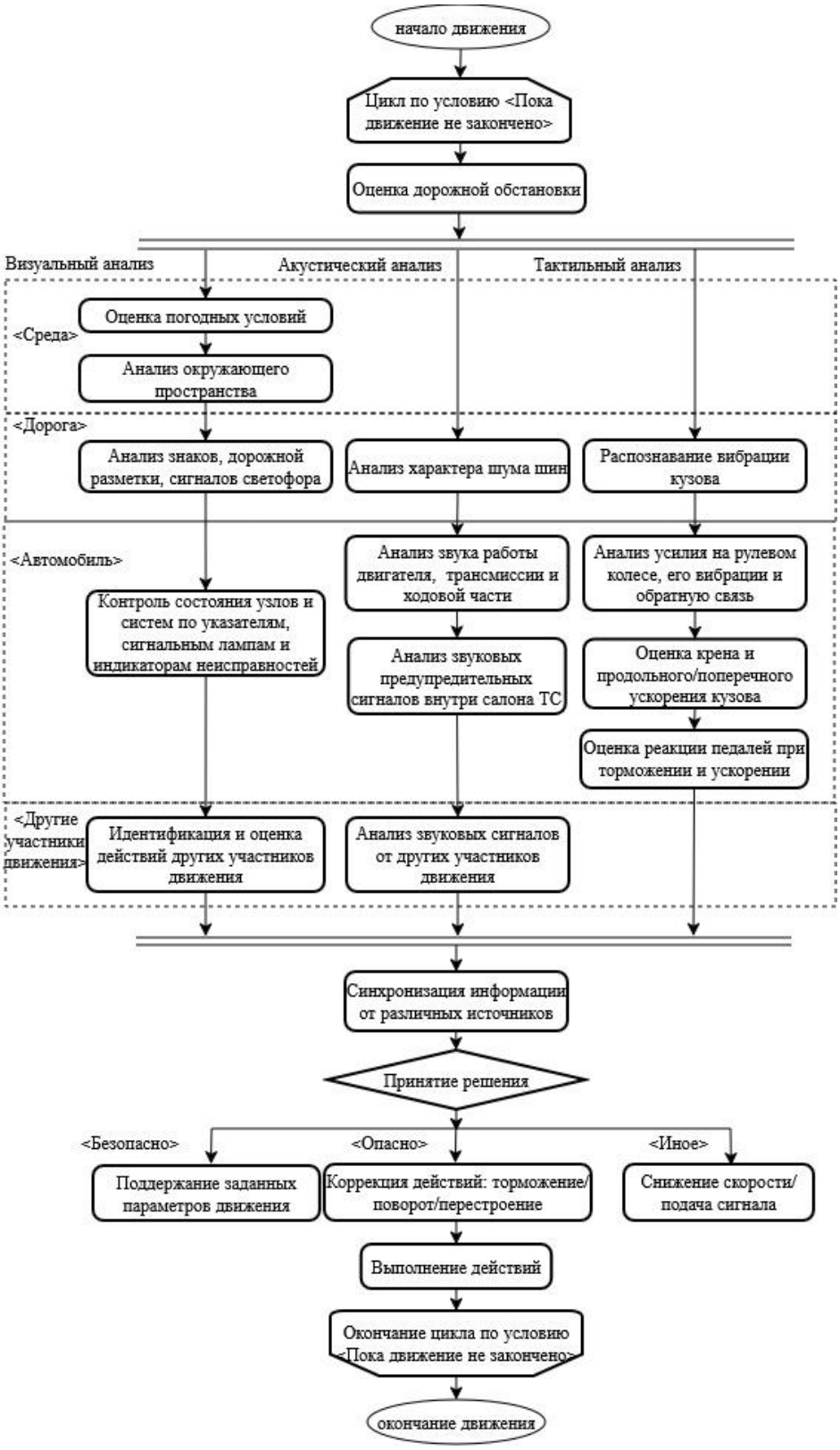


Рис. 1. Модель оценки водителем дорожной обстановки

При этом функция S временно подавляет обработку менее значимой информации из других каналов и осуществляет построение модели $M(t)$ на основе именно этого угрожающего сигнала. Остальные каналы переходят в режим подтверждения угрозы.

Если ни один из каналов не фиксирует сигнал, классифицируемый как критическая угроза, то функция синтеза S переходит в режим фонового сканирования. Информация, поступающая по разным каналам, сопоставляется и взаимно дополняет друг друга, формируя целостную картину.

Человеческий фактор H включает такие параметры, как возраст, стаж вождения, психофизиологические особенности, уровень усталости, эмоциональное состояние индивидуальный опыт, навыки и т.д. Эти параметры модифицируют процесс, влияя на скорость обработки информации и на доверие к каналам. Например, с возрастом водители медленнее реагируют на внешние раздражители, что приводит к ошибкам в управлении автомобилем.

Контекстные условия среды E охватывают такие параметры, как погодные условия (дождь, снег, ветер, туман), освещённость участка дороги, его сложность и т.д. Плохие погодные условия приводят к снижению надежности визуального канала, заставляя отдавать предпочтение акустическому и кинестетическому.

На основе анализа ментальной модели водитель переходит к этапу «Принятие решения», в котором осуществляется логическое ветвление. Если анализ полученной информации показал, что ситуация безопасна, водитель выбирает действие «Поддержание заданных параметров движения».

Если была выявлена потенциальная или реальная опасность, например, замедление движущегося впереди ТС, выбирается стратегия «Корректировка действий», которая включает такие меры, как торможение, поворот или перестроение на другую полосу движения. В случае неопределенности, когда обстановка не до конца ясна, принимается решение о превентивных мерах, таких как «Снижение скорости» или «Подача сигнала» для привлечения внимания других участников движения.

В блоке «Выполнение действий» физическое намерение водителя реализуется через воздействие на органы управления автомобилем – педаль управления подачей топлива, педаль управления тормозным механизмом и/или рулевое колесо. После этого процесс не заканчивается, а возвращается к начальному действию «Оценка дорожной обстановки», образуя непрерывный цикл, который длится до момента прибытия в конечный пункт, обозначенный конечным узлом «Окончание движения». Таким образом, управление автомобилем – это непрерывный, многопоточный процесс сбора и анализа информации о состоянии подсистем ВАДСУ, принятия решений и их выполнения водителем ТС.

Выводы

Разработанная описательная модель оценки водителем дорожной обстановки в виде блок-схемы наглядно демонстрирует, что процесс управления транспортным средством является не линейно-последовательным, а сложным, циклическим и многозадачным. Ключевым выводом работы является подтверждение того, что компетентное вождение основывается на эффективном параллельном выполнении визуального, акустического и кинестетического анализа. Непрерывный сбор информации и ее последующая синхронизация в единую ментальную модель позволяют водителю сформировать целостное и адекватное ситуации восприятие окружающей среды.

Практическая ценность модели заключается в том, что она формализует и детализирует компоненты профессионального водительского мастерства. Эта структура может служить четким каркасом для разработки современных систем обучения, позволяя целенаправленно развивать у будущих водителей навыки распределения внимания и своевременного переключения между параллельными задачами. Кроме того, понимание данных процессов имеет критическое значение для проектирования более

эффективных и эргономичных систем помощи водителю.

Для верификации предложенной модели рекомендуется эмпирический подход с использованием современных методов мониторинга. План включает проведение экспериментов в условиях транспортного симулятора, где поведение водителей будет отслеживаться с помощью айтрекинга (для анализа визуального сканирования), аудио- и сенсорных датчиков (для акустического и кинестетического каналов). Это позволит проверить логику синтеза S на реальных сценариях (например, измеряя время реакции на возникновение опасности при разных уровнях H и E). Дополнительно можно применить опросы и нейровизуализацию для оценки ментальной модели. Такие тесты помогут уточнить модель и адаптировать ее для реальных ADAS-систем.

Список литературы

1. Володарец Н. В., Маренич А. С., Ткачёв С. А. Комплексный анализ современных интеллектуальных систем поддержки принятия решений для транспортных средств // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 4. – С. 22–42.

2. Зубова Я. В. Анализ зарубежного опыта обучения вождению и формирования водительских компетенций // Современная зарубежная психология. – 2023. – Т. 12, № 1. – С. 7–15.

3. Wickens C. D. Multiple resources and performance prediction // Theoretical Issues in Ergonomics Science. – 2002. – Vol. 3, No. 2. – P. 159–177.

4. Тарумов Д. А. [и др.]. Аналитический обзор специальных методов нейровизуализации в психиатрической практике // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. – 2018. – Т. 12, № 2. – С. 104–113.

5. Павлова В. А. Влияние возраста, стажа и психофизического состояния водителей на безопасность дорожного движения // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство : сборник статей. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 242–247.

6. Шурухина К. В., Порхачева С. М. Психофизиологические особенности водителей и их влияние на безопасность дорожного движения // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – С. 403–408.

7. Богданович С. В. Методология системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сборник научных статей. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2024. – С. 65–80.

8. Козырев С. В., Кузин А. А. Анализ применимости моделей на базе нечеткой логики в транспортном секторе // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 26–34.

9. Knoop V. L. et al. Platoon of SAE level-2 automated vehicles on public roads: Setup, traffic interactions, and stability // Transportation Research Record. – 2019. – Vol. 2673, No. 9. – P. 311–322.

10. Mourtzis D., Angelopoulos J., Panopoulos N. The future of the human–machine interface (HMI) in society 5.0 // Future Internet. – 2023. – Vol. 15, No. 5. – P. 162.

11. Семенов Ю. Н., Семенова О. С. Моделирование системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда-другие Участники движения» (ВАДСУ) // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 15–20.

References

1. Volodarets, N.V., Marenich, A.S. and Tkachev, S.A. (2025), "Kompleksnyy analiz sovremennykh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy dlya transportnykh sredstv" [Comprehensive analysis of modern intelligent decision support systems for vehicles], *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, no. 4, pp. 22–42.

2. Zubova, Ya.V. (2023), "Analiz zarubezhnogo opyta obucheniya vozhdeniyu i formirovaniya voditel'skikh kompetentsiy" [Analysis of foreign experience in driving training and driver competence formation], *Sovremennaya zarubezhnaya psikhologiya*, vol. 12, no. 1, pp. 7–15.

3. Wickens, C.D. (2002), "Multiple resources and performance prediction", *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 3, no. 2, pp. 159–177.

4. Tarumov, D.A. et al. (2018), "Analiticheskiy obzor spetsial'nykh metodov neyrovizualizatsii v psikhiatricheskoy praktike" [Analytical review of special neuroimaging methods in psychiatric practice], *Journal of New Medical Technologies. Electronic edition*, vol. 12, no. 2, pp. 104–113.

5. Pavlova, V.A. (2019), "Vliyanie vozrasta, stazha i psikhofizicheskogo sostoyaniya voditeley na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya" [Influence of age, experience and psychophysical condition of drivers on road safety], *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction], Samara State Technical University, Samara, Russia, pp. 242–247.

6. Shurukhina, K.V. and Porkhacheva, S.M. (2021), "Psikhofiziologicheskie osobennosti voditeley i ikh vliyanie na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya" [Psychophysiological characteristics of drivers and their impact on road safety], *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo* [Education. Transport. Innovations. Construction], Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia, pp. 403–408.

7. Bogdanovich, S.V. (2024), "Metodologiya sistemnogo analiza obratnykh svyazey i dolgosrochnykh effektov v upravlenii bezopasnost'yu dorozhnoy infrastruktury" [Methodology of system analysis of feedbacks and long-term effects in road infrastructure safety management], *Transport i transportnye sistemy: konstruirovanie, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technologies], Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, pp. 65–80.

8. Kozyrev, S.V. and Kuzin, A.A. (2024), "Analiz primenimosti modeley na baze nechetkoy logiki v transportnom sektore" [Analysis of the applicability of fuzzy logic-based models in the transport sector], *DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov*, vol. 14, no. 1, pp. 26–34.

9. Knoop, V.L. et al. (2019), "Platoon of SAE level-2 automated vehicles on public roads: Setup, traffic interactions, and stability", *Transportation Research Record*, vol. 2673, no. 9, pp. 311–322.

10. Mourtzis, D., Angelopoulos, J. and Panopoulos, N. (2023), "The future of the human–machine interface (HMI) in society 5.0", *Future Internet*, vol. 15, no. 5, p. 162.

11. Semenov, Yu.N. and Semenova, O.S. (2009), "Modelirovanie sistemy 'Voditel'-Avtomobil'-Doroga-Sreda-drugie Uchastniki dvizheniya' (VADSU)" [Modeling the system 'Driver-Car-Road-Environment-other Road Users' (DCREU)], *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, no. 2, pp. 15–20.

Semenov Yu.N., Semenova O.S.

A MODEL FOR ASSESSING THE ROAD CONDITION BY A DRIVER

Abstract. *Enhancing road safety requires a deep understanding of how drivers cognitively assess dynamic traffic situations. This study aims to formalize this process by*

developing a novel descriptive model based on the systemic "Driver–Car–Road–Environment–Participants" (VADSU) approach. The core contribution is a dynamic, cyclic model that represents the driver's continuous assessment as a parallel processing of visual, acoustic, and kinesthetic information channels. The model details the synthesis of these multisensory data streams into a unified mental representation of the situation via a formalized integration function S (V,A,K | H,E), where H and E account for human factors and environmental context. The proposed framework highlights the driver's central role as an integrator and decision-maker within the VADSU system. It is concluded that traffic safety is an emergent property of this system's dynamic equilibrium. The model provides a structured theoretical basis for improving driver training methodologies and designing ergonomic interfaces for advanced driver-assistance systems (ADAS).

Keywords: *driver model; road situation assessment; cognitive process; VADSU system; mental model; multisensory integration; driver assistance systems.*

Сведения об авторах:

Семенов Юрий Николаевич
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово, Россия,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: syun.ap@kuzstu.ru

Семенова Ольга Сергеевна
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово, Россия,
заведующий кафедрой информатики и информационных систем,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: sos.ap@kuzstu.ru

Information about the Authors

Semenov Yury Nikolaevich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev”, Kemerovo, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: syun.ap@kuzstu.ru

Semenova Olga Sergeevna
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev”, Kemerovo, Russia,
Head of the Department of Computer Science and Information Systems,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: sos.ap@kuzstu.ru

УДК 656

Сорокина Д.Н.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ГОРОДСКОМ ОБЩЕСТВЕННОМ ТРАНСПОРТЕ В ГОРОДЕ РОСТОВЕ-НА-ДОНУ

Аннотация. *Основной темой статьи является проведение анализа качества обслуживания на городском общественном транспорте в городе Ростове-на-Дону, основанного на результатах анкетного опроса пассажиров. В результате проведения исследования можно сделать вывод, что в приоритете выявляется скорость передвижения и минимальное время нахождения в пути. В городе требуется обновление парка подвижного состава. Следует уделять внимание ответственности водителя при выполнении своих профессиональных обязанностей. Устранение или минимизация отрицательных факторов позволит значительно повысить качество городской среды и качество жизни людей в городе.*

Ключевые слова*: общественный транспорт, качество обслуживания, анкетирование.*

Постановка задачи

Задача данного исследования состоит в проведении анализа качества обслуживания на городском общественном транспорте в городе Ростове-на-Дону, основанного на результатах анкетного опроса пассажиров.

Анализ последних исследований

Одним из показателей уровня жизни населения в мегаполисе является удовлетворенность транспортной инфраструктурой. Мобильность населения определяет экономическое и социальное развитие города. Уровень автомобилизации в крупных городах с каждым годом увеличивается, что приводит к увеличению интенсивности движения, длительным заторам на дорогах, ухудшению экологической ситуации, возникновению сложности с поиском парковочного места. Общественный транспорт снижает автомобильную нагрузку на дорожную инфраструктуру.

Ростов-на-Дону является одним из крупнейших городов на юге России. Качество перевозок на общественном транспорте находится на низком уровне на протяжении длительного времени и привлекает внимание исследователей. Изучаются регулярность перевозок, переполненность салона в час пик, качество дорожного полотна [1, 2].

Особенностью мегаполиса является его выраженный исторический центр, где сосредоточены основные объекты торговли, сервиса, культуры, спорта, бизнес-центры, учебные заведения и прочие места приложения труда, а жилые районы удалены от центра и друг от друга на дальние расстояния. В результате территориального расположения время в пути из одной точки в другую может достигать 60 минут.

За последние пять лет в Ростове-на-Дону значительно вырос приток населения из соседних регионов. Идет активное строительство новых микрорайонов. Транспортную инфраструктуру и общественный транспорт не успевают модернизировать в соответствии с новыми требованиями города и потребностями людей [3, 4]. Наблюдается недостаточное количество транспортных средств на маршрутах, их высокая степень

изношенности, неудовлетворительное состояние остановочных комплексов, несоответствие требованиям доступной среды.

Следует отметить, что с 2020 года в городе на проблемных участках дорожной сети введены полосы для общественного транспорта и произведена замена части устаревших транспортных средств. Но эти мероприятия не решают всего комплекса проблем. Транспортные компании города сосредоточены на экономической выгоде транспортных услуг, при этом вопрос обеспечения безопасности и комфорта пассажиров отходит на второй план. А повышать привлекательность общественного транспорта в Ростове-на-Дону необходимо, так как город «задыхается» от количества личного транспорта.

Вопрос качества общественных пассажирских перевозок является актуальным в различных странах мира. Так, в европейских странах стремятся привлекать жителей к пользованию общественным транспортом за счет ограничения парковочных мест. Для увеличения спроса ведется непрерывный мониторинг качества работы общественного транспорта при участии государственных органов управления. Контролируется доступность тарифов, комфортабельность салона и наличие бесплатного Wi-Fi. Уделяется внимание удобству кресел, чистоте салона, климат-контролю, а также регулярности рейсов. Выполнение этих условий помогает жителям отдавать предпочтение общественному транспорту взамен личному [5].

При планировании перемещения на общественном транспорте человек имеет определенные ожидания: минимальные затраты времени и комфортная поездка. Но зачастую ожидания не соответствуют реальности. При этом пассажир ощущает чувство неудовлетворенности и разочарования [6]. Зарубежными исследователями установлено, что владельцы личного транспорта предпочитают нести денежные и временные затраты, но при этом находиться в комфорте, чем ехать по выделенной полосе в переполненном автобусе и испытывать чувство собственной несостоятельности. Личное транспортное средство рассматривается не просто как средство передвижения, а как инструмент, дающий ощущение свободы и самоуважения [7].

Обеспечение пассажирам достойного уровня комфорта и оптимальной скорости передвижения способствует повышению их интереса к общественным перевозкам. Помимо безопасности и удобства в поездке, пассажир должен иметь возможность воспользоваться бесплатной сетью Wi-Fi для решения личных и рабочих вопросов во время длительной поездки [8].

Отечественные исследователи также привлекают внимание к качеству транспортного обслуживания. Рассматривается спрос на общественный транспорт в зависимости от места проживания и половозрастных характеристик населения [9]. Изучается влияние транспортной инфраструктуры на обеспечение комфортного и безопасного передвижения пассажиров [10, 11]. Проводится анализ рациональной стоимости проезда [12].

Цель работы

Целью исследования является выявление факторов, влияющих на качество оказания услуг в общественном транспорте, и установление первостепенных, которые в большей степени вызывают дискомфорт у пассажиров.

Основная часть

Согласно реестру муниципальных маршрутов регулярных перевозок, опубликованного на сайте официального портала городской Думы и Администрации города Ростова-на-Дону [13] на ноябрь 2025 года парк наземного пассажирского транспорта составляет 98 маршрутов, из них: 5 трамвайных (34 трамваев), 7 троллейбусных (51 единиц подвижного состава), 82 автобусных маршрута с количеством

подвижного состава 835 единиц, что составляет 90% от общего количества транспортных средств.

Трамвайные маршруты отсутствуют на территории Ворошиловского, Октябрьского, Первомайского и Советского районов города. Существующие линии проходят в районе Центрального рынка и района Сельмаш. Троллейбусные маршруты обеспечивает МУП «Ростовская транспортная компания» (РТК). Однако обслуживание осуществляется на нерегулярной основе, маршруты могут отменяться или быть законсервированными. Количество троллейбусных и трамвайных маршрутов не обеспечивает транспортной мобильности населения.

Автобусные маршруты обслуживают 15 предприятий. Парк транспортных средств имеет широкий модельный ряд, что представлено на рисунке 1 (фото автора). На некоторых маршрутах с 2023 года частично произведена замена устаревших транспортных средств на новые автобусы «КАМАЗ».



Рис. 1. Модели автобусов г. Ростова-на-Дону

С 2024 года на трех городских маршрутах курсируют электробусы КАМАЗ-6282, что показано на рисунке 2 (фото автора).

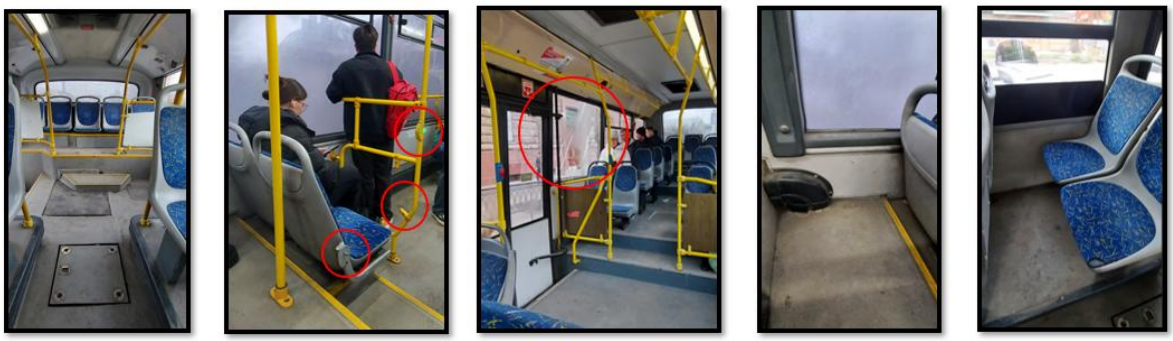


Рис. 2. Электробус КАМАЗ-6282

Ввиду своей новизны автобусы «КАМАЗ» и электробусы соответствуют требованиям перевозки пассажиров. Но их количество существенно мало для крупного мегаполиса. Нормативный срок эксплуатации преобладающего количества транспортных средств составляет 10 лет и более.

Согласно регламентирующим документам, перед выходом на рейс общественный транспорт должен проходить технический осмотр — проверяются тормоза, свет, двери,

системы безопасности. Однако в реальных условиях транспортное средство может быть с неработающей дверью, неработающими механизмами открывания окон, сломанными поручнями [14, 15]. В большинстве случаев это обусловлено большим сроком эксплуатации. Следует отметить, что в новых транспортных средствах также наблюдаются поломки в салоне. На рисунке 3 представлены фото случайно выбранных салонов автобусов (фото автора). В частности, на рисунке 3 «б» видны открытые детали сломанного поручня и перила сидения. При поездке пассажиры цепляются сумками, одеждой и ногами за данные механизмы, что приводит к травмам и повреждению личного имущества. На рисунке 3 «в» показано разбитое стекло в оконном проеме, что несет угрозу здоровью и жизни пассажиров.



а б в г д

а, б) маршрут № 49; в) маршрут № 43; г) маршрут № 78; д) маршрут № 22
Рис. 3. Салоны автобусов

Не проводится уборка и дезинфекция салонов согласно СП 2.5.3650-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры» и МР 3.5/2.5.0226-20 по санитарно-противоэпидемическим мероприятиям при перевозках пассажиров общественным автомобильным и городским наземным электрическим транспортом. Следует отметить, что жители стали более внимательно относиться к чистоте общественного транспорта. Это является следствием периода пандемии 2020 года.

Практически в каждом автобусе не настроено информационное табло и отсутствует голосовое оповещение остановочных комплексов. Это вызывает трудности у пассажиров, не знающих маршрут.

Нарушается право горожан дышать чистым воздухом. Водитель автобуса, курящий в салоне, нарушает Федеральный закон от 23.02.2013 №15-ФЗ (редакция от 28.12.2024) «Об охране здоровья граждан от воздействия окружающего табачного дыма и последствий потребления табака». Согласно ему – курение в любом виде общественного транспорта запрещено.

Повсеместны случаи отвлечения водителя на телефонные разговоры или просмотр видео во время движения, а также неаккуратное и агрессивное вождение. Это создает опасные ситуации для пассажиров и приводит к дорожно-транспортным происшествиям. Случается, что водитель не останавливается на остановочном комплексе или останавливается, не доезжая или проезжая его. На остановочных комплексах зачастую наблюдается простаивание автобусов.

Отдельное внимание необходимо уделить системам кондиционирования. Согласно климатическим условиям в городе Ростове-на-Дону в течение нескольких месяцев наблюдается жаркая погода. Наличие работающего кондиционера в автобусе является необходимостью. Температура в салоне в летний период может превышать 50°С. При

этом люди теряют сознание, фиксируются случаи инфарктов и инсультов. В целях экономии топлива водители отказываются включать кондиционер, либо система находится в нерабочем состоянии. Перевозчики не следят за чисткой и дезинфекцией климатической системы. В фильтрах скапливаются и размножаются вредные бактерии, аллергены и грибки. При включении кондиционера микроорганизмы распространяются по воздуху, что подвергает опасности здоровье пассажиров [16, 17]. На рисунке 4 представлены системы кондиционирования случайно выбранных салонов автобусов, на которых видна пыль и грязь (фото автора). Такую картину можно наблюдать практически во всех транспортных средствах, оснащенных системой кондиционирования.



а б в г

а) маршрут № 7; б) маршрут № 49; в) маршрут № 99; г) маршрут № 22
Рис. 4. Система кондиционирования

Хочется отметить несоответствие многих общественных транспортных средств требованиям доступной среды, что подтверждается фото на рисунке 5 (фото автора). В автобусе отсутствует аппарель, что является препятствием для поездки человеку на инвалидном кресле.



а б

Рис. 5. Автобус №43 без аппарели

В Ростове-на-Дону жалобы на городской общественный транспорт можно направлять в Департамент транспорта города следующими способами:

- позвонить в Колл-центр городского центра управления пассажирскими перевозками, который примет жалобу и передаст в департамент транспорта,
- оставить письменную жалобу в интернет-приёмной администрации;
- сообщить о проблеме через сервис «Благоустройство»;
- записаться на приём к директору департамента транспорта.

Данные формы подачи жалоб не являются удобными для потребителей транспортной услуги. Во-первых, в жалобе необходимо указать регистрационный номер автобуса, ФИО водителя, время поездки. По разным причинам пассажир может не иметь этих сведений. Во-вторых, завершив поездку и выйдя из транспортного средства, человек переключается на другие дела и старается скорее забыть об испытанном дискомфорте. Таким образом, недовольство пассажира остается при нем.

Более настойчивые пассажиры пытаются влиять на ситуацию и используют один из вариантов подачи жалобы. Звонок в Колл-центр городского центра управления пассажирскими перевозками не является результативным: на дозвон требуется потратить большое количество времени, в работе колл-центра случаются сбои. Подача письменной жалобы в интернет-приёмную администрации занимает время на написание жалобы. Для ее отправки необходима авторизация на сайте Госуслуги. Время ожидания ответа на жалобу занимает до 30 дней. Сообщение о проблеме через сервис «Благоустройство» также занимает время на написание жалобы, авторизацию на сайте Госуслуги и требует длительное время ожидания ответа. Личное обращение к директору департамента транспорта практически нереально для обычного жителя.

В результате ежедневно проблемы накапливаются и вопрос комфортной поездки в общественном транспорте остается актуальным. На недовольство пассажиров водители, как правило, не реагируют.

Помимо непосредственной поездки, существует проблема ожидания транспорта на остановочных комплексах, которые не соответствуют жаркому климату региона. На рисунке 6 показаны остановки в различных частях города (фото автора).



а б в

а) ост. «Болгарстрой» на ул. Таганрогской; б) ост. «Центральная городская больница» на пр. Ворошиловский; в) ост. «Центральный рынок» на пр. Буденновский

Рис. 6. Остановка общественного транспорта в г. Ростове-на-Дону

Остановки выполнены из стекла. В летний период находиться в них невозможно, так как есть риск получить тепловой удар. Время ожидания общественного транспорта может достигать до 20-30 минут. На прилегающей к остановочному комплексу территории отсутствуют зеленые насаждения, которые могли бы давать тень, улучшать экологическую ситуацию. Внутри узкие железные лавочки, которые в летний период нагреваются, а зимой холодные. Площадь остановочного комплекса небольшая, во время дождя вмещает 10-12 человек. В ситуации присутствия женщины с детской коляской или человека на инвалидном кресле места под крышей практически не остается. Люди вынуждены ожидать общественный транспорт за пределами остановки. Можно выявить

еще ряд сопутствующих недостатков: отсутствует название остановочного комплекса, перечень маршрутов, отсутствует освещение и оснащение современными технологиями.

Следует обратить внимание на то, что остановочные комплексы города Ростова-на-Дону не соответствуют требованиям СП 59.13330.2020 «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения». На рисунке 6 «б» на остановке «Центральная городская больница» можно наблюдать тактильную плитку, которая также имеется на некоторых остановочных комплексах в центральной части города. Преобладающая часть остановок не отвечает запросам маломобильных граждан города.

Вопрос доступной среды в Ростове-на-Дону является актуальным. За последние три года в мегаполисе значительно возросло количество людей с инвалидностью, в частности с отсутствием одной или двух нижних конечностей. Данные категории граждан пользуются костылями или инвалидными креслами. Не оборудованные остановочные комплексы и общественные транспортные средства значительно снижают качество жизни и мешают полноценной адаптации к окружающей городской среде.

Суммируя перечисленные факты, можно сделать вывод, что поездка на общественном транспорте вызывает негативное восприятие, чувство разочарования, моральную и физическую усталость. Это снижает привлекательность города, оказывает неблагоприятное воздействие на психологическое и физическое здоровье жителей. Поэтому одной из основных задач политики администрации города должно являться повышение качества услуг пассажирского транспорта с учетом всех категорий граждан.

На сегодняшний день не существует универсальной системы оценки удовлетворенности населения, также как и рекомендаций по ее внедрению. В литературных источниках можно найти разные виды исследований, посвященных оценке качества услуг общественного транспорта [18]. Приоритетной является экспертная оценка ввиду того, что многие показатели качества транспортной услуги невозможно оценить количественно [19]. Основными параметрами выделяют комфорт, безопасность и эффективность [20].

Для выявления факторов, влияющих на качество оказания услуг в общественном транспорте и установление первостепенных, которые в большей степени вызывают дискомфорт у пассажиров, был проведен опрос среди студентов и преподавателей Донского государственного технического университета, пользующихся общественным транспортом в будние дни и совершающих поездки на длительные расстояния (более 10 остановок). Возраст анкетируемых 20-60 лет. Количество опрашиваемых составляет 200 человек. Разделения по половому признаку не осуществлялось.

Участникам опроса в электронном виде предоставлялся опросной лист, который заполнялся лично каждым анкетируемым. Респонденты заполняли анкеты в удобное для них время и в комфортной обстановке. Это позволило предоставить открытые и обдуманные ответы. Анкетный метод позволяет легко обрабатывать полученные данные с использованием современных статистических методов, есть возможность охватить большое количество респондентов одновременно. Единая структура и форма анкет упрощает их обработку и анализ.

Предварительно был задан вопрос: «Удовлетворяет ли Вас качество обслуживания в городском пассажирском транспорте в г. Ростове-на-Дону?». Варианты ответов: «Да», «Нет», «Мне все равно». График ответов на вопрос представлен на рисунке 7.

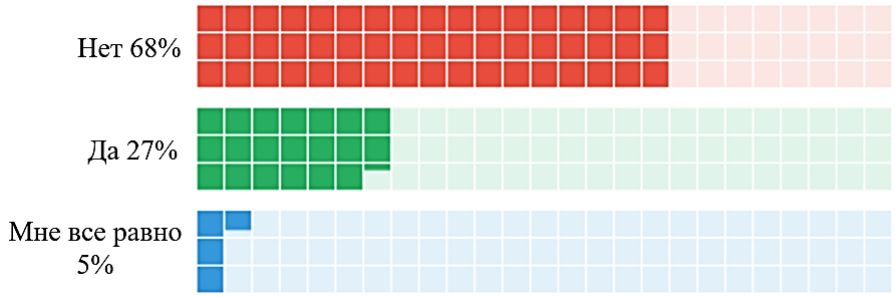


Рис. 7. График ответов на вопрос «Удовлетворяет ли Вас качество обслуживания в городском пассажирском транспорте в г. Ростове-на-Дону?»

Большая часть опрашиваемых не удовлетворены качеством обслуживания в городском пассажирском транспорте.

Далее респондентам было предложено оценить факторы, влияющие на качество обслуживания в общественном транспорте и выявить первостепенные, которые в большей степени вызывают дискомфорт у пассажиров. Это проводилось с целью выявления проблем, устранение которых является приоритетными. Для реализации исследования использовался метод априорного ранжирования. На основании практических данных составлен список факторов, влияющих на исследуемый параметр. Суть метода в том, что фактору, которому приписывается ведущая роль, отводится первое место, остальные располагаются в порядке убывания степени их влияния на выбранный параметр [21].

Выбраны следующие факторы:

X_1 – Низкая скорость движения транспортного средства

X_2 – Чистота салона

X_3 – Наличие неисправностей транспортного средства (двери, окна, сидения, поручни)

X_4 – Наличие кондиционера в летний период

X_5 – Стиль вождения водителя

X_6 – Поведение водителя (курение, разговор по телефону, грубость)

X_7 – Информационное обеспечение в транспорте

X_8 – Простаивание на остановках

Заполняя анкету, опрашиваемый определял место факторов в ранжированном ряду. Результаты опроса представлены в виде матрицы рангов и обработаны, что показано на рисунке 8.

Определив значения Δi для каждого из факторов, оценивается степень согласованности мнений опрошенных специалистов. Для этого используют коэффициент конкордации Кендалла (W), который вычисляется по формуле:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3-k)}, \quad (1)$$

где S – сумма квадратов отклонений,

m - число участников опроса,

k - число факторов.

Исследователи	Ранги по факторам							
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
1	1	7	2	4	5	6	8	3
2	1	7	3	5	4	6	8	2
3	4	7	5	2	3	6	1	8
4	3	8	1	6	4	5	7	2
5	3	7	5	6	4	8	1	2
6	1	8	3	6	4	5	7	2
7	2	7	3	4	5	6	8	1
8	2	7	6	4	5	3	8	1
…	…	…	…	...	…	…	…	…
199	1	7	3	4	5	6	8	2
200	2	3	8	7	2	4	6	5
Сумма рангов $\sum_{j=1}^{m} a_{ij}$	366	1342	744	872	849	1162	1402	464
Отклонение Δ_i суммы рангов от средней суммы рангов	-534	441	-156	-28	-51	261	501	-436
Квадраты отклонений Δ_i^2	285156	194481	24336	784	2601	68121	251001	190096

Рис. 8. Матрица рангов

Установлено, что коэффициент, показывающий согласованность мнений анкетируемых, составляет W = 0,61. Значимость коэффициента конкордации Кендалла установлена с помощью критерия Пирсона. Можно сделать вывод, что мнения респондентов согласованы. По результатам исследования была построена диаграмма рангов, что показано на рисунке 9.

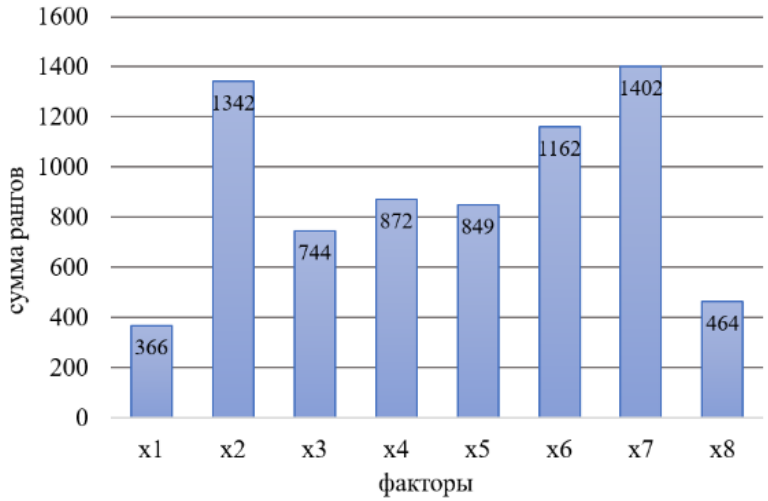


Рис. 9. Диаграмма рангов

По диаграмме рангов можно сделать вывод, что на качество обслуживания в общественном транспорте в первую очередь влияют скорость движения транспортного средства и простаивание на остановках. Данные факторы значительно увеличивают время нахождения пассажиров в пути, что вызывает наибольшие негативные эмоции. Следующими значимыми факторами, вызывающими дискомфорт у пассажиров, установлены наличие неисправностей транспортного средства и агрессивный стиль вождения. Это влияет на безопасность пассажиров в поездке. На пятом месте выявлен фактор наличия кондиционера в транспортном средстве в летний период, что влияет на здоровье и самочувствие пассажиров. Малозначимыми факторами опрашиваемые называют поведение водителя, чистоту салона и наличие информационного

обеспечения. Объясняется это тем, что люди готовы не обращать внимания на данные факторы, а наименование остановок возможно посмотреть с помощью сети интернет в смартфоне.

Также респондентам был задан вопрос «Комфортно ли ожидание общественного транспорта на остановочных комплексах?». Варианты ответов: «Да», «Нет», «Мне все равно». График ответов на вопрос представлен на рисунке 10, на котором видно преобладание негативных ответов.

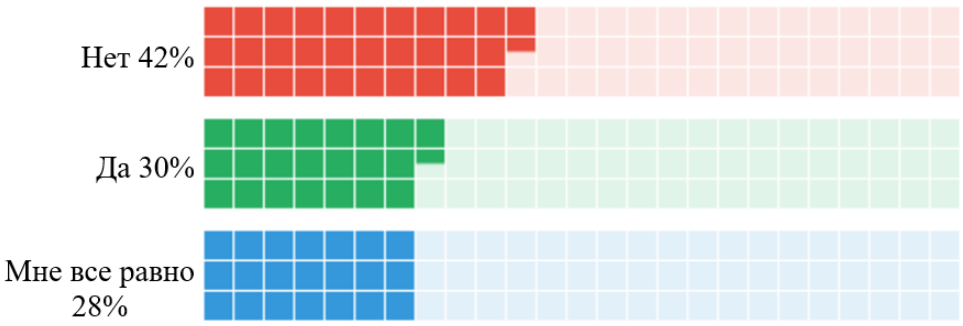


Рис. 10. График ответов на вопрос «Комфортно ли ожидание общественного транспорта на остановочных комплексах в г. Ростове-на-Дону?»

Большая часть опрашиваемых не удовлетворены остановочными комплексами, почти треть опрашиваемых предпочитает не замечать окружающей обстановки.

Выводы

В результате проведения исследования можно сделать вывод о том, что жители города Ростова-на-Дону привыкли к трудностям передвижения на общественном транспорте, отсутствию комфорта при ожидании транспортных средств и неудобствах при поездке. Это подтверждает факт того, что часть анкетируемых предпочитают не обращать внимание на неудобства. При более детальном опросе в приоритете выявляется скорость передвижения, минимальное время нахождения в пути. Это обусловлено как экономией своего времени, так и желанием быстрее покинуть транспортное средство.

Переосмысление значимости общественного транспорта должно найти отражение в концепциях развития транспортной системы города.

В городе Ростове-на-Дону требуется обновление парка подвижного состава. При невозможности закупки новых транспортных средств, необходимо уделять внимание качественному ремонту и обслуживанию находящихся в эксплуатации автобусов. Для поддержания чистоты салона проводить регулярные уборки и мойки. В периоды вирусных инфекций данные меры позволят снижать порог заболеваемости.

Следует уделять внимание ответственности водителя при выполнении своих профессиональных обязанностей. Необходимо повышать престиж профессии водителя.

Рекомендуется обновление или приведение в порядок с учетом требований доступной среды существующих остановочных комплексов. Учитывая климат региона, необходимо внедрение зеленых насаждений рядом с остановками. Это будет способствовать улучшению экологической ситуации в мегаполисе, повышать привлекательность города.

Устранение или минимизация отрицательных факторов, влияющих на качество обслуживания на городском общественном транспорте в городе Ростове-на-Дону, позволит значительно повысить качество городской среды и качество жизни людей в городе.

Список литературы

1. Денисова М. И., Гальченко Г. А. Анализ организации остановок городского общественного транспорта в урбанизированной среде на примере автобуса № 61 г. Ростова-на-Дону // Наука и образование: отечественный и зарубежный опыт. – 2020. – С. 232–235.

2. Скрементова А. А., Шаповалов В. С., Ласкова Т. С. Автотранспортная инфраструктура города Ростова-на-Дону: современное состояние, проблемы и перспективы развития // Управление организациями в современной экономике: теория и технологии. – 2018. – С. 344–352.

3. Зекунова П. А. Комфортная городская среда: система общественного транспорта в оценках жителей Ростова-на-Дону // Caucasian Science Bridge. – 2023. – Т. 6, № 2 (20). – С. 78–82. – DOI: 10.18522/2658-5820.2023.2.8.

4. Ласкова Т. С., Шаповалов В. С., Скрементова А. А. Автотранспортная инфраструктура г. Ростова-на-Дону: современное состояние, проблемы и перспективы развития // Журнал «У». Экономика. Управление. Финансы. – 2018. – № 4. – С. 21–39.

5. Роша Х. [и др.]. Использование общественного транспорта и оценка качества обслуживания в крупном мегаполисе: на примере Порту // Устойчивое развитие. – 2023. – Т. 15, № 7. – С. 6287. – DOI: 10.3390/su15076287.

6. Деб С., Ахмед М. А. Определение качества обслуживания городских автобусных маршрутов на основе восприятия и ожиданий пользователей // Поведение в сфере путешествий и общество. – 2018. – Т. 12. – С. 1–10. – DOI: 10.1016/j.tbs.2018.02.008.

7. Бейран Г., Кабрал Ж. С. Анализ сегментации рынка с учетом отношения к транспорту: изучение различий между мужчинами и женщинами // Отчеты о транспортных исследованиях. – 2008. – Т. 2067, № 1. – С. 56–64. – DOI: 10.3141/2067-07.

8. де Онья Х., Эстевес Э., де Онья Р. Как пользователи личных автомобилей оценивают качество услуг общественного транспорта в крупных мегаполисах? Европейское сравнение // Транспортная политика. – 2021. – Т. 112. – С. 173–188. – DOI: 10.1016/j.tranpol.2021.08.005.

9. Арустамов Э. А., Волкова И. Н., Крылов П. М. Проблемы транспортной обеспеченности и качества транспортного обслуживания городских населенных пунктов России различной численности // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 6. – С. 6. – DOI: 10.15862/07ECVN620.

10. Коновалова Т. В. [и др.]. Анализ показателей повышения социальной значимости городского пассажирского транспорта в городе Краснодаре // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 2. – С. 30–38.

11. Айриев Р. С., Кудряшов М. А. Показатели качества транспортного обслуживания населения // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 140–149. – DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-4-11.

12. Терентьев А. С. [и др.]. Метод экономической оценки качества обслуживания населения пассажирским транспортом // Транспортное дело России. – 2019. – № 5. – С. 111–113.

13. Реестр муниципальных маршрутов регулярных перевозок [Электронный ресурс] // Официальный портал городской Думы и Администрации города Ростова-на-Дону. – URL: https://rostov-gorod.ru/administration/structure/departments/dtg/other/reestr-munitsipalnykh-marshrutov/reestrms.htm (дата обращения: 05.12.2025).

14. Приказ Минтранса России от 15.01.2014 № 7 «Об утверждении Правил обеспечения безопасности перевозок пассажиров и грузов автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом и Перечня мероприятий по

подготовке работников юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих перевозки автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом, к безопасной работе и транспортных средств к безопасной эксплуатации».

15. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» : утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 877.

16. СП 2.5.3650-20. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры : санитарные правила.

17. МР 3.5/2.5.0226-20. Методические рекомендации по санитарно-противоэпидемическим мероприятиям при перевозках пассажиров общественным автомобильным и городским наземным электрическим транспортом.

18. Редман Л. [и др.]. Качественные характеристики общественного транспорта, привлекающие пользователей личных автомобилей: обзор исследований // Транспортная политика. – 2013. – Т. 25. – С. 119–127. – DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.11.005.

19. Цой М. Е., Щеколдин В. Ю., Долгих И. В. Исследование факторов, влияющих на удовлетворенность потребителей качеством услуг городского общественного транспорта // Российское предпринимательство. – 2017. – Т. 18, № 21. – С. 3237–3260.

20. Чекмарева Г. [и др.]. Экспертные методы оценки качества транспортных услуг // Transportation Research Procedia. – 2023. – Т. 68. – С. 98–108. – DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.012.

21. Бакуменко Л. П. Методика априорного ранжирования факторов качества жизни населения // Статистика и экономика. – 2011. – № 1. – С. 142–149.

References

1. Denisova, M.I. and Galchenko, G.A. (2020), "Analiz organizatsii ostanovok gorodskogo obshchestvennogo transporta v urbanizirovannoy srede na primere avtobusa № 61 g. Rostova-na-Donu" [Analysis of the organization of urban public transport stops in an urbanized environment on the example of bus No. 61 in Rostov-on-Don], *Nauka i obrazovanie: otechestvennyy i zarubezhnyy opyt*, pp. 232–235.

2. Skrementova, A.A., Shapovalov, V.S. and Laskova, T.S. (2018), "Avtotransportnaya infrastruktura goroda Rostova-na-Donu: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya" [Road transport infrastructure of the city of Rostov-on-Don: current state, problems and development prospects], *Upravlenie organizatsiyami v sovremennoy ekonomike: teoriya i tekhnologii*, pp. 344–352.

3. Zekunova, P.A. (2023), "Komfortnaya gorodskaya sreda: sistema obshchestvennogo transporta v otsenkakh zhiteley Rostova-na-Donu" [Comfortable urban environment: public transport system in the assessments of Rostov-on-Don residents], *Caucasian Science Bridge*, vol. 6, no. 2 (20), pp. 78–82. DOI: 10.18522/2658-5820.2023.2.8.

4. Laskova, T.S., Shapovalov, V.S. and Skrementova, A.A. (2018), "Avtotransportnaya infrastruktura g. Rostova-na-Donu: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya" [Road transport infrastructure of Rostov-on-Don: current state, problems and development prospects], *Zhurnal "U". Ekonomika. Upravlenie. Finansy*, no. 4, pp. 21–39.

5. Rocha, H. et al. (2023), "Ispol'zovanie obshchestvennogo transporta i otsenka kachestva obsluzhivaniya v krupnom megapolise: na primere Portu" [Public transport use and service quality assessment in a large metropolis: the case of Porto], *Ustoychivoe razvitie*, vol. 15, no. 7, p. 6287. DOI: 10.3390/su15076287.

6. Deb, S. and Ahmed, M.A. (2018), "Opredelenie kachestva obsluzhivaniya gorodskikh avtobusnykh marshrutov na osnove vospriyatiya i ozhidaniy pol'zovateley" [Determining the quality of service of urban bus routes based on user perceptions and

expectations], *Povedenie v sfere puteshestviy i obshchestvo*, vol. 12, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.tbs.2018.02.008.

7. Beiran, G. and Cabral, J.S. (2008), "Analiz segmentatsii rynka s uchetom otnosheniya k transportu: izuchenie razlichiy mezhdu muzhchinami i zhenshchinami" [Market segmentation analysis considering attitudes towards transport: a study of differences between men and women], *Otchety o transportnykh issledovaniyakh*, vol. 2067, no. 1, pp. 56–64. DOI: 10.3141/2067-07.

8. de Ona, J., Esteves, E. and de Ona, R. (2021), "Kak pol'zovateli lichnykh avtomobiley otsenivayut kachestvo uslug obshchestvennogo transporta v krupnykh megapolisakh? Evropeyskoe sravnenie" [How do private car users evaluate the quality of public transport services in large cities? A European comparison], *Transportnaya politika*, vol. 112, pp. 173–188. DOI: 10.1016/j.tranpol.2021.08.005.

9. Arustamov, E.A., Volkova, I.N. and Krylov, P.M. (2020), "Problemy transportnoy obespechennosti i kachestva transportnogo obsluzhivaniya gorodskikh naselennykh punktov Rossii razlichnoy chislennosti" [Problems of transport provision and quality of transport services in urban settlements of Russia of various sizes], *Vestnik evraziyskoy nauki*, vol. 12, no. 6, p. 6. DOI: 10.15862/07ECVN620.

10. Konovalova, T.V. et al. (2025), "Analiz pokazateley povysheniya sotsial'noy znachimosti gorodskogo passazhirskogo transporta v gorode Krasnodare" [Analysis of indicators of increasing the social significance of urban passenger transport in the city of Krasnodar], *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, no. 2, pp. 30–38.

11. Ayriev, R.S. and Kudryashov, M.A. (2018), "Pokazateli kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya" [Indicators of the quality of transport services for the population], *World of Transport and Transportation*, vol. 16, no. 4, pp. 140–149. DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-4-11.

12. Terentyev, A.S. et al. (2019), "Metod ekonomicheskoy otsenki kachestva obsluzhivaniya naseleniya passazhirskim transportom" [Method of economic assessment of the quality of public transport services for the population], *Transportnoe delo Rossii*, no. 5, pp. 111–113.

13. Official portal of the City Duma and Administration of Rostov-on-Don (2025), "Reestr munitsipal'nykh marshrutov regulyarnykh perevozok" [Register of municipal regular transport routes]. Available at: https://rostov-gorod.ru/administration/structure/departments/dtg/other/reestr-munitsipalnykh-marshrutov/reestrms.htm (Accessed 5 December 2025).

14. Ministry of Transport of the Russian Federation (2014), *Ob utverzhdenii Pravil obespecheniya bezopasnosti perevozok passazhirov i gruzov avtomobil'nym transportom i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom i Perechnya meropriyatiy po podgotovke rabotnikov yuridicheskikh lits i individual'nykh predprinimateley, osushchestvlyayushchikh perevozki avtomobil'nym transportom i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom, k bezopasnoy rabote i transportnykh sredstv k bezopasnoy ekspluatatsii* [On approval of the Rules for ensuring the safety of passenger and cargo transportation by road and urban surface electric transport and the List of measures to prepare employees of legal entities and individual entrepreneurs engaged in transportation by road and urban surface electric transport for safe work and vehicles for safe operation], Order No. 7 dated January 15, 2014.

15. Customs Union Commission (2011), *Tekhnicheskiy reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 018/2011 "O bezopasnosti kolesnykh transportnykh sredstv"* [Technical Regulation of the Customs Union TR CU 018/2011 "On the safety of wheeled vehicles"], approved by Decision No. 877 dated December 9, 2011.

16. SP 2.5.3650-20 (2020), *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otdel'nym vidam transporta i ob"ektam transportnoy infrastruktury* [Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities], sanitary rules.

17. MR 3.5/2.5.0226-20 (2020), *Metodicheskie rekomendatsii po sanitarno-protivoepidemicheskim meropriyatiyam pri perevozkakh passazhirov obshchestvennym avtomobil'nym i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom* [Methodological recommendations on sanitary and anti-epidemic measures during passenger transportation by public road and urban surface electric transport].

18. Redman, L. et al. (2013), "Kachestvennye kharakteristiki obshchestvennogo transporta, privlekayushchie pol'zovateley lichnykh avtomobiley: obzor issledovaniy" [Quality attributes of public transport that attract car users: a research review], *Transportnaya politika*, vol. 25, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.11.005.

19. Tsoy, M.E., Shchekoldin, V.Yu. and Dolgikh, I.V. (2017), "Issledovanie faktorov, vliyayushchikh na udovletvorennost' potrebiteley kachestvom uslug gorodskogo obshchestvennogo transporta" [Study of factors influencing consumer satisfaction with the quality of urban public transport services], *Rossiyskoe predprinimatel'stvo*, vol. 18, no. 21, pp. 3237–3260.

20. Chekmaryova, G. et al. (2023), "Ekspertnye metody otsenki kachestva transportnykh uslug" [Expert methods for assessing the quality of transport services], *Transportation Research Procedia*, vol. 68, pp. 98–108. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.012.

21. Bakumenko, L.P. (2011), "Metodika apriornogo ranzhirovaniya faktorov kachestva zhizni naseleniya" [Methodology for a priori ranking of factors of the population's quality of life], *Statistika i ekonomika*, no. 1, pp. 142–149.

Sorokina D.N.

ANALYSIS OF THE QUALITY OF SERVICE ON URBAN PUBLIC TRANSPORT IN THE CITY OF ROSTOV-ON-DON

***Abstract**. The article focuses on an analysis of service quality on public transport in Rostov-on-Don, based on a passenger survey. The study concludes that speed and minimal travel time are priorities. The city requires updating its fleet. Drivers should be held accountable for their professional responsibilities. Eliminating or minimizing these negative factors will significantly improve the quality of the urban environment and the quality of life for residents.*

***Keywords**: public transport, quality of service, survey.*

Сведения об авторе

Сорокина Дарья Николаевна
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и информатика»,
e-mail: naukauni@mail.ru

Information about the author

Sorokina Darya Nikolaevna
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Mathematics and Computer Science»,
e-mail: naukauni@mail.ru

УДК 629.3: 004.8

Энглези И.П., Ершова К.А.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ ВЫБОРА МАРШРУТА ДОРОЖНОЙ ПЕРЕВОЗКИ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ

Аннотация. *В статье предлагается совершенствование модели выбора маршрута дорожной перевозки опасных грузов на основе транспортного риска, с учетом вероятности возникновения ДТП, возможного ущерба, длины участка дороги и времени его прохождения, типа опасного груза, плотности населения в радиусе движения транспортного средства, наличия объектов особой уязвимости, погодных условий, длины подвижного состава и геометрии дороги. Разработана модель риска для ребер транспортного графа, которая позволяет учитывать указанные факторы и использовать ее для построения «коридоров безопасности».*

Ключевые слова: *опасные грузы, транспортный риск, транспортная система города, улично-дорожная сеть, маршрутизация, ГИС, коридоры безопасности, оценка риска.*

Актуальность и постановка задачи

Перевозка опасных грузов является неотъемлемой частью функционирования транспортных систем страны и регионов. Наряду с обеспечением производственных и логистических процессов такие перевозки формируют источник риска для населения, инфраструктуры и окружающей среды [1-6]. Аварии с участием транспортных средств, которые перевозят опасные грузы, способны приводить к масштабным пожарам, взрывам, химическому загрязнению и длительным нарушениям работы транспортной сети [2, 3, 6].

Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ) требует разработки и согласования маршрутов движения, минимизирующих риск для людей и окружающей среды. Однако в реальной практике организации перевозки опасных грузов выбор маршрута часто сводится к минимизации длины пути и времени его прохождения. [1, 4, 5].

Анализ существующих научных подходов показывает, что большинство моделей выбора маршрута перевозки опасных грузов основывается на классическом представлении риска «вероятность × последствия». При этом вероятность аварии, как правило, задается укрупненными показателями (например, на километр пути), а последствия ограничиваются оценкой численности населения в зоне поражения. Такие модели недостаточно чувствительны к реальным условиям движения, включая загруженность дорожной сети, геометрические параметры дороги, метеорологические факторы и характеристики подвижного состава.

В связи с этим актуальной задачей является совершенствование модели выбора маршрута дорожной перевозки опасных грузов, учитывающей совокупность факторов, включая длину участка дороги, время его прохождения и геометрию, погодные условия, длину транспортного средства, тип опасного груза, плотность населения в радиусе движения транспортного средства и наличие объектов особой уязвимости.

Анализ последних исследований

За последние годы в зарубежной литературе активно развиваются многоцелевые модели маршрутизации опасных грузов, объединяющие критерии затрат, времени и транспортного риска [7–11]. Параллельно развивается направление risk equity, ориентированное на выравнивание риска между районами и исключение концентрации опасности на отдельных участках дорожной сети [12–14].

В ряде исследований вероятность ДТП при перевозке опасных грузов связана не только с типом опасного груза, но и с дорожными условиями, интенсивностью движения, геометрией дороги, состоянием транспортного средства и внешними факторами [1, 5, 6, 9].

В российских публикациях преобладают работы, посвященные нормативным аспектам и укрупненной оценке риска. В работе «Оптимизация процесса управления рисками в сфере перевозки нефтепродуктов автомобильным транспортом» [15] представлена модель выбора маршрута с учетом вероятности аварии, времени реагирования аварийно-спасательных служб и стоимости компенсации риска, однако использует усредненные показатели вероятности аварии, слабо зависящие от геометрии дороги и текущих условий движения. [15].

В большинстве работ по опасным грузам риск на участке дороги записывают как:

$$R = P \cdot C \quad (1)$$

где P – вероятность аварии;

C – величина последствий (ущерб, число погибших, и. т. д) [1, 5, 6].

В задачах маршрутизации такую зависимость применяют к отдельным дугам (ребрам) транспортной сети, а затем суммируют риск вдоль выбранного маршрута [7, 8, 11].

В работе А.С. Терентьева, С.А. Гусева, И.А. Гусевой [15] риск ДТП определяется:

$$R_{ij}^{h} = P_{ij}^{h} \cdot POP_{ij}^{h} \cdot t_{ij} \quad (2)$$

где P_{ij}^{h} – вероятность аварии;

POP_{ij}^{h} – численность населения находящегося в зоне возможного поражения;

t_{ij} – время реагирования аварийно-спасательных служб.

Таким образом, последствия делятся на два слагаемых: «сколько людей может пострадать» и «как долго они остаются под воздействием до ликвидации аварии».

В ряде зарубежных работ эту схему дополняют параметрами радиуса поражения, плотности застройки и др. [6].

В предлагаемом исследовании сохраняется классический подход «вероятность × последствия», но в модель риска на участке дороги, вводятся параметры более детально описывающие условия движения транспортного средства с опасным грузом в реальных условиях и возможные последствия.

Цель и научная новизна работы

Целью данной работы является совершенствование модели выбора маршрута с минимальным уровнем риска для дорожной перевозки опасных грузов, учитывающей следующие факторы: длину участка дороги и его геометрию, время прохождения, погодные условия, длину транспортного средства, тип опасного груза, плотность населения в радиусе движения транспортного средства и наличие объектов особой уязвимости.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Усовершенствована модель выбора маршрута перевозки опасных грузов для участков дорог, в которой вероятность возникновения ДТП формируется на основе

базовой аварийности (в соответствии с данными статистики) с учётом совокупности корректирующих факторов, отражающих реальные условия движения, что отличает предложенную модель от существующих подходов с укрупнёнными оценками [5, 6, 15].

Предложен подход к учёту геометрических характеристик дорожной сети и параметров транспортного средства (длины транспортного средства и количества поворотов), что позволяет учитывать влияние этих факторов на уровень аварийности [6, 9].

Предложен подход к оценке последствий аварий с опасными грузами, учитывающий тип перевозимого груза, при котором параметры зоны поражения и тяжесть последствий определяются характеристиками такого груза. [1, 5, 6].

Обоснован учёт протяжённости участка дороги, как фактора двойного влияния на риск, одновременно определяющего как вероятность аварийных событий, так и масштабы возможных последствий.

Эти подходы позволяют для каждого ребра графа сформировать показатель риска, который далее используется при построении маршрутов минимального риска и формировании «коридоров безопасности» [7, 8, 14].

Таким образом, по сравнению с моделью А.С. Терентьева и др. [15], где вероятность аварии и последствия задаются укрупнённо, предлагаемая модель в большей степени соответствует реальным условиям перевозки.

Основная часть

1. Представление улично-дорожной сети в виде графа

В качестве исходных данных рассматриваются: улично-дорожная сеть, представляемая в виде транспортного графа; расположение населения и объектов повышенной уязвимости в радиусе движения транспортного средства; характеристика перевозимых опасных грузов; статистика ДТП и данные о параметрах движения и погодных условиях [6–9, 11].

Улично-дорожная сеть представляется в виде ориентированного графа

$$G = (V, E),$$

где V – множество вершин (перекрестки, транспортные узлы),

E – множество ребер (дорожные участки).

Каждому ребру $e \in E$ задается набор параметров: длина участка (чем больше протяженность дороги, тем больше вероятность возникновения ДТП), время прохождения участка в текущих условиях (характеризует загруженность участка дороги транспортом), тип опасного груза (класс и группа по ДОПОГ), определяющий возможную площадь и тяжесть поражения, средняя плотность населения в радиусе движения транспортного средства (чел/м^2), индекс объектов особой уязвимости (например, школа = 1,5 больница = 2), вероятность возникновения аварий на данном участке (по статистике ДТП), индекс погодных условий (от благоприятных к неблагоприятным), число поворотов и пересечений на участке, фактическая ширина проезжей части, длина транспортного средства.

2. Предлагаемая модель риска для ребра графа

Для каждого ребра e дорожной сети и типа опасного груза h вводим локальный риск R_e^h:

$$R_e^h = P_e^h \cdot E_e^h \tag{3}$$

где P_e^h – вероятность аварии с участием опасного груза типа h на участке e;

E_e^h – показатель тяжести последствий на этом участке.

Вероятность аварии P_e^h задается как:

$$P_e^h = P_e^{base} \cdot L_e \cdot F_{traf(e)} \cdot F_{meteo(e)} \cdot F_{geom(e)}, \quad (4)$$

где P_e^{base} – базовая интенсивность ДТП на участке e (например, аварий на млн. км) по статистике;

L_e – длина участка (чем больше протяженность дороги, тем больше риск возникновения ДТП);

$F_{traf\,(e)}$ – параметр, учитывающий загруженность участка дороги (отношение фактического времени к времени свободного транспортного потока);

$F_{meteo\,(e)}$ – параметр, учитывающий ухудшение погодных условий;

$F_{geom\,(e)}$ – параметр, учитывающий геометрические особенности участка (число поворотов, ширину дороги, длину подвижного состава).

Параметр загруженности участка дороги $F_{traf(e)}$ может быть задан, как:

$$F_{traf(e)} = 1 + \alpha_{traf} \cdot \max(0, \frac{T_e}{T_e^{free}} - 1) \quad (5)$$

где T_e^{free} – время прохождения участка в свободном потоке;

T_e – время прохождения участка в текущих условиях;

α_{traf} – калибруемый коэффициент влияния загруженности участка дороги на вероятность ДТП. Коэффициент α_{traf} может принимать следующие значения:

$0 \le \alpha_{traf} \le 0{,}3$ – слабое влияние (малозагруженные участки дороги);

$0{,}3 \le \alpha_{traf} \le 0{,}8$ – умеренное влияние (участки дороги с регулярными заторами);

$0{,}8 \le \alpha_{traf} \le 1{,}5$ – сильное влияние (участки дороги с высокой плотностью движения, частыми перестроениями).

Влияние погодных условий $F_{meteo(e)}$ может описываться через зависимость:

$$F_{meteo(e)} = 1 + \alpha_{meteo} \cdot q_e \quad (5)$$

где q_e – оценка погодных условий (задаётся от 0 до 1, например, 0 – сухое покрытие, хорошая видимость, 0,1…0,2 – сухое покрытие, сниженная освещенность, 0,3…0,5 – дождь, 0,5…0,7 – сильный дождь, снег, плохая видимость, 0,7…0,9 – снегопад, гололед, туман, 0,9…1 — сильный гололед, плотный туман),

α_{meteo} – калибруемый коэффициент влияния погодных условий на вероятность ДТП (принимается от 0 до 1). Коэффициент α_{meteo} может принимать следующие значения:

0…0,3 – незначительное влияние погодных условий (почти нет влияния погодных условий);

0,3…0,6 – умеренное влияние погодных условий (ухудшение сцепления с дорожным покрытием);

0,6…1,0 – сильное влияние погодных условий (высокая аварийность, рост числа ДТП).

Параметр геометрии дороги $F_{geom(e)}$ предлагается представить в виде:

$$F_{geom(e)} = 1 + \alpha_{turn} \cdot N_e^{turn} + \alpha_{width} \max(0, \frac{W_{ref} - W_e}{W_{ref}}) + \alpha_{icn} \max(0, \frac{L_e^{ver} - L_{ref}^{veh}}{L_{ref}^{veh}}) \quad (6)$$

где α_{turn} – калибруемый коэффициент влияния поворотов/маневров на участке дороги на вероятность ДТП. Коэффициент α_{turn} может принимать следующие значения: 0…0,05

– без маневров; 0,05…0,1 – редкие повороты; 0,1…0,2 – много маневров; 0,2…0,3 – интенсивные перестроения.

N_e^{turn} – число поворотов/маневров на участке дороги (кривые малого радиуса, сложные пересечения). При увеличении количества маневров, увеличивается вероятность ДТП.

W_e –фактическая ширина участка дороги;

L_e^{veh} – фактическая длина транспортного средства;

W_{ref} – нормативное значение ширины участка дороги (7 метров для двухполосной дороги);

L_{ref}^{veh} – нормативное значение длины транспортного средства (обычное грузовое транспортное средство - 12 метров);

α_{width} – калибруемый коэффициент влияния ширины участка дороги на вероятность ДТП. Коэффициент α_{width} может принимать следующие значения: 0…0,2 – не имеет влияние (ширина участка дороги соответствует нормативной – 7 метров); 0,2…0,4 – незначительное влияние (ширина участка дороги - 5,5 – 6,5 метров); 0,4…0,7 – умеренное влияние (ширина участка дороги – 4,5 – 5,5 метров); 0,7…1,0 – высокое влияние (ширина участка дороги меньше 4,5 метров).

α_{icn} – калибруемый коэффициент влияния длины транспортного средства на вероятность ДТП. Коэффициент α_{icn} может принимать следующие значения: 0…0,2 – слабое влияние (длина транспортного средства до 10 метров); 0,2…0,4 – среднее влияние (длина транспортного средства от 12 до 16,5 метров); 0,4…0,6 – повышенное влияние (длина транспортного средства от 16,5 до 20 метров); 0,6…0,8 – сильное влияние (длина транспортного средства больше 20 метров).

Показатель тяжести последствий E_e^h для груза типа *h* предлагается задавать как:

$$E_e^h = S_h \cdot N_e^h \cdot F_{obj(e)} \tag{8}$$

где S_h – коэффициент опасности класса опасного груза (учет токсичности, взрывоопасности, и.т.п); Коэффициент S_h может принимать следующие значения: 1,0…1,3 – легковоспламеняющиеся жидкости (класс 3); 1,2…1,6 – сжатые/сжиженные газы (класс 2); 1,5…2,5 – токсичные вещества (класс 6.1); 2,0…3,0 – взрывчатые вещества (класс 1); 2,5…4,0 – радиоактивные материалы (класс 7);

N_e^h – ожидаемое число людей, находящихся в зоне поражения при аварии на участке дороги (ребре) *e*;

$F_{obj(e)}$ – коэффициент, учитывающий присутствие объектов особой уязвимости (школ, больниц, ТЦ и др.).

Плотность населения в радиусе движения транспортного средства N_e^h и площадь возможного поражения на участке дороги A_e^h можно оценить как:

$$N_e^h = p_e \cdot A_e^h; A_e^h = 2r_h L_e, \tag{9}$$

где p_e – средняя плотность населения в зоне, прилегающей к рассматриваемому участку дороги (чел/м^2);

r_h – радиус опасной зоны для груза *h* (радиус распространения токсичного облака, поражения ударной волной или теплового излучения);

A_e^h – площадь полосы вдоль дороги, попадающей в зону возможного поражения: ширина ≈ $2r_h$ L_e (длина участка дороги).

Коэффициент, учитывающий присутствие объектов особой уязвимости можно задать в виде:

$$F_{obj(o)} = 1 + \alpha_{obj} O_e \tag{10}$$

где O_e – индекс уязвимых объектов; Индекс уязвимых объектов может принимать следующие значения: 0 – нет уязвимых объектов (промышленная зона); 0,5 … 1,0 – небольшая застройка (жилые дома, низкая плотность); 1,0 … 1,5 – средняя уязвимость (офисы, магазины); 1,5 … 2 – высокая уязвимость (школы, торговые центры); 2 … 2,5 – очень высокая уязвимость (больницы, вокзалы).

α_{obj} – калибруемый коэффициент чувствительности (характеризует степень влияния объектов особой уязвимости на последствия ДТП). Коэффициент α_{obj} может принимать следующие значения: 0,2 … 0,4 – слабое влияние; 0,4 … 0,7 – среднее влияние; 0,7 … 1,0 – сильное влияние.

Если перевозка определенного типа груза запрещена возле таких объектов – помечаем ребро как запрещенное для данного вида груза *h*.

В результате риск R_e^h для ребра *e* и груза *h* записывается как:

$$R_e^h = P_e^{base} \cdot L_e \cdot F_{traf(e)} \cdot F_{meteo(e)} \cdot F_{geom(e)} \cdot S_h \cdot p_e(2r_h L_e) \cdot F_{obj(e)} \tag{11}$$

Эта модель сохраняет классическую структуру «вероятность × последствия», но расширяет ее за счет более детального описания параметров, влияющих на вероятность ДТП и масштаб последствий на конкретном участке дороги.

Коэффициенты рассматриваются как калибруемые параметры, отражающие относительный вклад соответствующих факторов в интегральный риск маршрута.

На первом этапе их первоначальные значения задаются на основе экспертных оценок: специалистам в области безопасности дорожного движения и эксплуатации транспортных систем предлагается ранжировать важность факторов (время движения транспортного средства, метеоусловия, сложность маневров, уязвимость окружающей застройки и т.п.), после чего нормированные балльные оценки используются как стартовые коэффициенты модели.

На последующем этапе выполняется статистическая калибровка по ретроспективным данным о ДТП: для выборки участков дороги с известной частотой аварий по формулам модели вычисляется локальный риск, а значения коэффициентов подбираются так, чтобы минимизировать расхождение между расчетными и фактическими показателями аварийности (например, методом наименьших квадратов).

При этом «чистая» статистика ДТП не всегда отражает приоритеты безопасности: так, аварий вблизи школ может быть существенно меньше, чем аварий в неблагоприятную погоду, но потенциальные последствия единичного происшествия возле школы объективно выше. Поэтому калибровка коэффициентов не сводится к механическому копированию относительных частот ДТП; для множителей, связанных с уязвимостью среды и тяжестью последствий, используется комбинированный подход, при котором статистические оценки дополняются экспертными и нормативными соображениями.

4. Верификации модели

Для проверки работоспособности и практической реализации предложенной модели планируется ее апробация на фрагменте дорожной сети крупного города. В качестве исходной базы используются реальные данные: схема дорожной сети, характеристики участков (длина, ширина проезжей части, число пересечений и поворотов), сведения о застройке и плотности населения, расположение объектов повышенной уязвимости, а также статистика дорожно-транспортных происшествий. Дополнительно формируются синтезированные сценарии движения по тем же участкам: в ГИС создаются альтернативные варианты маршрутов, в которых варьируются параметры загрузки движения и погодные условия.

Эффективность предлагаемой модели будет оцениваться по двум группам критериев. Во-первых, для заданных пар «пункт отправления – пункт назначения» сравнивается интегральный риск маршрута, рассчитанный по предлагаемой модели, с риском базовых вариантов – маршрута минимальной длины, маршрута минимального времени в пути. Во-вторых, анализируется распределение локального риска вдоль маршрутов: максимальные значения локального риска на отдельных ребрах, доля участков с высоким риском, а также изменение числа жителей, попадающих в зоны повышенной опасности.

5. Обсуждение предложенной модели и ее место в существующих моделях

Формирование маршрута дорожной перевозки опасных грузов рассматривается как процесс из трех составляющих [5, 6]:

-определение опасных участков сети;

-оценки транспортного риска на каждом участке;

- формирование маршрута с учетом транспортного риска.

На этапе определения рисков выделяются участки с повышенной вероятностью возникновения ДТП, сложной геометрией и высокой плотностью населения в радиусе движения транспортного средства.

При оценке транспортного риска формируется показатель локального риска для ребер транспортного графа, учитывающий вероятность возникновения аварии и тяжесть возможных последствий.

На этапе формирования маршрута минимизируется суммарный риск при соблюдении нормативных ограничений для перевозки опасных грузов [7–11].

Предлагаемая модель риска сохраняет классическую структуру «вероятность × последствия» [1, 5, 6], но уточняет оба множителя (вероятности возникновения ДТП и тяжести последствий). По сравнению с моделью А.С. Терентьева и др. [15], где вероятность аварии и последствия задаются укрупненно, здесь вероятность P_e^h учитывает не только длину участка, но и время прохождения участка в текущих условиях, погодные условия, геометрию дороги и длину транспортного средства, а последствия E_e^h зависят от типа опасного груза, радиуса поражения, плотности населения и наличия вдоль данного участка дороги объектов особой уязвимости. Это делает модель риска R_e^h более чувствительной к особенностям городских улиц и позволяет напрямую использовать для построения «безопасных коридоров» движения опасных грузов.

Предлагаемая модель может быть далее расширена за счет введения показателей, характеризующих распределение риска по территории.

Выводы

В работе выполнен анализ современных подходов к маршрутизации дорожной перевозки опасных грузов, включая модели, критерии, концепцию risk equity.

Рассмотрена работа А.С. Терентьева, С.А. Гусева, И.А. Гусевой [15], в которой локальный риск маршрута формируется на основе вероятности аварии, численности населения и времени реагирования аварийно-спасательных служб.

На основе анализа литературы предложена усовершенствованная модель локального риска для ребер транспортного графа, которая учитывает длину участка, время его прохождения (загруженность), тип опасного груза, плотность населения в радиусе движения транспортного средства, наличие объектов особой уязвимости, базовую вероятность ДТП, погодные условия, геометрические характеристики (число поворотов, ширину проезжей части) и длину транспортного средства. Разработанная модель сохраняет классическую структуру «вероятность × последствия», но расширяет ее за счет более детального описания факторов, влияющих на вероятность ДТП и масштаб последствий на конкретном участке дороги.

Предложенная модель может использоваться для построения маршрутов и формирования «коридоров безопасности».

Список литературы

1. Erkut E., Ingolfsson A. Transport risk models for hazardous materials: review and perspectives // European Journal of Operational Research. – 2000. – Vol. 121. – P. 179–188. – DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00056-8.

2. Нечаев А. П., Сытник А. В. Оценка риска при перевозке опасных грузов автомобильным транспортом // Безопасность дорожного движения. – 2015.

3. Котляров Е. А. Маршрутизация перевозок опасных грузов в условиях городской улично-дорожной сети // Транспортные системы. – 2018.

4. United Nations. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Model Regulations. – Geneva : UN, latest edition.

5. Mohri S. S., Mohammadi M., Gendreau M., et al. Hazardous material transportation problems: A comprehensive overview of models and solution approaches // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 302, No. 1. – P. 1–38. – DOI: 10.1016/j.ejor.2021.11.045.

6. Guo J., Luo C. Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – Vol. 9, No. 4. – P. 571–590. – DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.004.

7. Bula G. A., Afsar H. M., González F. A., Prodhon C., Velasco N. Bi-objective vehicle routing problem for hazardous materials transportation // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 206. – P. 976–986. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.228.

8. Wang Y., Roy N., Zhang B., et al. Multi-objective transportation route optimization for hazardous materials based on GIS // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2023. – Vol. 81. – Art. 104954. – DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104954.

9. Men J., Jiang P., Xu H., et al. Robust multi-objective vehicle routing problem with time windows for hazardous materials transportation // IET Intelligent Transport Systems. – 2020. – Vol. 14, No. 2. – P. 154–163. – DOI: 10.1049/iet-its.2019.0332.

10. Ding L., Zhang F., Ye J., et al. A novel optimization method for hazardous materials vehicle routing with temperature-based time windows // PeerJ Computer Science. – 2024. – Vol. 10. – Art. e2586. – DOI: 10.7717/peerj-cs.2586.

11. Li Y., Wu J., Yuan R. Optimizing hazardous materials transportation network: A bi-level programming approach considering road blocking // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2024. – Vol. 92. – Art. 105451. – DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105451.

12. Liu L., Bai X., Liu Y. Research on route optimization of hazardous materials transportation considering risk equity // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, No. 16. – Art. 9427. – DOI: 10.3390/su13169427.

13. Baghaei Daemi H., Kasap S., Mahmoudabadi A. Proposing risk equity approaches of risk and distance based in route selection and site location for hazardous material transportation // Case Studies on Transport Policy. – 2022. – Vol. 10, No. 4. – P. 2486–2496. – DOI: 10.1016/j.cstp.2022.11.001.

14. Radovici A., Ștefănie H., Ajtai I., et al. Is the analysis of territorial compatibility in the vicinity of road hazmat transport routes a necessity for developing countries? A case study of Romania // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, No. 9. – Art. e19948. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19948.

15. Терентьев А. С., Гусев С. А., Гусева И. А. Оптимизация процесса управления рисками в сфере перевозки нефтепродуктов автомобильным транспортом // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 1–2 (84). – С. 23–29.

References

1. Erkut, E. and Ingolfsson, A. (2000), "Transport risk models for hazardous materials: review and perspectives", *European Journal of Operational Research*, vol. 121, pp. 179–188. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00056-8.

2. Nechaev, A.P. and Sytnik, A.V. (2015), "Otsenka riska pri perevozke opasnykh gruzov avtomobil'nym transportom" [Risk assessment in the transportation of dangerous goods by road], *Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya*.

3. Kotlyarov, E.A. (2018), "Marshrutizatsiya perevozok opasnykh gruzov v usloviyakh gorodskoy ulichno-dorozhnoy seti" [Routing of dangerous goods transportation in urban road networks], *Transportnye sistemy*.

4. United Nations (latest edition), *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Model Regulations*, UN, Geneva, Switzerland.

5. Mohri, S.S., Mohammadi, M., Gendreau, M. et al. (2022), "Hazardous material transportation problems: A comprehensive overview of models and solution approaches", *European Journal of Operational Research*, vol. 302, no. 1, pp. 1–38. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.11.045.

6. Guo, J. and Luo, C. (2022), "Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years", *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 9, no. 4, pp. 571–590. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.004.

7. Bula, G.A., Afsar, H.M., González, F.A., Prodhon, C. and Velasco, N. (2019), "Bi-objective vehicle routing problem for hazardous materials transportation", *Journal of Cleaner Production*, vol. 206, pp. 976–986. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.228.

8. Wang, Y., Roy, N., Zhang, B. et al. (2023), "Multi-objective transportation route optimization for hazardous materials based on GIS", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 81, art. 104954. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104954.

9. Men, J., Jiang, P., Xu, H. et al. (2020), "Robust multi-objective vehicle routing problem with time windows for hazardous materials transportation", *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 154–163. DOI: 10.1049/iet-its.2019.0332.

10. Ding, L., Zhang, F., Ye, J. et al. (2024), "A novel optimization method for hazardous materials vehicle routing with temperature-based time windows", *PeerJ Computer Science*, vol. 10, art. e2586. DOI: 10.7717/peerj-cs.2586.

11. Li, Y., Wu, J. and Yuan, R. (2024), "Optimizing hazardous materials transportation network: A bi-level programming approach considering road blocking", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 92, art. 105451. DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105451.

12. Liu, L., Bai, X. and Liu, Y. (2021), "Research on route optimization of hazardous materials transportation considering risk equity", *Sustainability*, vol. 13, no. 16, art. 9427. DOI: 10.3390/su13169427.

13. Baghaei Daemi, H., Kasap, S. and Mahmoudabadi, A. (2022), "Proposing risk equity approaches of risk and distance based in route selection and site location for hazardous material transportation", *Case Studies on Transport Policy*, vol. 10, no. 4, pp. 2486–2496. DOI: 10.1016/j.cstp.2022.11.001.

14. Radovici, A., Ștefănie, H., Ajtai, I. et al. (2023), "Is the analysis of territorial compatibility in the vicinity of road hazmat transport routes a necessity for developing countries? A case study of Romania", *Heliyon*, vol. 9, no. 9, art. e19948. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19948.

15. Terentyev, A.S., Gusev, S.A. and Guseva, I.A. (2024), "Optimizatsiya protsessa upravleniya riskami v sfere perevozki nefteproduktov avtomobil'nym transportom" [Optimization of the risk management process in the field of oil products transportation by road], *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, no. 1–2 (84), pp. 23–29.

Englezi, I.P., Ershova, K.A.

IMPROVING THE ROUTE CHOICE MODEL FOR ROAD TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS

Abstract. *The article proposes the improvement of the model of the choice of the route of road transport of dangerous goods on the basis of transport risk, taking into account the probability of occurrence of an accident, the expected damage, the length of the road section and the time of its passage (load), the type of dangerous goods, the population density in the radius of movement of the vehicle, the presence of objects of special vulnerability, weather conditions, the length of rolling stock and the geometry of the road. A risk model for the edges of the transport graph is developed, which allows to take into account these factors and use it to build «safety corridors».*

Keywords: *hazardous materials, transport risk, urban transport system, road network, routing, GIS, multi-criteria optimization, safety corridors, risk assessment*

Сведения об авторах

Энглези Ирина Павловна
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия
ректор,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: rector@dat-dn.ru

Ершова Кристина Александровна
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия
аспирант,
e-mail: ershova_kristina_dat@mail.ru

Information about the authors

Englezi Irina Pavlovna
Autonomous Non-Profit Higher Education Institution “Donetsk Academy of Transport”, Donetsk, Russia
Rector

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor
E-mail: rector@dat-dn.ru

Ershova Kristina Aleksandrovna
Autonomous Non-Profit Higher Education Institution “Donetsk Academy of Transport”, Donetsk, Russia
Postgraduate Student (PhD Candidate)
E-mail: ershova_kristina_dat@mail.ru

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

УДК 629.3.083

Джованис С., Сарбаев В.И., Гришин А.С.

АДАПТИВНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ С УЧЕТОМ СЕЗОННЫХ ФАКТОРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

***Аннотация**. В статье рассматривается подход к прогнозированию спроса на запасные части в автосервисных центрах в условиях выраженной сезонности, характерной для островной экономики Республики Кипр. Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения издержек на содержание запасов и сокращения дефицитов при высокой неопределённости спроса. Предложена адаптивная система, основанная на использовании алгоритмов многофакторной регрессии, случайного леса и рекуррентных нейронных сетей, позволяющих учитывать сезонные колебания, возрастную структуру автопарка и дополнительные эксплуатационные факторы. Сравнительная оценка моделей проводится на исторических данных о спросе и связанных с ним показателях. Показано, что применение методов машинного обучения обеспечивает повышение точности прогнозирования и улучшение показателей управления запасами, включая уровень сервиса и оборачиваемость. Отмечены направления дальнейшего развития предложенного подхода.*

***Ключевые слова**: машинное обучение, прогнозирование спроса, управление запасами, автосервис, сезонные колебания спроса.*

Постановка задачи

Обеспеченность предприятия автосервиса запасами запасных частей напрямую влияет на уровень удовлетворенности клиентов и финансовые результаты деятельности и тем самым является одной из ключевых функций менеджмента предприятия. Значительная доля запасов в структуре оборотных активов и высокие затраты на их содержание сочетаются с риском потери клиентов при отсутствии необходимых деталей в момент обращения. Традиционные подходы, основанные на интуитивных методах и нормативах, не обеспечивают требуемого уровня эффективности в условиях динамичной рыночной среды, увеличения номенклатуры запасных частей и ограниченности финансовых ресурсов.

Особую сложность представляет прогнозирование спроса на запасные части в Республике Кипр, где автосервисный рынок характеризуется высокой сезонностью, связанной с туристическими потоками. Существенные колебания объёмов работ в течение года приводят к нестабильности потребности в запасных частях и повышают риски как дефицита, так и избыточных запасов. В этих условиях возникает задача разработки подхода к прогнозированию спроса, позволяющего учитывать сезонные и эксплуатационные факторы и обеспечивать требуемый уровень сервиса при рациональном использовании оборотного капитала.

Анализ последних исследований

Вопросы управления запасами в автосервисных предприятиях и дилерских сетях освещены в работах ряда отечественных и зарубежных авторов. В исследованиях В.А. Бугримова [1] и др. рассматриваются статистические основы имитационного моделирования систем управления запасами предприятий автосервиса, что позволяет количественно оценивать влияние различных параметров на уровень запасов и качество обслуживания [2]. В работах, посвящённых маркетингу и аналитике автосервисной деятельности, подчеркивается значительная доля запасов в структуре оборотных активов и необходимость оптимизации их объёма [3,4].

Предложенные модели управления запасами в автосервисе ориентированы преимущественно на использование классических методов прогнозирования и нормативных подходов, что ограничивает их эффективность в условиях высокой вариативности спроса и выраженной сезонности. В исследованиях по оптимизации потребности в запасных частях для дилерских сетей рассматриваются принципы формирования страховых запасов и распределения номенклатуры между складами, однако влиянию специфических факторов, таких как туристическая сезонность и особенности эксплуатации арендного транспорта, уделяется недостаточное внимание.

Современные зарубежные работы [5,6] по применению методов искусственного интеллекта и машинного обучения в задачах технического обслуживания и управления цепями поставок демонстрируют потенциал глубоких нейронных сетей, ансамблевых алгоритмов и временных моделей для повышения точности прогнозирования.

В работах по прогнозированию спроса с применением машинного обучения подчёркивается значимость выбора метрик качества и корректной организации обучения на исторических данных, включая обработку выбросов и сдвигов спроса, а также использование признаков поведения клиентов и рыночных факторов [11]. Отдельное направление связано с моделированием спроса на основе ML в прикладных экономических задачах, где показана практическая ценность гибридных подходов и feature engineering при ограниченных выборках и неоднородности данных [12]. Для задач управления запасами актуальны обзоры, систематизирующие методы ИИ (включая ансамблевые модели и глубокие сети) и выделяющие типовые риски внедрения: «грязные» данные, слабая интерпретируемость и необходимость интеграции с ERP/складскими контурами [18].

В то же время применение данных подходов к управлению запасами автосервисных центров в условиях островной экономики и выраженной туристической сезонности исследовано ограниченно, что обусловливает необходимость дальнейшей разработки соответствующих методик [7,8].

Цель работы

Цель работы состоит в разработке адаптивной системы прогнозирования спроса на запасные части для автосервисного центра в условиях выраженной сезонности, основанной на применении методов машинного обучения. Предполагается использование алгоритмов многофакторной регрессии, случайного леса и рекуррентных нейронных сетей для учета сезонных колебаний, возрастной структуры автопарка и дополнительных эксплуатационных факторов, что должно обеспечить повышение точности прогнозирования и улучшение показателей управления запасами.

Основная часть

Исследование проводилось на базе автосервисного центра в г. Лимассол, Республика Кипр. Анализ многолетних данных показал выраженную сезонность спроса, связанную с туристическими потоками. В летний период июнь-сентябрь спрос на

быстроизнашиваемые детали возрастает на 40-60 процентов относительно среднегодового уровня. Это обусловлено увеличением интенсивности эксплуатации арендных автомобилей и ростом числа поездок в условиях высоких температур.

На основе экспертной оценки выявлены ключевые факторы, определяющие спрос на запасные части. Результаты систематизированы в таблице 1, где представлены факторы с наибольшей значимостью для прогнозирования [9,10].

При формировании пула признаков для прогнозирования спроса учитывались подходы, принятые в аналитике цепей поставок: выделение факторов спроса/предложения, построение лаговых переменных, календарных и ценовых индексов, а также проверка устойчивости моделей к изменению условий (concept drift) [14,15]. Дополнительно принималось во внимание, что в логистике и supply chain всё чаще используются методы Big Data Analytics для объединения разнородных источников (операционные данные, цены, внешняя среда), что повышает информативность моделей при корректном контроле качества данных [16,19].

Таблица 1

Основные факторы прогнозирования спроса на запасные части

Фактор	Экспертная оценка значимости, баллы	Метод учета в модели
Глубина модельного ряда	7.7	Коэффициент
Средний возраст автомобилей	7.0	Непрерывная переменная
Число отказов на 1000 км	7.3	Скользящее среднее
Качество технического обслуживания (ТО) и ремонта	6.9	Нормированный индекс
Объем расхода в прошлом периоде	7.1	Лаговая переменная
Индекс цен	7.6	Временной ряд
Эмиссия углекислого газа	8.0	Environmental, Social, and Governance, ESG-индикатор

Анализ данных таблицы 1 показывает, что наибольшую значимость имеют показатели выбросов диоксида углерода (CO_2)-эмиссии, связанные с ужесточением экологических требований ЕС, а также традиционные факторы, такие как глубина модельного ряда и возраст автопарка. Средний возраст обслуживаемых автомобилей в Республике Кипр составляет 13.2 года, что существенно влияет на частоту замены узлов и агрегатов.

На рисунке 1 представлена помесячная динамика спроса на тормозные колодки за 2021 год, демонстрирующая выраженную сезонность.

Как видно из рисунка 1, пиковые значения спроса приходятся на июль-август и ноябрь-декабрь. Летний пик обусловлен туристическим сезоном, а зимний связан с предпраздничным обслуживанием автомобилей. Коэффициент вариации спроса составил 0.25, что указывает на умеренную нестабильность и возможность применения прогностических моделей.

Для прогнозирования спроса разработан комплекс моделей машинного обучения, включающий многофакторную регрессию, алгоритм случайного леса и нейронную сеть LSTM [8]. Базовая регрессионная модель имеет вид, представленный в формуле

$$Q(t) = \beta_0 + \sum \beta_i X_i(t)^{b_i} + \gamma S(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

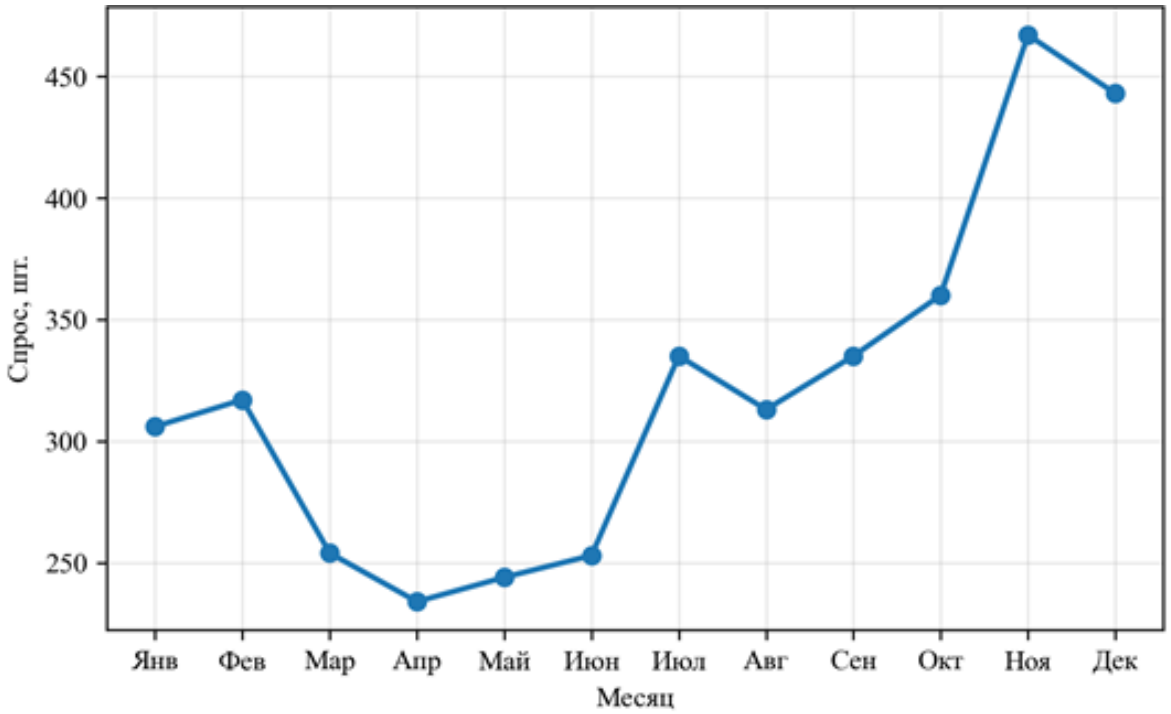


Рис. 1. Сезонная динамика спроса на запасные части

В формуле 1 $Q(t)$ представляет прогнозируемый спрос в период t, $X_i(t)$ обозначают факторы влияния из таблицы 1, $S(t)$ является сезонной компонентой, а $\varepsilon(t)$ соответствует случайной ошибке. Коэффициенты β_i и степени b_i определяются методом наименьших квадратов на обучающей выборке из 36 месяцев наблюдений.

Алгоритм случайного леса применялся для учета нелинейных взаимосвязей между факторами. Модель включала 100 деревьев решений с максимальной глубиной 10 уровней. Для каждого разбиения случайным образом выбирались 5 признаков из 12 доступных. Данный подход позволил выявить скрытые закономерности влияния комбинаций факторов на спрос.

Подобные решения для повышения точности планирования и снижения дефицитов рассматриваются и в контексте автомобильных цепей поставок, где ML/AI применяется для управления запасами и пополнением номенклатуры [13,17].

Нейронная сеть LSTM разработана специально для учета временных зависимостей в данных. Архитектура включала два LSTM-слоя по 64 нейрона с dropout-регуляризацией 0.2 для предотвращения переобучения. Размер окна ретроспективы составил 6 месяцев. Обучение проводилось методом Adam с начальной скоростью обучения 0.001 в течение 200 эпох.

Выбор рекуррентной архитектуры обусловлен тем, что для краткосрочных временных рядов в транспортных задачах показана эффективность гибридных и ML-моделей, сочетающих выделение сезонных/календарных компонентов и обучение на скользящем окне, что повышает устойчивость прогноза на нерегулярных данных [20]. С учётом этого в дальнейшей версии системы целесообразно рассматривать гибридизацию (например, decomposition + ML) и ансамблирование моделей для различных групп номенклатуры [18].

Результаты сравнительной оценки погрешностей прогнозирования различных методов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение погрешностей методов прогнозирования

Метод	MAPE, %	MAE, шт.	R^2
Базовый (интуитивный)	28.0	112	0.45
Многофакторная регрессия	14.0	56	0.84
Случайный лес (Random Forest, RF)	12.3	49	0.88
LSTM-сеть	11.8	47	0.89

Данные таблицы 2 свидетельствуют о существенном снижении погрешности прогнозирования при использовании методов машинного обучения. LSTM-сеть показала наилучшие результаты с MAPE 11,8 %, что в 2,4 раза лучше базового метода. Коэффициент детерминации R^2 на уровне 0,89 указывает на высокую объяснительную способность модели.

Апробация разработанной системы проводилась в течение 12 месяцев в реальных условиях автосервисного центра. Внедрение осуществлялось поэтапно с постепенным расширением охвата номенклатуры.

На рисунке 2 представлено сравнение погрешностей прогнозирования различных методов.

Как показано на рисунке 2, все методы машинного обучения значительно превосходят базовый подход. LSTM-сеть обеспечивает наименьшую ошибку благодаря способности учитывать долгосрочные временные зависимости в данных.

Применение адаптивной системы прогнозирования позволило достичь следующих результатов. Уровень сервиса повысился с 87.3 до 95.8 процента за счет снижения количества дефицитов с 18.4 до 4.2 случаев в месяц. Оборачиваемость запасов увеличилась с 8.2 до 11.7 раз в год, что свидетельствует о более эффективном использовании оборотного капитала. Средний уровень запасов снизился с 245.6 до 186.3 тыс. евро, высвободив 59.3 тыс. евро оборотных средств.

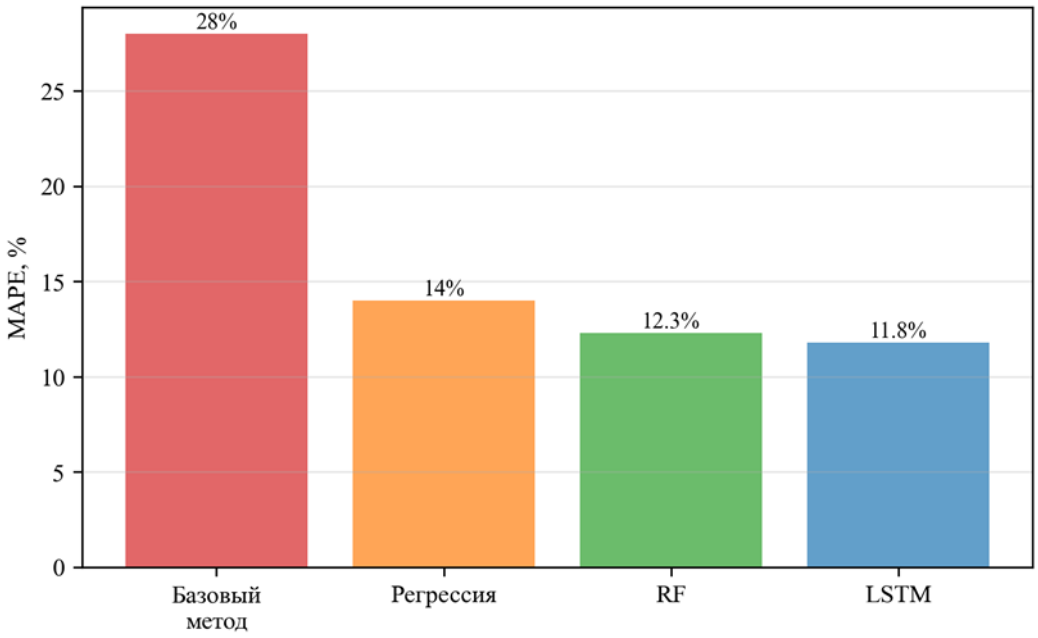


Рис. 2. Сравнение показателей погрешности прогнозирования (MAPE/MAE) для различных методов

Экономический эффект составил 58.5 тыс. евро в год, включая снижение затрат на хранение, сокращение потерь от дефицита, оптимизацию транспортных расходов и экономию от высвобождения капитала. При инвестициях в разработку и внедрение системы 42.3 тыс. евро срок окупаемости составил 8.7 месяцев. Дополнительно достигнуто снижение углеродного следа от логистических операций на 31 процент за счет оптимизации частоты и объемов поставок.

Выводы

1) Разработана адаптивная система прогнозирования спроса на запасные части на основе методов машинного обучения, включающая модели многофакторной регрессии, случайного леса и рекуррентных нейронных сетей. Показано, что данные модели позволяют учитывать сезонные колебания спроса, возрастную структуру автопарка и эксплуатационные факторы, характерные для островной экономики Республики Кипр.

2) Установлено, что применение алгоритмов машинного обучения обеспечивает снижение средней абсолютной процентной ошибки прогноза более чем в два раза по сравнению с традиционными интуитивными методами, а также повышение коэффициента детерминации, что свидетельствует о высокой объяснительной способности построенных моделей.

3) Практическая апробация системы в условиях автосервисного центра продемонстрировала повышение уровня сервиса и оборачиваемости запасов при одновременном снижении среднего уровня запасов и связанных с ними затрат. Полученный экономический эффект превысил затраты на разработку и внедрение системы в первый год эксплуатации.

4) Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением набора входных данных за счет включения прогнозов туристических потоков и погодных условий, а также с разработкой ансамблевых методов, комбинирующих преимущества различных алгоритмов машинного обучения, и масштабированием предложенного подхода на сеть автосервисных предприятий, а также с увязкой прогноза спроса с задачами планирования в цепи поставок и оценкой эффектов от применения предиктивной аналитики для складского контура и закупок [14–17,19].

Список литературы

1. Бугримов В. А., Кондратьев А. В., Сарбаев В. И. Статистическая основа имитационного моделирования системы управления запасами предприятия автосервиса // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – № 1. – С. 132–138.

2. Волгин В. В. Автосервис: маркетинг и анализ. – Москва : Дашков и К, 2016. – 672 с.

3. Крамаренко Е. Р., Новиков А. Н., Панов С. В. Модель управления запасами в автосервисе // Исследование и проектирование интеллектуальных систем. – 2019. – С. 128–131.

4. Солнцев А. А., Зенченко В. А., Гулый В. В. Основные подходы и принципы оптимизации потребности в запасных частях для дилерской сети СТО // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса. – 2019. – С. 91–96.

5. Chen C., Liu Y., Wang X. An integrated deep learning-based approach for automobile maintenance prediction with GIS data // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 216. – Art. 107919.

6. Riahi Y., Saikouk S., Gunasekaran A. Artificial intelligence applications in supply chain: A descriptive bibliometric analysis and future research directions // Expert Systems with Applications. – 2021. – Vol. 173. – Art. 114702.

7. Мякишев В. С., Шаталов А. И., Папаскуа А. А., Павленко В. М. Управление запасами на предприятиях автосервиса // Управленческий учет. – 2021. – № 7. – С. 247–253.

8. Кабикенов С. Ж. Прогнозирование потребности и оптимизация запасных частей для технического обслуживания и ремонта автомобилей // Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series. – 2025. – Т. 151, № 2. – С. 250–261.

9. Иващук О. Подход к автоматизированному управлению запасами малого автосервисного предприятия // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП-2023). – 2023. – С. 215–219.

10. Ишкин Ю. Д., Захаров Н. С., Рассохин А. В., Ишкина Е. Г. Влияние сезонности на формирование потребности в запасных частях автомобилей // Архитектура, строительство, транспорт. – 2025. – № 1. – С. 102–111.

11. Усмонов М. Т., Ахматова Д., Негматова С. Э. Исследование алгоритмов машинного обучения и анализ больших данных для прогнозирования спроса и поведения клиентов // Международный журнал теории новейших научных исследований. – 2024. – Т. 1, № 1. – С. 85–96.

12. Пивкин К. С. Моделирование покупательского спроса на предприятиях розничной торговли на основе методов машинного обучения : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.13. – Ижевск, 2018. – 145 с.

13. Mandala V. Revolutionizing Automotive Supply Chain: Enhancing Inventory Management with AI and Machine Learning // Universal Journal of Computer Sciences and Communications. – 2024. – Vol. 3, No. 1. – P. 10–22. – DOI: 10.31586/ujcsc.2024.918.

14. Lee H. L., Whang S. Machine learning for supply chain planning and operations: Challenges and opportunities // Journal of Management Science and Engineering. – 2019. – Vol. 4, No. 3. – P. 173–186. – DOI: 10.1016/j.jmse.2019.08.001.

15. Kumar A., Smith R. Predictive analytics in the automotive supply chain // Journal of Business Logistics. – 2020. – Vol. 41, No. 1. – P. 52–69. – DOI: 10.1111/jbl.12245.

16. Wang G., Gunasekaran A., Ngai E. W. T., Papadopoulos T. Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications // International Journal of Production Economics. – 2020. – Vol. 176. – P. 98–110.

17. Zhao L., Strotmann H. Artificial intelligence for forecasting in automotive industry supply chain management // Operations Management Research. – 2022. – Vol. 15, No. 1–2. – P. 34–49. – DOI: 10.1007/s12063-021-00176-7.

18. He Y., Zhang M., Ren S. Artificial intelligence in inventory management: A review and future research agenda // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, No. 7. – P. 2108–2126. – DOI: 10.1080/00207543.2020.1795616.

19. Lu Y., Wang X., Huang G. Q. Big data-driven supply chain management: A state-of-the-art survey // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2017. – Vol. 14, No. 1. – P. 428–441.

20. Choi S., Oh S. A hybrid forecasting model using machine learning for short-term traffic flow prediction // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2017. – Vol. 18, No. 8. – P. 2271–2280. – DOI: 10.1109/TITS.2016.2680242.

References

1. Bugrimov, V.A., Kondratyev, A.V. and Sarbaev, V.I. (2017), "Statisticheskaya osnova imitatsionnogo modelirovaniya sistemy upravleniya zapasami predpriyatiya avtoservisa" [Statistical basis of simulation modeling of the inventory management system of a car service enterprise], *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, no. 1, pp. 132–138.

2. Volgin, V.V. (2016), *Avtoservis: marketing i analiz* [Car service: marketing and analysis], Dashkov i K, Moscow, Russia.

3. Kramarenko, E.R., Novikov, A.N. and Panov, S.V. (2019), "Model' upravleniya zapasami v avtoservise" [Inventory management model in a car service], *Issledovanie i proektirovanie intellektual'nykh sistem* [Research and design of intelligent systems], pp. 128–131.

4. Solntsev, A.A., Zenchenko, V.A. and Gulyy, V.V. (2019), "Osnovnye podkhody i printsipy optimizatsii potrebnosti v zapasnykh chastyakh dlya dilerskoy seti STO" [Main approaches and principles for optimizing the need for spare parts for a dealer network of service stations], *Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa* [Problems of technical operation and car service], pp. 91–96.

5. Chen, C., Liu, Y. and Wang, X. (2021), "An integrated deep learning-based approach for automobile maintenance prediction with GIS data", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 216, art. 107919.

6. Riahi, Y., Saikouk, S. and Gunasekaran, A. (2021), "Artificial intelligence applications in supply chain: A descriptive bibliometric analysis and future research directions", *Expert Systems with Applications*, vol. 173, art. 114702.

7. Myakishev, V.S., Shatalov, A.I., Papaskua, A.A. and Pavlenko, V.M. (2021), "Upravlenie zapasami na predpriyatiyakh avtoservisa" [Inventory management at car service enterprises], *Upravlencheskiy uchet*, no. 7, pp. 247–253.

8. Kabikenov, S.Zh. (2025), "Prognozirovanie potrebnosti i optimizatsiya zapasnykh chastey dlya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta avtomobiley" [Forecasting demand and optimizing spare parts for vehicle maintenance and repair], *Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series*, vol. 151, no. 2, pp. 250–261.

9. Ivashchuk, O. (2023), "Podkhod k avtomatizirovannomu upravleniyu zapasami malogo avtoservisnogo predpriyatiya" [Approach to automated inventory management of a small car service enterprise], *Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve (ITNOP-2023)* [Information technologies in science, education and production (ITNOP-2023)], pp. 215–219.

10. Ishkin, Yu.D., Zakharov, N.S., Rassokhin, A.V. and Ishkina, E.G. (2025), "Vliyanie sezonnosti na formirovanie potrebnosti v zapasnykh chastyakh avtomobiley" [Influence of seasonality on the formation of demand for spare parts of cars], *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport*, no. 1, pp. 102–111.

11. Usmonov, M.T., Akhmatova, D. and Negmatova, S.E. (2024), "Issledovanie algoritmov mashinnogo obucheniya i analiz bol'shikh dannykh dlya prognozirovaniya sprosa i povedeniya klientov" [Research of machine learning algorithms and big data analysis for demand forecasting and customer behavior], *Mezhdunarodnyy zhurnal teorii noveyshikh nauchnykh issledovaniy*, vol. 1, no. 1, pp. 85–96.

12. Pivkin, K.S. (2018), *Modelirovanie pokupatel'skogo sprosa na predpriyatiyakh roznichnoy torgovli na osnove metodov mashinnogo obucheniya* [Modeling consumer demand in retail enterprises based on machine learning methods], Ph.D. Thesis, Izhevsk, Russia.

13. Mandala, V. (2024), "Revolutionizing Automotive Supply Chain: Enhancing Inventory Management with AI and Machine Learning", *Universal Journal of Computer Sciences and Communications*, vol. 3, no. 1, pp. 10–22. DOI: 10.31586/ujcsc.2024.918.

14. Lee, H.L. and Whang, S. (2019), "Machine learning for supply chain planning and operations: Challenges and opportunities", *Journal of Management Science and Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 173–186. DOI: 10.1016/j.jmse.2019.08.001.

15. Kumar, A. and Smith, R. (2020), "Predictive analytics in the automotive supply chain", *Journal of Business Logistics*, vol. 41, no. 1, pp. 52–69. DOI: 10.1111/jbl.12245.

16. Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai, E.W.T. and Papadopoulos, T. (2020), "Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications", *International Journal of Production Economics*, vol. 176, pp. 98–110.

17. Zhao, L. and Strotmann, H. (2022), "Artificial intelligence for forecasting in automotive industry supply chain management", *Operations Management Research*, vol. 15, no. 1–2, pp. 34–49. DOI: 10.1007/s12063-021-00176-7.

18. He, Y., Zhang, M. and Ren, S. (2021), "Artificial intelligence in inventory management: A review and future research agenda", *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 7, pp. 2108–2126. DOI: 10.1080/00207543.2020.1795616.

19. Lu, Y., Wang, X. and Huang, G.Q. (2017), "Big data-driven supply chain management: A state-of-the-art survey", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 428–441.

20. Choi, S. and Oh, S. (2017), "A hybrid forecasting model using machine learning for short-term traffic flow prediction", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 2271–2280. DOI: 10.1109/TITS.2016.2680242.

Giovanis S., Sarbaev V.I., Grishin A. S.

ADAPTIVE FORECASTING OF SPARE PARTS DEMAND WITH SEASONAL FACTORS BASED ON MACHINE LEARNING METHODS

Abstract*. The paper considers an approach to forecasting spare parts demand in car service centres under pronounced seasonality typical for the island economy of the Republic of Cyprus. The study addresses the need to reduce inventory holding costs and avoid stockouts in the context of high demand uncertainty. An adaptive forecasting system is proposed that employs multiple linear regression, random forest and recurrent neural networks to account for seasonal patterns, fleet age structure and additional operational factors. Forecasting models are developed and comparatively evaluated on historical demand data and related indicators. The results demonstrate that the use of machine learning methods leads to a noticeable improvement in forecast accuracy and key inventory management indicators, including service level and inventory turnover. Possible directions for further research are outlined, such as extending the set of input variables and applying ensemble approaches.*

Keywords*: machine learning, demand forecasting, inventory management, car service, seasonal demand fluctuations.*

Сведения об авторах:

Джованис Симос
Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация,
аспирант,
e-mail: singmanos@yahoo.com

Сарбаев Владимир Иванович
Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, профессор,
Профессор, доктор техн. наук
e-mail: visarbaev@gmail.com

Гришин Александр Сергеевич
Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация,

старший научный сотрудник, кандидат техн. наук
e-mail: agrishin@business-car.ru

Information about the author:

Giovannis Simos
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation,
Postgraduate Student,
e-mail: singmanos@yahoo.com

Sarbaev Vladimir Ivanovich
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, Professor
Dr. Sc. (Engineering), Professor,
e-mail: visarbaev@gmail.com

Grishin Aleksandr Sergeevich

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, Cand. Sc. (Engineering),
Senior Research Associate
e-mail: agrishin@business-car.ru

УДК 656.13

Чернышов А.В.

ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ АВАРИЙНОСТИ В СМЕШАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКАХ И ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Аннотация. *Развитие беспилотных технологий и стремление бизнеса повысить эффективность транспортных перевозок привели к началу процесса трансформации существующих транспортных потоков. В настоящее время наблюдается тенденция к преобразованию системы «однородный транспортный поток» в систему «транспортный поток беспилотных транспортных средств». Предполагается, что, в обозримом будущем, транспортный поток будет смешанным, т.е. состоящим, из беспилотных и управляемых человеком транспортных средств. Предсказуемо, что смешанный транспортный поток будет характеризоваться большей аварийностью, так как в таком потоке сохраняются факторы риска, присущие однородному потоку, а также появляются дополнительные факторы, характерные для смешанного потока. В работе рассмотрено формирование системы «смешанный транспортный поток», сформулирован фактор, влияющий на повышение аварийности в таких потоках. Этот фактор связан с увеличением разнообразия траекторий движения в смешанном транспортном потоке. Разнообразие обусловлено отсутствием стандартизации алгоритмического и технического обеспечения системы управления движением беспилотного транспортного средства. Также, в работе рассмотрена связь разнообразия и вероятности пересечения траекторий (вероятности столкновения). Предложено оценивать вероятность пересечения траекторий по изменению индекса разнообразия Шеннона во времени. Показано, что для индексов разнообразия Шеннона существуют различные аттракторы, характеризующие фазы транспортного потока: свободного и плотного. Для алгоритмов управления движением беспилотного транспортного средства, с целью снижения аварийности (снижения числа столкновений), сформулирована цель управления, заключающаяся в снижении разнообразия законов движения в смешанном транспортном потоке.*

Ключевые слова*: смешанный транспортный поток, разнообразие траекторий, безопасность движения, индекс разнообразия Шеннона.*

Введение

Развитие беспилотных транспортных средств (БТС) – одно из современных направлений цифровизации транспортного комплекса страны. Данная тенденция имеет глобальный характер, и лидерство в этом сегменте обеспечит для государства колоссальные экономические, социальные, экологические выгоды. В Российской

Федерации основные направления в транспортной политике, связанные с необходимостью развития БТС, отражены в Транспортной стратегии РФ (далее, Стратегии) на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [1]: к 2030 году предполагается постепенное формирование нормативно-правовой, нормативно-технической и законодательной базы для обеспечения регулирования в области использования беспилотных транспортных систем; по итогам реализации Стратегии к работе беспилотного транспорта должны быть подготовлены инфраструктура и телекоммуникационные составляющие ключевых автодорожных, железнодорожных и внутренних водных маршрутов и т.д. В целом беспилотному транспорту выделяется, если не ключевая, то, несомненно, одна из главных ролей в повышении качества жизни в части, зависящей от транспортного комплекса.

В частности, для беспилотных перевозок не планируется организация отдельных трасс: беспилотный автомобильный транспорт будет функционировать на автомагистралях федерального значения.

Формирование системы «смешанный транспортный поток».

Проблема определения системы «транспортный поток» заключается в поиске системообразующего фактора. Действительно, взаимодействие компонентов, как таковое, не может сформировать систему. Для того, чтобы образовалась система необходим системообразующий фактор – фактор, который избирательно «вовлекает» компоненты, образовывая систему, при помощи механизма, направленного на формирование устойчивых связей и освобождение от «ненужных» степеней свободы (Рис.1) [3].

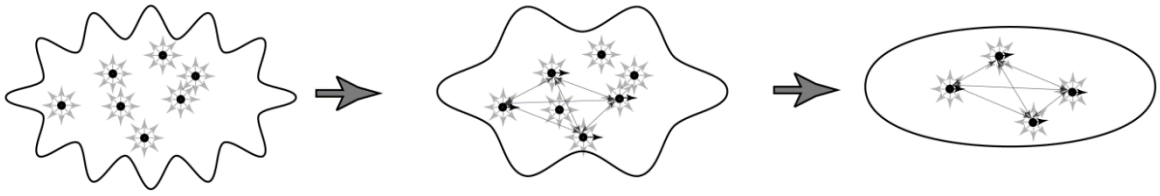


Рис. 1. Механизм формирования системы

Системообразующий фактор, формирующий систему «транспортный поток», может быть сформулирован следующим образом: массовая мобильность людей и грузов при наличии потребности человека и общества в перемещении. Фактически, это совокупность двух факторов: потребности человека и общества в перемещении и массовая мобильность людей. Массовая мобильность людей и грузов – следствие потребности человека и общества в перемещении. Потребность в перемещении, по своей сути, является одной из основных концепций, которая отражает фундаментальную роль транспорта в экономике и обществе. Потребность в перемещении обуславливает создание транспортной сети. К формированию транспортных потоков приводит наличие транспортной сети и массовая мобильность (Рис. 2). В этом смысле поток транспорта рассматривается отдельно от потока пешеходов, несмотря на то, и те и другие являются участниками дорожного движения. Однако в том случае, если пешеход следует по трассе, тогда он является компонентом транспортного потока. Действительно, если действует только фактор мобильности, то транспортный поток не может быть сформирован из-за отсутствия дорог, в то же время, при наличии транспортной сети, для создания транспортного потока, требуется наличие некоторого числа автомобилей, то есть ненулевая мобильность. Исходя из формулировки системообразующего фактора, сделаем вывод, что система «транспортный поток» состоит из такого числа

транспортных средств (ТС), которое бы обеспечило необходимую, для сохранения устойчивых связей между компонентами, плотность.

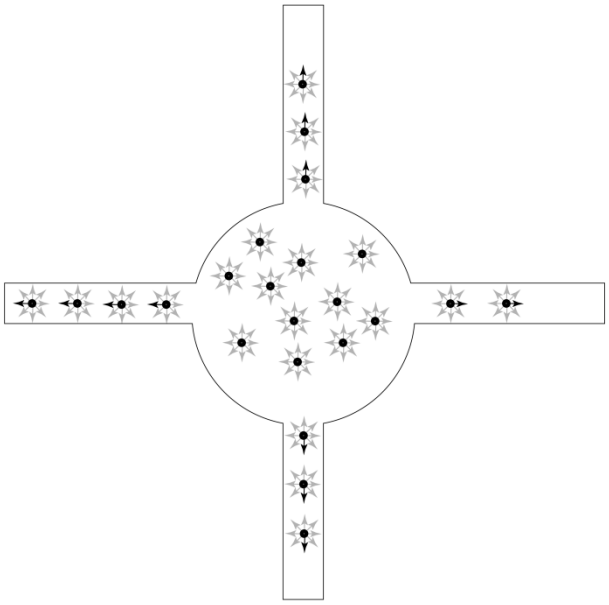


Рис. 2. Формирование транспортных потоков при наличии транспортной сети

Что касается внедрения беспилотного транспорта, то в Стратегии отмечается [1, с.155]: «…Высокоавтоматизированный и беспилотный транспорт позволит повысить эффективность и безопасность грузовых и пассажирских перевозок, а также удовлетворенность конечных пользователей услуг…» То есть, системообразующими факторами, приводящими к созданию беспилотных транспортных потоков, являются такие факторы как «повышение эффективности перевозок» и «повышение безопасности перевозок».

Наличие этих факторов и развитие технологий привели к началу процесса трансформации существующей системы «однородный транспортный поток» (под термином «однородный поток», в данной работе, мы понимаем транспортный поток управляемых человеком ТС) в систему «транспортный поток беспилотных ТС». Таким образом, вполне ожидаемо, что, в перспективе, транспортные потоки будут состоять исключительно из беспилотных автомобилей. В этом случае можно будет говорить об окончании процесса трансформации. Несмотря на взрывное развитие беспилотных технологий, мгновенный переход, от управляемого человеком транспорта к беспилотному, невозможен. Процесс трансформации будет занимать некоторое, вероятно, длительное время. Таким образом, предполагается, что в обозримом будущем транспортный поток будет смешанным, т.е. состоящим из беспилотных и управляемых человеком транспортных средств (рис.3). В рамках использования беспилотных транспортных средств на дорогах общего пользования, понятие смешанного потока может быть расширено. К двум, уже устоявшимся, определениям смешанного потока: а) мультимодальные перевозки и б) поток с различным типом транспорта, следует добавить третье: с) поток транспортных средств с различной степенью автоматизации управления движением. В связи с этим, возникает *новая задача,* заключающаяся в обеспечении безопасности движения в таких потоках.

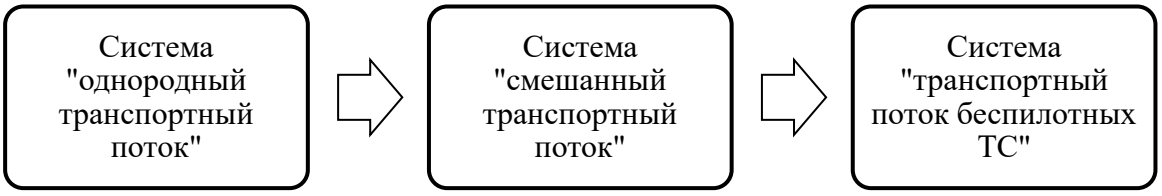


Рис. 3. Трансформация системы «однородный транспортный поток» в систему «транспортный поток беспилотных ТС».

Проблема повышения аварийности в смешанных транспортных потоках

Для решения поставленной задачи определим возможные *причины аварийности*, характерные для смешанного потока. Некоторыми зарубежными авторами [4] отмечается необходимость движения БТС в смешанном потоке на пониженной скорости, при которой обеспечивается снижение риска возникновения аварии за счет увеличения интервалов между ТС и снижения частоты перестроения. Однако реализация такого характера движения идет вразрез с п. 10.5 ПДД РФ [5], который запрещает создавать помехи другим транспортным средствам, двигаясь с излишне малой скоростью. В то же время, нельзя исключать тот факт, что БТС обязано двигаться, соблюдая правила, однако характер движения (закон изменения координат центра тяжести) может отличаться (иногда, существенно) от характера движения пилотируемых автомобилей. Такое отличие отражается на безопасности движения, так как приводит к увеличению разнообразия мгновенных скоростей транспортных средств в потоке. В работе [6] рассматривается вариационный размах и показана зависимость от этого параметра потока частных коэффициентов аварийности. Вместо размаха вариации, в данной работе, считаем целесообразным использовать характеристику разнообразие. Принципиальная разница между вариационным размахом и разнообразием заключается в полноте описания данных: размах — это разница между крайними значениями, а разнообразие — это характеристика того, как все значения распределены вокруг среднего. Размах показывает пределы, а разнообразие — структуру изменчивости. Другими словами, однородный и смешанный транспортные потоки, при постоянстве набора свойств, могут иметь различные параметры, в частности, параметры, характеризующие безопасность движения.

В книге Ф. Хейта [7] выделяются три основных свойства транспортного потока, характеризующие его как систему:

Неоднозначность, двойственность. Под этим свойством подразумевается:

- управление ТС осуществляется одновременно и со стороны водителя, и со стороны системы;
- неединственность цели управления (кроме цели управления «безопасность», существуют другие цели, например эффективность, заключающаяся в выборе оптимального маршрута);
- неоднозначная роль частного транспорта, заключающаяся в возникновении т.н. «парадокса удобства»: высокая популярность личного (частного) транспорта повышает мобильность отдельного человека, но приводит к пробкам и снижению общей скорости передвижения в потоке. Это происходит из-за того, что частный транспорт, предлагая комфорт и гибкость, увеличивает количество автомобилей на дорогах, в то время как общественный транспорт остается более доступным, но может быть менее привлекательным из-за ограниченной маршрутной сети или движения по расписанию.

Ограниченность. Под ограниченностью имеется в виду соизмеримость габаритов дороги и размеров транспортного средства. В этом случае, при неодинаковых законах изменения скорости транспортных средств, могут возникать заторы.

Пространственно-временная неоднородность. Различия в законах движения транспортных средств и их стохастичность приводят к формированию транспортного потока, плотность которого различна на разных участках дороги.

Ключевым параметром, характеризующим риск столкновения транспортных средств (риск возникновения ДТП) как в смешанном, так и однородном потоке, является вероятность пересечения траекторий в потоке. Это параметр связан со свойством «Пространственно-временная неоднородность».

Причина пересечения траекторий – выполнение маневров, обусловленных различиями в законах движения ТС. На формирование этих различий (формирование разнообразия) в законах движения, приводящих к возникновению риска ДТП, воздействуют несколько факторов (рис. 4): человеческий, технический, инфраструктурный и фактор внешней среды. В смешанном транспортном потоке сохраняются факторы однородного потока.



Рис. 4. Факторы, влияющие на величину риска возникновения ДТП в транспортном потоке. Фактор «Разнообразие законов движения БТС» - дополнительный фактор в смешанных потоках

Авторы обзора [8] отмечают, что в смешанном транспортном потоке ожидается риск возникновения ДТП больший, чем в однородном. В частности, указывается на отличный, от управляемых человеком транспортных средств, закон движения БТС на сложных участках автомагистралей (места слияния трасс, сужения, объезд препятствия). Конкретный критерий - более частая смена полосы движения в плотном потоке. Таким образом, с точки зрения анализа причин аварийности, можно сделать вывод о наличии дополнительного фактора, влияющего на риск возникновения ДТП (Рис. 4). Этот фактор обусловлен наличием БТС в транспортном потоке. С точки зрения стороннего наблюдателя, «картина» движения в потоке представляется следующей: на сложном

участке, человек-водитель вынужденно «подстраивается» под движение соседних ТС, а БТС, наоборот, начинает частые перестроения. В первом случае мы наблюдаем более «равномерный» поток, в то время как при частых перестроениях, «равномерность» снижается за счет увеличения разнообразия траекторий движения. Таким образом, можно предположить, что именно присутствие БТС в транспортном потоке является причиной увеличения разнообразия траекторий движения, которое обусловливает увеличение аварийности.

Прослеживается причинно-следственная связь между разнообразием траекторий и повышением аварийности в смешанных потоках: при увеличении плотности потока, движение БТС характеризуется частым маневрированием (сменой полосы движения), что, при разнообразии траекторий движения ТС в потоке, приводит к возникновению ДТП. То есть, разнообразие траекторий – фактор, влияющий на риск возникновения ДТП.

Появление дополнительного фактора в смешанном потоке может быть спрогнозировано и на основании следующих рассуждений. Законы движения БТС определены индивидуальными алгоритмами обработки информации, алгоритмами управления движением, набором датчиков и их типом, местами их установки и т.д. Отсутствие стандартизации в плане алгоритмов и технического обеспечения систем управления естественным образом приводит к возникновению разнообразия в законах движения БТС. Двигаясь в общем транспортном потоке и являясь частью системы «транспортный поток», беспилотные транспортные средства, за счет, присущего им разнообразия законов движения, увеличивают разнообразие законов движения всего потока, изменяя тем самым свойство пространственно-временной неоднородности и увеличивая величину вероятности возникновения ДТП.

На влияние этого фактора, косвенно, указывают исследования [9, стр. 61 рис. 4.2], где приводятся данные о линейном росте коэффициента аварийности при увеличении числа грузовых автомобилей в потоке.

Теоретическое обоснование связи разнообразия законов движения и вероятности возникновения ДТП может быть продемонстрировано на следующем примере. Исходим из того, что закон движения определяет траекторию движения ТС. Траектории могут быть заданы различными способами, в частности через мгновенные скорости в системе координат, связанной с дорогой. Учитывая дискретность данных, равенство двух и более мгновенных скоростей в i -й момент времени предполагает параллельность траекторий в момент времени $i + 1$.

Рассмотрим возможную аварийную ситуацию – столкновение двух ТС при движении в транспортном потоке в попутном направлении. Допустим, что поток состоит из m траекторий, тогда число возможных соседних пар $C = m - 1$.

Из возможных пар траекторий, потенциально пересекающимися будут пары (K), траектории которых отличаются:

Если пара, состоит из ТС, которые имеют в i -й момент одинаковые мгновенные скорости (разнообразие равно нулю), то в $(i + 1)$-й момент они не могут пересечься. В рассматриваемой задаче идентичность траекторий на протяжении всего времени движения предполагает их параллельность.

Ненулевое разнообразие законов движения в i -й момент времени обуславливает возникновение вероятности пересечения траекторий в последующие моменты времени.

На величину вероятности пересечения траекторий в транспортном потоке влияет не только значение К (число потенциально пересекающихся пар), но и неоднородность, характеризующаяся величиной разнообразия, мгновенных скоростей ТС (в частности, отклонение скорости каждого ТС от средней скорости потока), а также фаза движения потока (свободный или плотный). Современные исследователи (Б.С. Кернер и др.)

выделяют три фазы транспортного потока: свободный, синхронизированный и широкий движущийся кластер. Мы пока не рассматриваем подробно разнообразие на каждой фазе, поэтому для данного случая принимаем упрощенно. В качестве интегральной характеристики этих параметров потока можно использовать индекс разнообразия Шеннона [10]. Индекс разнообразия Шеннона традиционно применяется для оценки структурного разнообразия систем.

Таким образом, применение индекса разнообразия Шеннона для количественной оценки разнообразия законов движения в смешанном транспортном потоке, с точки зрения макроскопического подхода, представляет собой научную новизну исследования.

Использование индекса Шеннона предполагает наличие дискретных данных о мгновенных скоростях движения транспортных средств в потоке. Диапазон скоростей (от 0 до максимальной разрешенной) разбивается на k интервалов (например, с шагом 10 км/ч). Для каждого момента времени i рассчитывается доля транспортных средств p_i, попадающих в -й скоростной интервал. Тогда индекс разнообразия вычисляется по стандартной формуле:

$$H = -\sum_{i=1}^{k} p_i \log(p_i)$$

Величина разнообразия определяется численным значением индекса разнообразия, а фаза потока – характеристикой (типом) аттрактора, к которому «притягиваются» значения индекса разнообразия с течением времени. Приведем пример, иллюстрирующий различные аттракторы, характеризующие различные фазы транспортного потока: свободного и плотного (рис. 5). Данные для вычисления находятся в открытом доступе и взяты с сайта http://seutraffic.com.

Анализ аттракторов, построенных по данным временных рядов индекса Шеннона (Рис. 5) иллюстрирует их чувствительность к фазе транспортного потока. Для полос с плотным движением (6-8) характерен стохастичный аттрактор, что может свидетельствовать о непредсказуемой смене скоростных режимов и, предположительно, о повышенном риске возникновения аварийных ситуаций. На полосах, близких к свободному движению (1, 4, 5, 10), аттрактор регулярный. Таким образом, характер изменения индекса Шеннона во времени может рассматриваться как индикатор перехода потока в состояние, потенциально опасное с точки зрения аварийности.

Обеспечение безопасности движения в смешанных транспортных потоках

В российской нормативной базе определены следующие методы оценки безопасности движения по автомобильным дорогам:

а) выявление опасных участков автомобильных дорог при помощи комплекса методов, включающих в себя: анализ данных о ДТП; метод коэффициентов аварийности; метод коэффициентов безопасности; метод конфликтных ситуаций [11];

б) определение уровня безопасности участка автомобильной дороги по ряду критериев [12], оценивающих влияние человеческого, технического, инфраструктурного факторов, фактора влияния внешней среды, а также по показателю риска ДТП (это основной информативный критерий, обеспечивающий количественную и качественную оценку уровня безопасности).

Задача управления безопасностью сводится к устранению и профилактике участков концентрации ДТП, а также к мероприятиям по повышению безопасности дорожного движения.

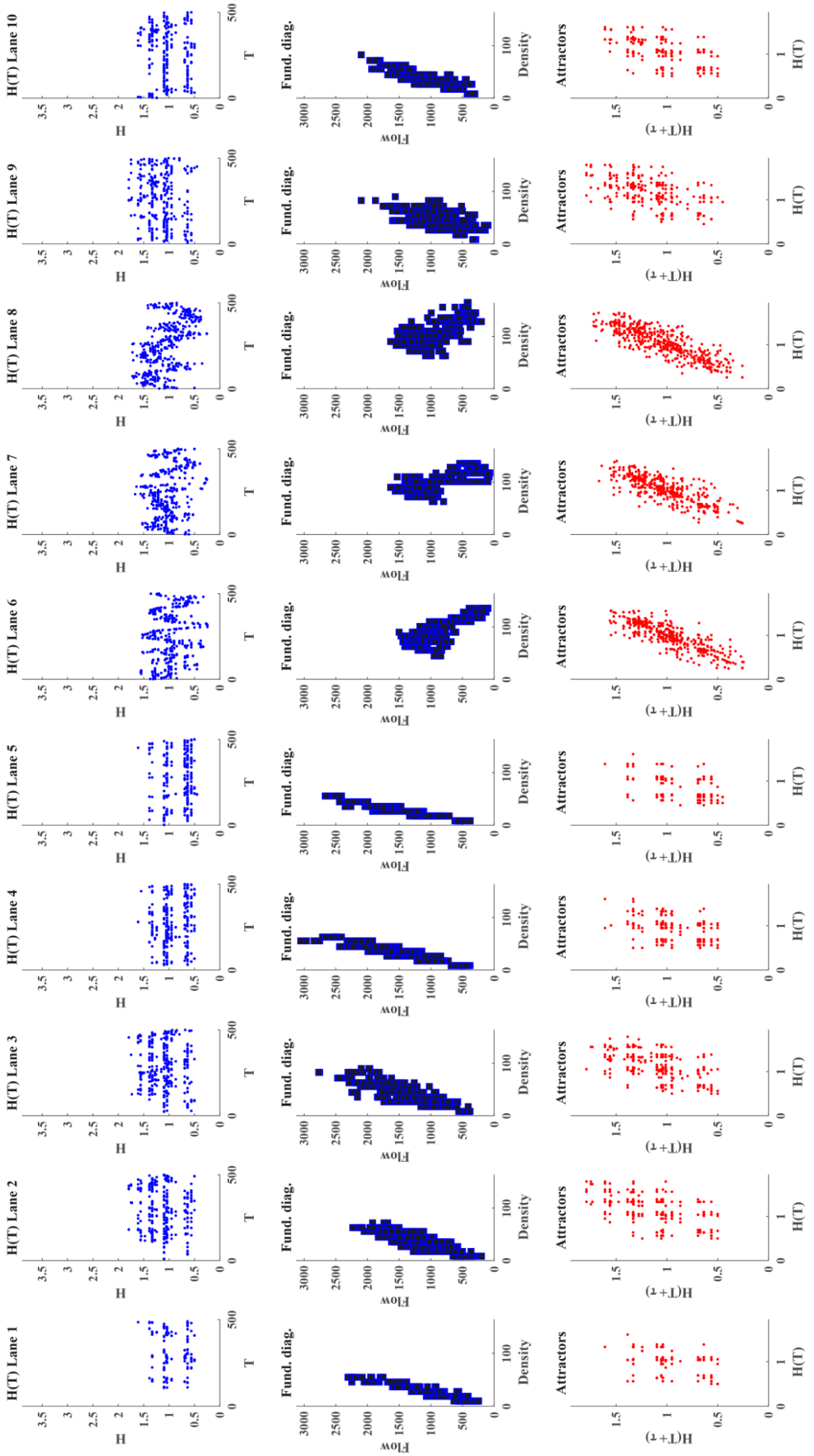


Рис. 5. Анализ транспортного потока (10 полос) из датасета с сайта http://seutraffic.com. Показано изменение индекса разнообразия Шеннона (H) от дискретного времени (T). Для каждой полосы движения приведена фундаментальная диаграмма и псевдофазовое пространство. Фазы транспортного потока: по полосам 2,3,9 – переходный: от свободного к синхронизированному, по 6-8 полосам – плотный (синхронизированный, с переходом к широкому движущемуся кластеру, по классификации Кернера), по полосам 1,4,5,10 – близкий к свободному

Основополагающие данные в существующей методологии оценки и управления безопасностью движения – статистика дорожно-транспортных происшествий. Имея, в качестве исходных данных, статистику ДТП, существующая методология направлена на совершенствование правил дорожного движения, совершенствование инфраструктуры, разработку мероприятий для снижения человеческого и технического факторов, фактора внешней среды, то есть на минимизацию четырех факторов, характерных для однородного потока (рис. 4). В смешанном потоке, к известным факторам однородного потока, добавляется новый фактор «Разнообразие законов движения БТС», приводящий к увеличению разнообразия законов движения ТС в потоке. Эффективность существующей системы управления безопасностью движения в смешанных транспортных потоках будет ниже, так как она не учитывает дополнительного фактора. Если минимизировать влияние дополнительного фактора, можно будет эффективно использовать существующую систему управления безопасностью движения.

Увеличение разнообразия состояний управляемой системы определяет необходимость повышения сложности системы управления безопасностью движения. Это следует из закона необходимого разнообразия Эшби [12]. Это может быть выражено в добавлении пунктов, касающихся движения БТС в смешанном потоке, в ПДД РФ, введении стандартов на алгоритмы управления и техническое оснащение БТС, разработке мероприятий, приводящих к уменьшению разнообразия законов движения БТС в смешанном потоке, то есть к минимизации фактора «Разнообразие законов движения БТС».

Выводы

В работе теоретически обосновано, что внедрение беспилотных транспортных средств с нестандартизированными алгоритмами управления вносит дополнительный вклад в разнообразие траекторий движения, что является фактором потенциального повышения аварийного риска в смешанных транспортных потоках.

Предложен подход к количественной оценке разнообразия траекторий на основе индекса Шеннона. Описана процедура вычисления этого индекса.

На основе анализа данных открытого источника [14] показано, что аттрактор индекса Шеннона чувствителен к фазе транспортного потока: для плотного движения характерен стохастичный аттрактор, для свободного — регулярный. Это позволяет рассматривать динамику изменения аттрактора как индикатор перехода потока в потенциально более опасное состояние.

Предлагается для повышения эффективности управления безопасностью в смешанном потоке дополнить нормативную базу требованиями, ограничивающими рост разнообразия траекторий (например, путем стандартизации алгоритмов управления движением БТС в плотном потоке).

Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р.

2. Семенов В. В. Смена парадигмы в теории транспортных потоков. – Москва : ИПМ им. М.В. Келдыша, 2006. – 32 с. – (Препринт ; № 046).

3. Анохин П. К. Очерки по физиологии функциональных систем. – Москва : Медицина, 1975. – 448 с.

4. He Y., Xiang D., Wang D. Traffic safety evaluation of emerging mixed traffic flow at freeway merging area considering driving behavior // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. 10686. – DOI: 10.1038/s41598-025-94658-y.

5. О Правилах дорожного движения : Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090 (ред. от 16.07.2025, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2025) // Собрание актов Президента и Правительства РФ. – 1993.

6. Бакланова К. В. Влияние параметров транспортного потока и характеристик дорог на безопасность дорожного движения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 2. – С. 99–110. – DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99.

7. Haight F. A. Mathematical Theories of Traffic Flow. – New York : Academic Press, 1963. – 242 p.

8. Zeyang Ch., Jinyang Zh., Zhongxiang F., Mengmeng Y., Weihua Zh., Jin Ch. Driving safety risk analysis and assessment in a mixed driving environment of connected and non-connected vehicles: a systematic survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2025. – Vol. 26, No. 5. – P. 5747–5780.

9. Бабков В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения : учебник для вузов. – Москва : Транспорт, 1993.

10. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // The Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, No. 3. – P. 379–423. – DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

11. ОДМ 218.4.005-2010. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах : отраслевой дорожный методический документ.

12. ОДМ 218.4.004-2009. Руководство по устранению и профилактике возникновения участков концентрации ДТП при эксплуатации автомобильных дорог : отраслевой дорожный методический документ.

13. Ashby W. R. Introduction to Cybernetics. – London : Chapman & Hall, 1956. – 295 p.

14. Feng R., Zhu H., Sze N. N., Wang S., Li Z. Ubiquitous Traffic Eyes: trajectory dataset focus on multiple traffic states and state transition on urban expressways // Transportation Letters. – 2026. – Vol. 18, No. 2. – P. 446–462. – DOI: 10.1080/19427867.2025.2559276.

References

1. Government of the Russian Federation (2021), *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda* [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035], approved by Order No. 3363-r dated November 27, 2021.

2. Semenov, V.V. (2006), *Smena paradigmy v teorii transportnykh potokov* [Paradigm shift in the theory of traffic flows], Preprint No. 046, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia.

3. Anokhin, P.K. (1975), *Ocherki po fiziologii funktsional'nykh sistem* [Essays on the physiology of functional systems], Meditsina, Moscow, Russia.

4. He, Y., Xiang, D. and Wang, D. (2025), "Traffic safety evaluation of emerging mixed traffic flow at freeway merging area considering driving behavior", *Scientific Reports*, vol. 15, art. 10686. DOI: 10.1038/s41598-025-94658-y.

5. Government of the Russian Federation (1993), "O Pravilakh dorozhnogo dvizheniya" [On the Rules of the Road], Decree No. 1090 dated October 23, 1993 (as amended on July 16, 2025).

6. Baklanova, K.V. (2023), "Vliyanie parametrov transportnogo potoka i kharakteristik dorog na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya" [Influence of traffic flow parameters and road characteristics on road safety], *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, no. 2, pp. 99–110. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99.

7. Haight, F.A. (1963), *Mathematical Theories of Traffic Flow*, Academic Press, New York, USA.

8. Zeyang, Ch., Jinyang, Zh., Zhongxiang, F., Mengmeng, Y., Weihua, Zh. and Jin, Ch. (2025), "Driving safety risk analysis and assessment in a mixed driving environment of connected and non-connected vehicles: a systematic survey", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 26, no. 5, pp. 5747–5780.

9. Babkov, V.F. (1993), *Dorozhnye usloviya i bezopasnost' dvizheniya* [Road conditions and traffic safety], Transport, Moscow, Russia.

10. Shannon, C.E. (1948), "A mathematical theory of communication", *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

11. ODM 218.4.005-2010 (2010), *Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh* [Recommendations for ensuring traffic safety on highways], industry road methodological document.

12. ODM 218.4.004-2009 (2009), *Rukovodstvo po ustraneniyu i profilaktike vozniknoveniya uchastkov kontsentratsii DTP pri ekspluatatsii avtomobil'nykh dorog* [Guidelines for the elimination and prevention of accident concentration areas during highway operation], industry road methodological document.

13. Ashby, W.R. (1956), *Introduction to Cybernetics*, Chapman & Hall, London, UK.

14. Feng, R., Zhu, H., Sze, N.N., Wang, S. and Li, Z. (2026), "Ubiquitous Traffic Eyes: trajectory dataset focus on multiple traffic states and state transition on urban expressways", *Transportation Letters*, vol. 18, no. 2, pp. 446–462. DOI: 10.1080/19427867.2025.2559276.

Chernyshov A.V.

SAFETY DECREASING PROBLEM IN MIXED TRAFFIC FLOW AND POTENTIAL WAY TO SOLVE IT

***Abstract**. The development of pilotless technologies and the desire of businesses to increase the efficiency of transportation have led to the beginning of the process of transformation of existing traffic flows. Currently, there is a tendency to transform the "HDV's traffic flow" system into the "traffic flow of AV" system. Obviously, the transformation process will take some time, so it is assumed that, in the foreseeable future, the traffic flow will be mixed, i.e. consisting of AV and HDV. Predictably, a mixed traffic flow will be characterized by a higher accident rate, since such a flow retains the risk factors inherent in a HDV's flow, as well as factors characteristic of the flow of AVs. The paper considers the formation of the "mixed traffic flow" system, and formulates a factor influencing the increase in accidents in such flows. This factor is associated with an increase in the diversity of traffic paths in a mixed traffic flow. The diversity is due to the lack of standardization of algorithmic and technical support for the motion control system of an AVs. Also, the paper considers the relationship between diversity and the probability of intersection of trajectories (probability of collision). It is proposed to estimate the probability of crossing trajectories by changing the Shannon diversity index over time. It is shown that for the Shannon diversity indices there are various attractors characterizing the phases of the traffic flow: free and dense. For algorithms for controlling the movement of an AVs, in order to reduce accidents (reduce the number of collisions), the control goal is formulated, which is to reduce the diversity of traffic laws in a mixed traffic flow.*

***Keywords**: mixed traffic flow, variety of trajectories, traffic safety, Shannon index of diversity.*

Сведения об авторе

Чернышов Андрей Владимирович
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия
доцент
к.т.н.,
e-mail: andrey.chernyshov5@mail.ru

Information about the author

Andrey V. Chernyshov
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
associate professor,
Candidate of Technical Science,
e-mail: andrey.chernyshov5@mail.ru

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.025

Глинский В.А.

ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ В СИНХРОМОДАЛЬНОЙ ТЕРМИНАЛЬНОЙ СЕТИ

Аннотация. *В статье представлен анализ динамических систем доставки грузов в транспортно-терминальной сети (ТТС) синхромодальных перевозок (Synchromodal transportation - ST). Рассматриваются параметры трех взаимосвязанных характеристик ST-сети: критерии интегрированной сетевой организации; критерии полносвязной топологии сети; критерии динамической маршрутизации. Новизна работы состоит в том, что на основе метрик расширенного определения ST показано, что в условиях многокритериальности и неопределённости ТТС продуктивность процедуры выбора оптимального маршрута связана с применением эвристических методов ранжирования узловых терминалов ST-сети в фазовом пространстве их ключевых показателей эффективности (KPI). Установлены варианты параметров KPI терминалов ST- сети. Рекомендованы детали процедуры реализации нечеткой задачи маршрутизации «динамического входа» в ST-сеть нового эвристического алгоритма «Лазертаг» (фасетная классификация параметров KPI, временные окна, телематическая логистическая структура реального времени типа «Control Tower», алгоритм группировки терминалов k-means при зонировании ТТС).*

Ключевые слова: *сетецентрическое управление (СЦУ); синхромодальные перевозки (ST); динамическая эвристическая многокритериальная маршрутизация; клиентоцентризм, фасетная классификация; мультиагентные технологии; интероперабельность.*

Актуальность и постановка задачи

В мультимодальных схемах перевозок после прохождения определенного этапа маршрута доставки (транспортной моды) груз передается в сетевой терминал, откуда далее доставляется уже другим видом транспорта. Синхромодальная перевозка (ST) - это вариант мультимодальной перевозки в мезологистической системе транспортно-терминальной сети (ТТС) с переключения работы в режим реального времени при определении оптимального маршрута. Мезологистическая система ТТС— это объединение нескольких предприятий по цепи поставок на принципах взаимовыгодного партнерства путем согласованного логистического сетецентрического управления (СЦУ).

ТТС ST формирует единое информационное пространство (ЕИП) синергетической коалиции интеллектуальных узловых агентов сети. Специфика проактивности интеллектуальных агентов терминального узла ТТС подразумевает реакцию на события и возможность генерировать новые цели. Каждый объект сети имеет своего агента, управляющего программными компонентами, отражая параметры своего узла.

Эффективность СЦУ сетью определяется связанностью всех сетевых подсистем в интересах всех участников экосистемы торгово-транспортной операции (ТТО).

Цифровые платформы закладывают основу для новых функционалов мезологистических систем доставки грузов. В ТТС ST формируется формат клиентоцентрических экосистем - Альянс перевозчиков и грузовладельцев. Таким образом, ТТС ST — это вид мультимодальных перевозок, когда выбор последующей транспортной моды основан на моментальных оценках в ЕИП состояния сети с учетом оптимальных интересов каждого участника клиентоцентрического Альянса.

Транспортно-терминальная ST сеть – это совокупность узлов - вершин графа (терминалов) и маршрутов (ребер графа), связывающую участников ТТС в ЕИП на условиях партнерства. СЦУ ТТС основано на информационном взаимодействии всех элементов терминальной системы (интероперабельность) через телематические комплексы и диспетчерскую структуру «Control Tower», формирующую дополнительные связи в ЕИП ТТС ST.

Использование классических алгоритмов (линейное программирование, программирование с ограничениями), которые перебирают все возможные решения для выявления оптимального маршрута в ТТС ST в оперативном режиме реального времени, практически исключено. Поиск оптимального маршрута производится эвристическими алгоритмами, которые не имеют строгого математического обоснования, но позволяют упростить и ускорить расчеты за счет в представления многообразия свойств ST в упрощённом виде комплексных критериев, объединяющих нескольких значимых параметров ST (агрегирование).

Анализ последних исследований

Проведенный анализ современных научных публикаций [1-15] позволяет выявить ключевые тенденции в развитии клиентоцентрических мезологистических экосистем и методов динамической маршрутизации в ТТС ST. Исследования демонстрируют переход от традиционных подходов к комплексным интеллектуальным системам, основанным на принципах интегрированной логистики, цифровизации, полносвязности и адаптивности.

При синхромодальных перевозках (ST - Synchromodal transportation) выбор транспорта осуществляется в режиме реального времени, акцентируя внимание на актуальных рыночных условиях и текущих параметрах логистических цепей [1]. Переключение между различными видами транспорта на любом из возможных этапов логистической цепи позволяет повысить уровень и эффективность логистических операций [2] (минимизация логистических издержек за счет оптимизации сетевой доставки). Ключевым фактором успеха становится развитая терминальная сеть с интеллектуальными транспортными узлами и инструментами для оптимизации маршрутов [3]. Сетевая организация, топология сети и динамическая маршрутизация являются ключевыми элементами, на которых базируется оценка качества ТТС [4].

Проведенный анализ позволяет сформулировать новое определение ST, содержащее перечень *необходимых и достаточных свойств ST*: ST - транспортно-логистическая модель, реализуемая в ЕИП (едином информационном пространстве) мультимодального альянса перевозчиков, с отличительной чертой расширения мультимодального формата за счет СЦУ во взаимосвязанной (полносвязной) терминальной сети (сетевая организация) класса Mesh [5] для работы в режиме реального времени, когда параметры оптимальной перевозки определяются в оперативном режиме (динамическая маршрутизация сети). Это переводит задачу маршрутизации транспорта (ЗМТ) в ТТС ST к недетерминированным, в которых планировщик не владеет полной информацией о маршруте транспортного средства вплоть до начала осуществления заданного маршрута.

Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи транспортной маршрутизации представлен в работах [6-20]. Интегрированная логистика ST сосредоточена на синхронизации и интеграции участников цепочки поставок. Взаимосвязанная логистика ST подчеркивает важность сотрудничества и взаимодействия между участниками. Интегрированная и взаимосвязанная логистика и ST предполагают сотрудничество и гибкость при использовании сетевых принципов продвижения грузов [21-23].

Проведенный анализ подтверждает, что современное развитие терминальных логистических систем характеризуется интеграцией концептуальных основ сетевой организации, методов оптимизации и цифровых технологий, что создает предпосылки для создания гибких, устойчивых и эффективных транспортно-логистических систем.

Цель, задачи исследования и научная новизна работы

Целью работы является разработка варианта эвристической оценки маршрутной привлекательности узловых интеллектуальных агентов в ST-сети при пошаговой передаче груза от одного терминала ТТС к следующему. Для этого потребуется выявить специфические ключевые показатели эффективности KPI (Key Performance Indicators) ST-сети, а также произвести разбиение ТТС на зоны (зонирование) с временными окнами для создания более управляемых сегментов сети, что повысит безопасность, улучшив управление трафиком.

Задача исследования состоит в изучении методов поиска оптимальных маршрутов путем формализации экспертной информации при выборе оптимальных параметров доставки грузов с учетом трех взаимосвязанных элементов оценки качества мезологистической системы ST ТТС: организации, топологии взаимосвязанной сети и динамической маршрутизации. Малоинформативные параметры ST исключаются из рассмотрения (элиминирование).

Новизна исследования заключается в агрегировании ST с использованием элиминированного набора наиболее информативных параметров KPI для системы количественного оперативного оценивания рейтинга (агрегирование) интеллектуальных узловых агентов ТТС, что позволяет корректировать динамическую маршрутизацию в ST-сети. Проведенный анализ выявленных наиболее информативных параметров ST позволил классифицировать новый набор KPI (фасет) в терминологии нового расширенного определения ST [5, 21].

Дополнительно в статье сформулированы предложения о внедрении в ТТС логистической структуры типа «Control Tower» и зонирования ST-сети с временными окнами.

В условиях многокритериальности и неопределённости ТТС процедуры выбора оптимального маршрута с применением эвристических методов ранжирования узловых терминальных агентов сети ST будут более продуктивны в сравнении с классическими методами, что придает практическую значимость данной работе.

Предлагаемый в работе инструментарий ST позволяет реализовать наиболее эффективный синергетический для участников торгово-транспортной операции (ТТО) режим консолидации и расконсолидации с учетом конкретных условий ТТО.

Основная часть. Методы поиска оптимального маршрута в ТТС

ST интегрируют в себя множество субъектов транспортного рынка (от грузовладельцев и экспедиторов-операторов грузовых перевозок, перевозчиков различных транспортных мод и операторов инфраструктуры до страховых компаний и банковских структур).

От правильности выбора маршрутов в конкретных условиях ST зависят многие коммерческие параметры: от планирования и контроля сроков до процедур «последней мили». Для количественной оценки эффективности ТТС используются интегральные наиболее информативные параметры - ключевые показатели эффективности KPI.

Традиционно при поиске оптимального маршрута в терминальной сети привлекаются методы и инструментарии классического комбинаторного метода и мультиагентных технологий [6, 7]. Классическая задача коммивояжера подразумевает поиск кратчайшего маршрута через все заданные промежуточные пункты транспортно-терминальной сети [8].

Каждая сеть состоит из трех основных компонентов: потока, узлов и дуг. Математическое моделирование мультимодальных сетей – поиск маршрута с использованием метода расчета L-кратчайших маршрутов [8 - 19] - L-концепция оптимального маршрута в настоящее время является приоритетной. В синхромодальной сети такой подход не является столь однозначным. В мультиагентной системе каждый участник ST-сети (интересант потока, узлов или дуг), преследуя свою цель, формирует в ЕИП согласованное и откорректированное решение (по формуле «один за всех и все за одного»), позволяющее на основе синергии обеспечить сокращение издержек и эффективность загрузки транспортных средств во всей ТТС [20 - 25].

Взаимосвязь потока, узлов и дуг проста: поток проходит между узлами по дугам. Анализ ST-сети [4, 5, 21, 25] предполагает три основных элемента:

1. Сетевая организация;
2. Топология сетей;
3. Маршрутизация во взаимосвязанной сети.

Первый элемент оценки качества ST – сетецентрическое управление (СЦУ). ST реализуется в ЕИП мультимодального альянса перевозчиков на основе принципов СЦУ в полносвязной терминальной сети (сетевая организация и топология).

Ключевыми свойствами организационного обустройства ТТС ST являются: интероперабельность (способность членов ТТС к обмену и использованию информации) объединения всех участников торгово-транспортной операции в ЕИП на базе цифровых логистических платформ (ЦЛП); адаптивность ТТС (способность системы видоизменяться); проактивность ТТС (способность мультиагентов самостоятельно инициировать действия в интересах всех членов ТТС) [21, 28]. Суть сетецентрического управления заключается в проявлении новых инструментов цифровой логистической экосистемы, таких как ЦЛП, мультиагентные технологии, что способствует формированию развитого ЕИП, позволяет оптимизировать взаимодействие участников ТТС и повысить синергию сетевых логистических операций.

Принцип полносвязной сети основан на топологии Mesh-графа [5]– второй элемент качества ST, где каждый узел взаимодействует с другими без централизованной иерархии. Метод достаточно сложен в настройке, но высоко устойчив, гарантируя широкий выбор трафика внутри ТТС из-за многовариантности межтерминальных связей [23, 25, 26].

Третий элемент оценки качества, определяющий внешний признак ST - свобода выбора маршрута, - представляет собой динамическую маршрутизацию (и «взаимосвязан» с первым элементом – СЦУ через такой параметр его многофакторной метрики, как клиентоцентризм). Остановимся подробнее на третьем элементе оценки качества ST.

Динамическая маршрутизация в ST-сети

Задача маршрутизации транспорта (ЗМТ)— Vehicle Routing Problem (VRP) состоит в определении оптимальных маршрутов продвижения грузов через пункты погрузки, консолидации, разгрузки и расконсолидации, что позволяет реализовать наиболее

эффективный синергетический для участников ТТО сетевой режим. На практике математическое описание и поиск возможных решений недетерминированных задач в ТТС ST являются более сложным, поскольку данные для маршрутизации расплывчаты, неясны, недостаточны, или неоднозначны. При этом возникает необходимость в постановке нечеткой задачи маршрутизации транспорта FVRP (Fuzzy Vehicle Routing Problem [27-31].

Для решения таких недетерминированных задач FVRP необходимо ввести новые модели и алгоритмы нечеткого программирования (см. Таблицу 1). В настоящее время исследования FVRP в основном сосредоточены на нечетком спросе, нечетких временных окнах, нечетком времени в пути и нечетком времени обслуживания [27-30].

Таблица 1

Нечеткая задача маршрутизации транспорта FVRP

Тип FVRP	Описание	Используемые алгоритмы
Нечеткий спрос VRP with fuzzy demands (VRPFD)	Клиенты определены, но их точный спрос является неопределенным.	Алгоритмы: гибридный генетический, муравьиный и эволюционный алгоритмы, оптимизация роя частиц.
Нечеткие временные окна VRP with fuzzy time windows (VRPFTW)	Нечеткими считаются время прибытия, либо верхние и нижние границы временных окон.	Многоэтапная эвристика, метод оптимизации роем частиц, алгоритм стаи волков.
Нечеткое время в пути VRP with fuzzy duetime (VRPFDT)	Временные окна заменяются нечеткими сроками.	Эвристический алгоритм вставки, муравьиный алгоритм, генетический алгоритм.
Нечеткое время обслуживания. VRP with fuzzy travel time (VRPFT)	ЗМТ с нечетким временем пути.	Алгоритм Кларка-Райта, алгоритм империалистической конкуренции и гибридный генетический алгоритм.
Нечеткое время обслуживания заказа VRP with fuzzy service time (VRPFST)	Нет точной информации о времени обслуживания, необходимом для каждого поступающего заказа.	Нечеткий муравьиный алгоритм со встроенной процедурой кластерной вставки.

Комплексный анализ и классификация современных интеллектуальных систем поддержки принятия логистических решений с используемыми алгоритмами представлены в работах [30, 31].

Эвристический вариант поиска оптимальных маршрутов

Рассмотрим эвристический вариант поиска оптимальных маршрутов путем формализации экспертной оценки критериев из указанных выше трёх взаимосвязанных групп элементов качества синхромодальной терминальной сети: сетевой организации, топологии сети и маршрутизации во взаимосвязанной сети [4, 5, 21, 23, 27-29].

В качестве критериев оценки эффективности процессов и определения стратегических целей ST-сети воспользуемся ключевыми показателями эффективности

KPI (Key Performance Indicators) и критическими факторами успеха CSF (Critical Success Factors).

Метрики KPI помогают отслеживать текущие результаты, выявлять слабые места и разрабатывать стратегии для улучшения ряда логистических бизнес-процессов (см. Таблицу 2), однако KPI стоит периодически детализировать при описании конкретных синхромодальных систем.

Таблица 2

Распространенные KPI в транспортной логистике [27]

Вид KPI	Название KPI	Контролируемые параметры	Целеполагание
On-time Delivery	Своевременность доставки	% заказов, доставленных в срок	Оценка надежности
Cost per Delivery	Стоимость доставки	Средняя стоимость доставки единицы груза	Контроль расходов и оптимизация процесса
Capacity	Пропускная способность	Максимальный объем заказов, обрабатываемый ТТС за определённое время	«потолок» возможностей системы
Capacity Utilization	Уровень утилизации	Фактическое использование доступных мощностей	% загрузки транспорта относительно его полной вместимости
Transit Time	Время в пути	Среднее время доставки груза от отправителя к получателю	Влияет на удовлетворенность клиентов
Damage or Loss Rate	Уровень повреждений или потерь	% поврежденных или потерянных товаров во время транспортировки	Критично для сохранности товаров
On-time Shipping	% своевременных отгрузок	% товаров, отправленных в оговоренные сроки	Критично для сохранности товаров
Customer Satisfaction Score	Обратная связь от клиентов	Удовлетворенность клиентов от полученного сервиса	Включает время доставки, состояние товара и общую логистику
Average Miles per Vehicle	Средний километраж на одну машину	Среднее расстояние, которое транспортное средство проходит за определенный период	Помогает оценить эффективность использования автопарка
Perfect Order Index	Выполненный заказ	Доля заказов, доставленных вовремя и в полном объеме	Критично для сохранности товаров

KPI - это ключевые показатели эффективности, выраженные количественно (например, в %), что позволяет объективно оценивать результаты работы логистической системы.

Метрики CSF (критические факторы успеха) – это критерии стратегических задач и результатов деятельности, к которым логистическая система должна стремиться для повышения своей конкурентоспособности и эффективности.

Вместе CSF и KPI создают комплексную систему для коммерческого успеха системы: CSF обеспечивают стратегическое направление, а KPI - средства для измерения критериев прогресса (Таблица 3).

Основные критические факторы успеха CSF ST (Critical Success Factors) для ST-сети рассмотрены в [21].

KPI помогают отслеживать прогресс в достижении CSF, выявлять области улучшения и принимать обоснованные решения.

Таблица 3

Особенности KPI и CSF

Специфика KPI	Специфика CSF
Анализ аспектов бизнеса (доход, прибыль, охват рынка, интероперабельность, адаптивность, проактивность).	Отражают аспекты деятельности организации (качество товаров, маркетинг, производство, сбыт, учёт).
Мониторинг эффективности бизнес-процессов, проектирования и управления.	В качестве CSF могут выступать цели внедрения новых технологий, укрепления бренда, повышения качества и т. д.
Могут быть отстающими (показывают результат предыдущей деятельности) и опережающими, прогнозирующими будущие показатели.	В дереве целей CSF располагаются на третьем уровне, после миссии компании и основных стратегических целей, которые детализируют CSF.

Таким образом, KPI и CSF связаны, но имеют разные функции: CSF определяют, что нужно достичь и помогают определить ключевые области и факторы, которые влияют на успех организации, обеспечивая стратегическую основу фокусирования на важнейших областях. KPI измеряют прогресс в достижении CSF.

Оба понятия используются в управлении организацией для измерения и оценки эффективности. Ключевые показатели эффективности KPI и критические факторы успеха CSF отличаются целями и характером (Таблица 4).

Таблица 4

Сравнение CSF (Critical Success Factors) и KPI (Key Performance Indicators)

Показатель /Атрибут	CSF критические факторы успеха	KPI ключевые показатели эффективности
Определение	Critical Success Factor	Key Performance Indicator
Цель	Определить области, имеющие решающее значение для успеха проекта или организации.	Измерить эффективность и прогресс в достижении оперативных целей стратегической направленности.
Временные рамки	Долгосрочные Strategic.	Краткосрочные Operational.
Измерение	Качественное или количественное.	Количественное.
Временные рамки Timeframe	Долгосрочные Long-term.	Краткосрочные Short-term
Зависимость Dependency	CSF зависят от внешних факторов.	Ключевые показатели эффективности KPI зависят от CSF.
Примеры	Удовлетворенность клиентов, вовлеченность сотрудников.	Выручка от продаж, уровень удержания клиентов.

Понимание различий и связи между CSF и KPI имеет важное значение для эффективного обустройства ST-сети. Основные критические факторы успеха CSF ST-сети, раскрытые автором в работе [21], иллюстрирует Таблица 5.

Таблица 5

Основные критические факторы успеха CSF синхромодальной логистики ST

CSF(Critical Success Factors)	Суть критических факторов успеха CSF
Сеть (СЦУ-сетецентрическое управление	Заинтересованное сотрудничество участников ТТО, доверие сторон, взаимовыгодное интегрирование подсистем сети.
Сложное планирование мультиагентской сети	Динамического планирования в режиме реального времени с учетом структурной топологии транспортно-логистической сети (ТЛЦ).
Конфигурация сети	Создание интеллектуальных узлов и межузловых коридоров и оптимальной топологии.
Правовая основа. Внедрение концепции триединства [21]	Межправительственные транзитные и таможенные соглашения нейтральной среды мультимодального альянса ТЛЦ с использованием ДСП. Концепция триединства предполагает возможность проведения консолидации.
Принятие принципов динамической маршрутизации	Сосредоточенность Клиента только на основных решениях: - место доставки; ожидаемое время прибытия; затраты.
Ценообразование	Ценообразование сложным образом зависит от режимов, избираемых оперативно во времени.

Алгоритм динамического входа в зональную ST-сеть «Лазертаг» (Рис.1).

Эвристики не дают точного описания порядка действий для решения задачи и должны быть дополнителнены конкретной кинетикой управляющих параметров. Тем не менее эвристические алгоритмы ЗМТ позволяют находить приближённые решения для сложных задач. Для эвристических методов источником информации является субъективные экспертные оценки исследуемого объекта, предполагающие «возникновение догадок» о подобии математического описания явлений на основе интуитивной образной ассоциации эксперта (в нашем случае со стратегией игры лазертаг – Рис.1). Напомним, что в лазертаге в отличие от пейнтбола игроки используют лазерные бластеры и специальные датчики, выбирая в динамическом режиме наиболее приоритетные цели.

На Рисунок 1 условно показано, что в первой зоне агрегированные ключевые показатели эффективности KPI (до комплексного показателя рейтинга R_k k-ого узлового интеллектуального агента) приводят к выбору терминала с максимальным рейтингом (k=49) как узлового терминала первой зоны с наибольшей маршрутной привлекательностью. Временное окно составляет время пребывания груза на этом терминале, включая консолидационные операции. Далее первая зона «свободна» и наступает время подачи в первую зону следующего груза с воспроизведением оценки маршрутной привлекательности, в то время как первый груз уходит во вторую зону с воспроизведением описанной процедуры с выбором узла k=56.

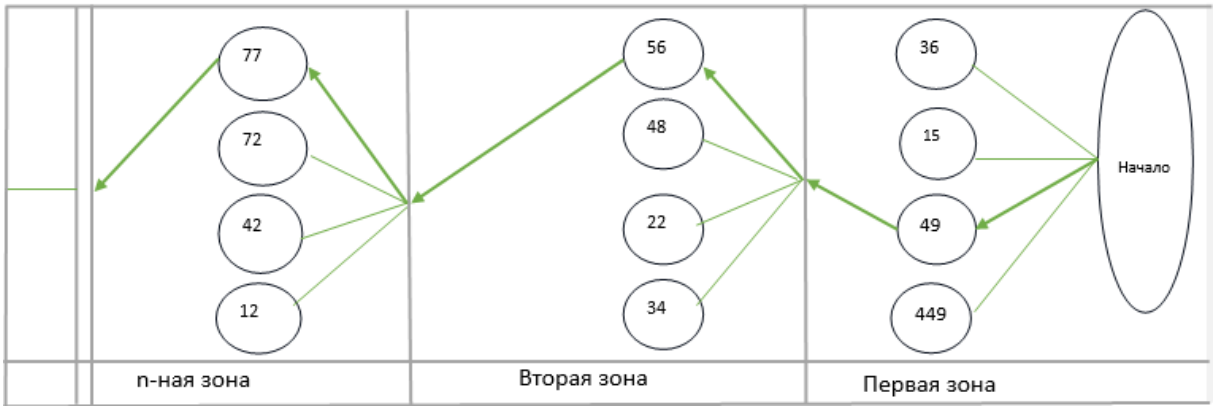


Рис. 1 – Эвристика алгоритма «Лазертаг» в зональной ST - сети

Эвристические алгоритмы основаны на некотором правиле (эвристике), правильность которого для всех возможных случаев базируется на ассоциациях, и в большинстве случаев дают решение, близкое к оптимальному. Транспортная сеть дружественной среды (синхромодального Альянса) эвристической динамической маршрутизации «Лазертаг» представляет собой конечное множество узловых терминалов, соединённых между собой дугами связи.

То есть в игровой стратегии лазертаг, как и в ST перевозках, при реализации намеченного маршрута мяча может произойти неучтенное обстоятельство, из-за чего намеченный план будет изменен в режиме реального времени. И будет осуществляться самостоятельно игроком (интеллектуальным агентом - логистическим оператором).

Прокладка маршрутов предполагает транзит через наиболее привлекательные узловые терминалы при «пошаговом вторжении» в заранее обозначенные зоны сети. Далее сформулируем ключевые показатели эффективности KPI для ST-сети в качестве критериев в эвристике алгоритма «Лазертаг» при ранжировании узловых терминалов сети в части их маршрутной привлекательности при пошаговой передаче груза от одного терминала к следующему.

Ключевые показатели эффективности KPI для ST-сети

Ключевыми свойствами **KPI** организационного обустройства ТТС ST являются: интероперабельность (способность членов ТТС к обмену и использованию информацией) объединения всех участников торгово-транспортной операции в ЕИП на базе цифровых логистических платформ (ЦЛП); адаптивность ТТС (**способность** системы видоизменяться**);** проактивность ТТС (способность мультиагентов самостоятельно инициировать действия в интересах всех членов ТТС**)** [21, 28]. Суть сетецентрического управления заключается в проявлении новых инструментов цифровой логистической экосистемы, таких как ЦЛП, мультиагентные технологии, что способствует формированию развитого ЕИП, позволяет оптимизировать взаимодействие участников ТТС и повысить синергию сетевых логистических операций.

На основе нового развернутого определения ST с помощью фасетной классификации [32] выделим десять простых метрик фасето*в* (от французского «facette» — грань) основных параметров логистической системы ST-сети: стоимость услуги, время перемещения груза, возможность консолидации (включая сборную доставку, догруз, или зональный пулинг), интероперабельность, проактивность интеллектуального агента терминального узла сети, автономность узлового агента, адаптивность и гибкость переключения между различными видами транспорта, клиентоцентричность, мотивированность, субсидиарность (задачи управления должны решаться на самом

низком уровне) [21]. Перечисленные критерии интеллектуального агента терминального узла отражают предпочтение его выбора на последовательных шагах оптимизируемого маршрута.

Элиминирование критериев KPI

Для определения удельного веса каждого критерия составим матрицу попарных сравнений, которая указывает на важность одного критерия при сравнении с другим, используя оценочную шкалу:

1 – равная значимость; 3 –среднее превосходство одного над другим;

5 – подавляющее превосходство; 7 – значительное превосходство;

9 – абсолютное превосходство; 2, 4, 6, 8 – промежуточные значения.

Далее, произведя обработку матрицы попарных сравнений, рассчитаем веса десяти выделенных критериев, что позволит в режиме реального времени осуществить последовательный расчет рейтингов узловых терминалов каждой маршрутной «зоны» ТТС, учитывая динамику их текущих параметров.

Произведенный нами пример расчета рейтингов четырех (k =4)терминальных компаний «первой зоны» маршрута из Санкт-Петербурга («РИК-Контейнеры», «Юконт», «Контейнер Лизинг», «Марконт») выявил наивысший рейтинг предприятия ООО «РИК-Контейнеры» - 0,944 (Рис.1, терминал № 49). Это значит, что предприятие «РИК-Контейнеры» является наилучшим и именно через него будет реализован первый шаг маршрута фирмой-отправителем из Санкт-Петербурга в первой зоне (Рис.1).

Результаты оценки критериев (выделенных десяти простых метрик) показали, что первый критерий, который указывает на стоимость услуг, имеет максимальный вес $\gamma_1 (= 0{,}29)$. Данный показатель один из важных, так как цена товара – это ключевой критерий в условиях жесткой индивидуальной и коалиционной конкуренции узлового агента в борьбе за потребителя. Достаточно отстали от этого критерия интероперабельность - γ_4 = 0,21 (способность информационных систем к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена) и проактивность - γ_5 **= 0,12 (**способность действовать в упреждающей манере, генерировать новые цели и рационально их достигать). Время перемещения груза γ_2 =0,13 и возможность консолидации $\gamma_3 = 0{,}07$ уступают критерию стоимости услуг, однако, также являются немаловажными критериями, так как, ориентируясь на них, покупатель делает свой выбор в пользу определённого терминала. Информативность пяти, указанных выше, параметров составляет более 80%. Проведенное элиминирование параметров сети с 10 до 5 штук свидетельствует, что указанные выше наиболее информативные пять метрик относятся к приоритетным. Остальные подлежат лишь периодическому анализу, так как косвенно влияют на маршрутный выбор терминала клиентом и могут служить только для уточнения правильности выбора терминала.

Агрегирование критериев KPI ST-сети

Рейтинг узловых терминальных агентов рассчитается по формуле

$$R_k = \sum \gamma_i \; z_{ik} \,,$$

где z_{ik} – значение i-го нормированного критерия для k-ого узлового интеллектуального агента.

Таким образом, эвристическая модель маршрутизации «Лазертаг» в ST-сети позволила агрегировать многокритериальное описание ЗМТ до одного комплексного параметра – рейтинга. При наличии контрольной диспетчерской логистической

структуры типа «Control Tower» [24] информация о R_k формируется внутри данной структуры в режиме реального времени, что обеспечивает предиктивную аналитику, контроль и управление текущими операциями. Важнейшая роль при этом уделяют телематическим системам, объединяющим потенциал информационных и производственных технологий для многостороннего оперативного обмена информацией между структурными элементами сети. В перспективе процедуры «Control Tower» ТТС ST могут быть оптимизированы с помощью квантовых вычислений и машинного обучения**.** Таким образом, в рамках эвристики алгоритма «Лазертаг» подразумеваются: фасетная классификация параметров KPI, временные окна, телематическая логистическая структура типа «Control Tower», группировки терминалов при зонировании ST-сети.

Таким образом, рассматриваемая логистическая система ТТС предполагает текущую оценку рейтингов узловых агентов с выделением рекомендуемых «зон» их взаимодействия, внутри которых максимальный рейтинг узла определяет «оптимальный шаг» перемещения груза в данном направлении. Рекомендован инструментарий процедуры решения нечеткой задачи динамической маршрутизации эвристики «Лазертаг»: фасетная классификация параметров KPI, телематическая логистическая структура «Control Tower», **а**лгоритм k-means (метод зональной группировки терминалов на основе их сетевых и географических характеристик) **с** готовой библиотекой scikit-learn на языке Python [33], временные окна.

Выводы

1. Новизна работы состоит в том, что на основе расширенного определения

ST показано, что в условиях многокритериальности и неопределённости ТТС продуктивность процедуры выбора оптимального маршрута связана с применением эвристических методов ранжирования узловых терминалов ST- сети в фазовом пространстве ключевых показателей эффективности (KPI**).** Установлены варианты параметров KPI терминалов ST- сети.

2. Учет многокритериальных параметров трех взаимосвязанных элементов ТТС ST (сетевой организации, топологии ST-сети, динамической маршрутизации) позволил сформулировать в статье новое расширенное определение синхромодальных перевозок. ST - это перевозка, организуемая в едином информационном пространстве (ЕИП) мультимодального альянса перевозчиков, когда расширение мультимодального формата осуществляется на базе сетецентрического управления (СЦУ) в терминальной сети (сетевая организация) с топологией класса Mesh, что обеспечивает переход к работе в режиме реального времени**,** при котором параметры оптимальной перевозки рассчитываются в оперативном режиме (динамическая маршрутизация во взаимосвязанной сети) [4, 5, 21, 23].

3. В статье представлен эвристический способ многокритериального выбора оптимального маршрута, основанный на рейтинговых оценках маршрутной привлекательности узловых интеллектуальных агентов в терминальной ST-сети. Методика позволила через привлекательность узлов ST-сети реализовать многокритериальный выбор оптимального маршрута в режиме реального времени. Рассмотрен пример выбора оптимального узла ТТС.

4. Этап эволюции концепции мультимодальных перевозок в парадигму ST требует

модернизации функционала цифровой логистической платформы ТТС в части сетецентрического управления (включая клиентоцентризм), интерактивности функционала динамической маршрутизации грузов в режиме реального времени,

многовариантности топологии межтерминальных связей в полносвязной сети [4, 5, 21, 23-26].

5. Каждая сеть состоит из трех основных компонентов: потока, узлов и дуг. Методы

маршрутной оптимизации многочисленны (системный анализ, синергетика, кластерный анализ, теория множеств, теория массового обслуживания, корреляционно-регрессионный анализ; сетевое планирование, линейное программирование, теория графов и пр.) [2, 6-19]. Показано, что в условиях многокритериальности ТТС продуктивность процедуры выбора оптимального маршрута связана с применением эвристических методов ранжирования узловых терминалов сети ST, для которых **выявлены** ключевые показатели эффективности и произведено зонирование ТТС [29, 32, 33].

Список литературы

1. Колик А. В. Комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки в цепях поставок. – Москва : Техполиграфцентр, 2018. – 301 с. – EDN YAIKZV.

2. Бауэрсокс Д. Д., Клосс Д. Д. Логистика. Интегрированная цепь поставок. – Москва : Олимп-Бизнес, 2005. – 639 с. – EDN QQHXHP.

3. Булатова Н. Н., Перминов Н. Н., Якимов А. И. Исследование синхромодальности в транспортной логистике региона // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2025. – № 5 (123). – С. 61–66. – DOI: 10.24412/2411-0450-2025-5-61-66.

4. Куренков П. В., Глинский В. А., Баранова А. В. Структуризация топологии мультимодальных терминально-сетевых способов доставки // Логистика – Евразийский мост : материалы XIX Международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2024. – С. 126–131. – EDN ZEAFQQ.

5. Глинский В. А., Зимирева А. Д. Сравнительный анализ топологий и алгоритмов маршрутизации в терминальных логистических сетях // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2025. – № 3. – С. 51–62. – EDN XHLVKS.

6. Габдулхаков А. А., Завалищин Д. С. Динамическая оптимизация сложных маршрутов в транспортной логистике // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 5. – С. 33–38. – DOI: 10.17513/snt.38654. – EDN KAXNOY.

7. Завалищин Д. С., Тимофеева Г. А. Транспортная сеть с неопределенными параметрами: оптимизация маршрута // Транспорт Урала. – 2023. – № 3. – С. 3–6. – EDN RDIYHF.

8. Семенов С. С., Педан А. В., Воловиков В. С., Климов И. С. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 1. – С. 116–131. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-trudoemkosti-razlichnyh-algoritmicheskih-podhodov-dlya-resheniya-zadachi-kommivoyazhera (дата обращения: 20.12.2025).

9. Палагин Ю. И., Мочалов А. И., Тимонин А. В. Математическое моделирование и расчет характеристик трехмодальных транспортно-терминальных сетей // Прикладная информатика. – 2013. – № 2 (44). – С. 32–41. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-i-raschet-harakteristik-trehmodalnyh-transportno-terminalnyh-setey (дата обращения: 19.12.2025).

10. Алибеков Б. И., Мамаев Э. А. Мультиагентные системы в логистике: информационно-аналитические аспекты // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. – 2017. – № 4. – С. 56–62. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/multiagentnye-sistemy-v-logistike-informatsionno-analiticheskie-aspekty (дата обращения: 20.12.2025).

11. Арский А. А. Агентное моделирование в управлении отраслевыми логистическими системами // Вестник МФЮА. – 2023. – № 4. – С. 125–129. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/agentnoe-modelirovanie-v-upravlenii-otraslevymi-logisticheskimi-sistemami (дата обращения: 20.12.2025).

12. Костюк Ю. Л. Эффективная реализация алгоритма решения задачи коммивояжёра методом ветвей и границ // ПДМ. – 2013. – № 2 (20). – С. 78–90. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnaya-realizatsiya-algoritma-resheniya-zadachi-kommivoyazhyora-metodom-vetvey-i-granits (дата обращения: 22.12.2025).

13. Полупанова Е. Е., Рыбалко А. А. Алгоритм последовательной гибридизации для решения задачи коммивояжера // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3 (233). – С. 108–118. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-posledovatelnoy-gibridizatsii-dlya-resheniya-zadachi-kommivoyazhera (дата обращения: 19.12.2025).

14. Гулый И. М. Мультиагентная модель оценки эффектов внедрения цифровой платформы мультимодальных перевозок грузов в контейнерах // Креативная экономика. – 2021. – Т. 15, № 12. – С. 4883–4898. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/multiagentnaya-model-otsenki-effektov-vnedreniya-tsifrovoy-platformy-multimodalnyh-perevozok-gruzov-v-konteynerah (дата обращения: 20.12.2025).

15. Алгоритм Дейкстры [Электронный ресурс] // HexLet. – URL: https://ru.hexlet.io/courses/graphs/lessons/shortest_paths/theory_unit (дата обращения: 20.09.2025).

16. Алгоритм Дейкстры [Электронный ресурс] // Алгоритмика/CS. – URL: https://ru.algorithmica.org/cs/shortest-paths/dijkstra/ (дата обращения: 20.09.2025).

17. Палагин Ю. И. Логистика – планирование и управление материальными потоками : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Политехника, 2009. – 286 с. – EDN UUWEET.

18. Палагин Ю. И. Транспортная логистика и мультимодальные перевозки. Технология. Оптимизация. Управление : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Политехника, 2017. – 266 с. – EDN UUXCWR.

19. Каштаева С. В. Методы оптимизации : учебное пособие / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Пермский аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова. – Пермь : Прокростъ, 2020. – 84 с. – EDN XXCCAM.

20. Тюрин А. Ю. Эвристические методы решения задач доставки мелкопартионных грузов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2007. – № 1. – С. 51–55. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evristicheskie-metody-resheniya-zadach-dostavki-melkopartionnyh-gruzov (дата обращения: 20.12.2025).

21. Глинский В. А. Ключевые элементы терминально-сетевой концепции синхромодальных перевозок // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2025. – № 1. – С. 52–67. – EDN VHAWON.

22. Иванов А. П., Вакуленко С. П., Куренков П. В., Палагин Ю. И., Глинский В. А. Информационно-логистическая модель выбора маршрута доставки контейнеров // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 6 (96). – С. 73–78. – EDN CGHAED.

23. Чишич Д., Энтони А. Д., Лукиных В. Ф., Лукиных Ю. В. Концепция интеграции усиленной логистики и физического интернета // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. – 2020. – Вып. 2 (16). – С. 38–40. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-integratsii-usilennoy-logistiki-i-fizicheskogo-interneta (дата обращения: 20.12.2025).

24. Сергеев И. В. Мониторинг цепей поставок с использованием технологии «Control Tower» // Логистика. – 2019. – № 5 (150). – С. 28–33. – EDN AMNVDD.

25. Глинский В. А., Баранова А. В. Логистические платформенные и экосистемные решения в мультимодальных цепях поставок // Вестник СПбГУГА. – 2025. – № 1 (46). – С. 73–82. – EDN TBDXXQ.

26. Лупан М. В., Нужнов Е. В. Использование интеллектуальных агентов на автоматизированном грузовом терминале // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – Т. 132, № 7. – С. 174–180. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-intellektualnyh-agentov-na-avtomatizirovannom-gruzovom-terminale (дата обращения: 19.12.2025).

27. Сафина Д. М. Управление компанией на основе ключевых показателей эффективности (KPI) в условиях кризиса // Исследования мировой науки: новые подходы и актуальные вопросы. – Москва : Перо, 2023. – Ч. III. – С. 27–47. – EDN LFUTIG.

28. Гулый И. М. Аналитические методы оценки цифровой трансформации в транспортно-логистическом бизнесе // Вестник евразийской науки. – 2021. – № 5. – С. 1–9. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskie-metody-otsenki-tsifrovoy-transformatsii-v-transportno-logisticheskom-biznese (дата обращения: 22.12.2025).

29. Мирошник А. С. Логистическая концепция управления терминальными перевозками // Российское предпринимательство. – 2010. – № 1–2. – С. 115–118. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/logisticheskaya-kontseptsiya-upravleniya-terminalnymi-perevozkami (дата обращения: 23.12.2025).

30. Чернышев Ю. О., Кубил В. Н., Требухин А. В. Обзор нечетких задач маршрутизации транспорта // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2020. – № 3. – С. 325–331. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-nechetkih-zadach-marshrutizatsii-transporta (дата обращения: 27.12.2025).

31. Володарец Н. В., Маренич А. С., Ткачёв С. А. Комплексный анализ современных интеллектуальных систем поддержки принятия решений для транспортных средств // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 4. – С. 22–42. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-analiz-sovremennyh-intellektualnyh-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniy-dlya-transportnyh-sredstv (дата обращения: 06.01.2026).

32. Песков Д. Н., Каберник В. В., Михеев А. Н., Афонцев С. А. Динамическая фасетная классификация (mgi-классификация) и ее применение к задачам управления знаниями в вузе // ОТО. – 2006. – № 3. – С. 295–306. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-fasetnaya-klassifikatsiya-mgi-klassifikatsiya-i-ee-primenenie-k-zadacham-upravleniya-znaniyami-v-vuze (дата обращения: 27.12.2025).

33. Фролов В. В., Слипченко С. Е., Приходько О. Ю. Метод расчета числа кластеров для алгоритма k-means // Экономика. Информатика. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 213–225. – DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-1-213-225. – EDN NGGIHL.

References

1. Kolik, A.V. (2018), *Kombinirovannye zheleznodorozhno-avtomobil'nye perevozki v tsepyakh postavok* [Combined rail-road transportation in supply chains], Tekhpoligraftsentr, Moscow, Russia.

2. Bowersox, D.J. and Closs, D.J. (2005), *Logistika. Integrirovannaya tsep' postavok* [Logistical Management. The Integrated Supply Chain Process], Olimp-Biznes, Moscow, Russia.

3. Bulatova, N.N., Perminov, N.N. and Yakimov, A.I. (2025), "Issledovanie sinkhromodal'nosti v transportnoy logistike regiona" [Study of synchromodality in the transport

logistics of the region], *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*, no. 5 (123), pp. 61–66. DOI: 10.24412/2411-0450-2025-5-61-66.

4. Kurenkov, P.V., Glinsky, V.A. and Baranova, A.V. (2024), "Strukturizatsiya topologii mul'timodal'nykh terminal'no-setevykh sposobov dostavki" [Structuring the topology of multimodal terminal-network delivery methods], *Logistika – Evraziyskiy most* [Logistics – Eurasian Bridge], proceedings of the XIX International scientific-practical conference, Krasnoyarsk, Russia, pp. 126–131.

5. Glinsky, V.A. and Zimireva, A.D. (2025), "Sravnitel'nyy analiz topologiy i algoritmov marshrutizatsii v terminal'nykh logisticheskikh setyakh" [Comparative analysis of topologies and routing algorithms in terminal logistics networks], *Vestnik Donetskoy akademii avtomobil'nogo transporta*, no. 3, pp. 51–62.

6. Gabdulkhakov, A.A. and Zavalishchin, D.S. (2021), "Dinamicheskaya optimizatsiya slozhnykh marshrutov v transportnoy logistike" [Dynamic optimization of complex routes in transport logistics], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, no. 5, pp. 33–38. DOI: 10.17513/snt.38654.

7. Zavalishchin, D.S. and Timofeeva, G.A. (2023), "Transportnaya set' s neopredelennymi parametrami: optimizatsiya marshruta" [Transport network with uncertain parameters: route optimization], *Transport Urala*, no. 3, pp. 3–6.

8. Semenov, S.S., Pedan, A.V., Volovikov, V.S. and Klimov, I.S. (2017), "Analiz trudoemkosti razlichnykh algoritmicheskikh podkhodov dlya resheniya zadachi kommivoyazhera" [Analysis of the complexity of various algorithmic approaches for solving the traveling salesman problem], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, no. 1, pp. 116–131. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-trudoemkosti-razlichnyh-algoritmicheskih-podhodov-dlya-resheniya-zadachi-kommivoyazhera (Accessed 20 December 2025).

9. Palagin, Yu.I., Mochalov, A.I. and Timonin, A.V. (2013), "Matematicheskoe modelirovanie i raschet kharakteristik trekhmodal'nykh transportno-terminal'nykh setey" [Mathematical modeling and calculation of characteristics of three-modal transport and terminal networks], *Prikladnaya informatika*, no. 2 (44), pp. 32–41. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-i-raschet-harakteristik-trehmodalnyh-transportno-terminalnyh-setey (Accessed 19 December 2025).

10. Alibekov, B.I. and Mamaev, E.A. (2017), "Mul'tiagentnye sistemy v logistike: informatsionno-analiticheskie aspekty" [Multi-agent systems in logistics: information and analytical aspects], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Estestvennye nauki*, no. 4, pp. 56–62. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/multiagentnye-sistemy-v-logistike-informatsionno-analiticheskie-aspekty (Accessed 20 December 2025).

11. Arsky, A.A. (2023), "Agentnoe modelirovanie v upravlenii otraslevymi logisticheskimi sistemami" [Agent-based modeling in the management of sectoral logistics systems], *Vestnik MFYuA*, no. 4, pp. 125–129. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/agentnoe-modelirovanie-v-upravlenii-otraslevymi-logisticheskimi-sistemami (Accessed 20 December 2025).

12. Kostyuk, Yu.L. (2013), "Effektivnaya realizatsiya algoritma resheniya zadachi kommivoyazhyora metodom vetvey i granits" [Efficient implementation of the traveling salesman problem algorithm using the branch and bound method], *PDM*, no. 2 (20), pp. 78–90. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnaya-realizatsiya-algoritma-resheniya-zadachi-kommivoyazhyora-metodom-vetvey-i-granits (Accessed 22 December 2025).

13. Polupanova, E.E. and Rybalko, A.A. (2023), "Algoritm posledovatel'noy gibridizatsii dlya resheniya zadachi kommivoyazhera" [Sequential hybridization algorithm for solving the traveling salesman problem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, no. 3 (233), pp.

108–118. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-posledovatelnoy-gibridizatsii-dlya-resheniya-zadachi-kommivoyazhera (Accessed 19 December 2025).

14. Gulyy, I.M. (2021), "Mul'tiagentnaya model' otsenki effektov vnedreniya tsifrovoy platformy mul'timodal'nykh perevozok gruzov v konteynerakh" [Multi-agent model for assessing the effects of implementing a digital platform for multimodal container cargo transportation], *Kreativnaya ekonomika*, vol. 15, no. 12, pp. 4883–4898. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/multiagentnaya-model-otsenki-effektov-vnedreniya-tsifrovoy-platformy-multimodalnyh-perevozok-gruzov-v-konteynerah (Accessed 20 December 2025).

15. "Algoritm Deikstry" [Dijkstra's Algorithm] (2025), HexLet. Available at: https://ru.hexlet.io/courses/graphs/lessons/shortest_paths/theory_unit (Accessed 20 September 2025) (in Russian).

16. "Algoritm Deikstry" [Dijkstra's Algorithm] (2025), Algoritmika/CS. Available at: https://ru.algorithmica.org/cs/shortest-paths/dijkstra/ (Accessed 20 September 2025) (in Russian).

17. Palagin, Yu.I. (2009), *Logistika – planirovanie i upravlenie material'nymi potokami* [Logistics – planning and management of material flows], Politekhnika, Saint Petersburg, Russia.

18. Palagin, Yu.I. (2017), *Transportnaya logistika i mul'timodal'nye perevozki. Tekhnologiya. Optimizatsiya. Upravlenie* [Transport logistics and multimodal transportation. Technology. Optimization. Management], Politekhnika, Saint Petersburg, Russia.

19. Kashtaeva, S.V. (2020), *Metody optimizatsii* [Optimization methods], Prokrost', Perm, Russia.

20. Tyurin, A.Yu. (2007), "Evristicheskie metody resheniya zadach dostavki melkopartionnykh gruzov" [Heuristic methods for solving problems of small-lot cargo delivery], *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 1, pp. 51–55. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/evristicheskie-metody-resheniya-zadach-dostavki-melkopartionnyh-gruzov (Accessed 20 December 2025).

21. Glinsky, V.A. (2025), "Klyuchevye elementy terminal'no-setevoy kontseptsii sinkhromodal'nykh perevozok" [Key elements of the terminal-network concept of synchromodal transportation], *Vestnik Donetskoy akademii avtomobil'nogo transporta*, no. 1, pp. 52–67.

22. Ivanov, A.P., Vakulenko, S.P., Kurenkov, P.V., Palagin, Yu.I. and Glinsky, V.A. (2022), "Informatsionno-logisticheskaya model' vybora marshruta dostavki konteynerov" [Information and logistics model for choosing a container delivery route], *Vestnik transporta Povolzh'ya*, no. 6 (96), pp. 73–78.

23. Chisic, D., Anthony, A.D., Lukinykh, V.F. and Lukinykh, Yu.V. (2020), "Kontseptsiya integratsii usilennoy logistiki i fizicheskogo interneta" [The concept of integrating enhanced logistics and the physical internet], *Sotsial'no-ekonomicheskiy i gumanitarnyy zhurnal Krasnoyarskogo GAU*, issue 2 (16), pp. 38–40. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-integratsii-usilennoy-logistiki-i-fizicheskogo-interneta (Accessed 20 December 2025).

24. Sergeev, I.V. (2019), "Monitoring tsepey postavok s ispol'zovaniem tekhnologii 'Control Tower'" [Supply chain monitoring using 'Control Tower' technology], *Logistika*, no. 5 (150), pp. 28–33.

25. Glinsky, V.A. and Baranova, A.V. (2025), "Logisticheskie platformennye i ekosistemnye resheniya v mul'timodal'nykh tsepyakh postavok" [Logistics platform and ecosystem solutions in multimodal supply chains], *Vestnik SPbGUGA*, no. 1 (46), pp. 73–82.

26. Lupan, M.V. and Nuzhnov, E.V. (2012), "Ispol'zovanie intellektual'nykh agentov na avtomatizirovannom gruzovom terminale" [Use of intelligent agents at an automated cargo

terminal], *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, vol. 132, no. 7, pp. 174–180. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-intellektualnyh-agentov-na-avtomatizirovannom-gruzovom-terminale (Accessed 19 December 2025).

27. Safina, D.M. (2023), "Upravlenie kompaniey na osnove klyuchevykh pokazateley effektivnosti (KPI) v usloviyakh krizisa" [Company management based on key performance indicators (KPI) in crisis conditions], *Issledovaniya mirovoy nauki: novye podkhody i aktual'nye voprosy* [Studies of world science: new approaches and current issues], part III, Pero, Moscow, Russia, pp. 27–47.

28. Gulyy, I.M. (2021), "Analiticheskie metody otsenki tsifrovoy transformatsii v transportno-logisticheskom biznese" [Analytical methods for assessing digital transformation in the transport and logistics business], *Vestnik evraziyskoy nauki*, no. 5, pp. 1–9. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskie-metody-otsenki-tsifrovoy-transformatsii-v-transportno-logisticheskom-biznese (Accessed 22 December 2025).

29. Miroshnik, A.S. (2010), "Logisticheskaya kontseptsiya upravleniya terminal'nymi perevozkami" [Logistics concept of terminal transportation management], *Rossiyskoe predprinimatel'stvo*, no. 1–2, pp. 115–118. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/logisticheskaya-kontseptsiya-upravleniya-terminalnymi-perevozkami (Accessed 23 December 2025).

30. Chernyshev, Yu.O., Kobil, V.N. and Trebukhin, A.V. (2020), "Obzor nechetkikh zadach marshrutizatsii transporta" [Review of fuzzy vehicle routing problems], *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, no. 3, pp. 325–331. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-nechetkih-zadach-marshrutizatsii-transporta (Accessed 27 December 2025).

31. Volodarets, N.V., Marenich, A.S. and Tkachev, S.A. (2025), "Kompleksnyy analiz sovremennykh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy dlya transportnykh sredstv" [Comprehensive analysis of modern intelligent decision support systems for vehicles], *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, no. 4, pp. 22–42. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-analiz-sovremennyh-intellektualnyh-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniya-dlya-transportnyh-sredstv (Accessed 6 January 2026).

32. Peskov, D.N., Kabernik, V.V., Mikheev, A.N. and Afontsev, S.A. (2006), "Dinamicheskaya fasetnaya klassifikatsiya (mgi-klassifikatsiya) i ee primenenie k zadacham upravleniya znaniyami v vuze" [Dynamic facet classification (mgi-classification) and its application to knowledge management tasks in higher education], *OTO*, no. 3, pp. 295–306. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-fasetnaya-klassifikatsiya-mgi-klassifikatsiya-i-ee-primenenie-k-zadacham-upravleniya-znaniyami-v-vuze (Accessed 27 December 2025).

33. Frolov, V.V., Slipchenko, S.E. and Prikhodko, O.Yu. (2020), "Metod rascheta chisla klasterov dlya algoritma k-means" [Method for calculating the number of clusters for the k-means algorithm], *Ekonomika. Informatika*, vol. 47, no. 1, pp. 213–225. DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-1-213-225.

Glinskiy V.A.

HEURISTIC ROUTING MODEL IN SYNCHROMODAL TERMINAL NETWORK

Abstract. The article presents the analysis of dynamic systems of cargo delivery in the transport-terminal network (TTS) of synchromodal transportation (Synchromodal transportation - ST). Parameters of three interrelated characteristics of ST-network are considered: criteria of integrated network organization; criteria of full-connected network

topology; criteria of dynamic routing. The novelty of the work lies in the fact that, based on the metrics of the extended definition of ST, it is shown that, under conditions of multi-criteria and uncertainty of TTS, the productivity of the optimal route selection procedure is associated with the use of heuristic methods for ranking the node terminals of the ST network in the phase space of their key performance indicators (KPIs). The options for KPI parameters of ST-network terminals have been established. The details of the procedure for implementing the fuzzy task of routing the "dynamic entry" into the ST-network of the new heuristic algorithm "Lazertag" have been recommended (facet classification of KPI parameters, time windows, real-time telematic logistics structure of the "Control Tower" type, k-means terminal grouping algorithm during TTS zoning).

Keywords: network-centric management (NCM); synchronous transportation (ST); dynamic heuristic multi-criteria routing; customer centricity; facet classification; multi-agent technologies; interoperability.

Сведения об авторе

Глинский Владимир Анатольевич
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия,
Доцент, кандидат технических наук,
vglinskiy@yandex.ru

Information about the author

Glinskiy Vladimir Anatolyevich
St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov, St. Petersburg, Russia,
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
vglinskiy@yandex.ru

УДК 629.11

Гюлев Н.У., Дадилов А.С., Шихсаидов Б.И., Абакаров А.А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Аннотация. *Для повышения эффективности функционирования транспортно-логистической системы в условиях возрастания конкуренции на рынке возникает необходимость разработки и внедрения комплекса мер по сокращению затрат в этой системе. Одним из таких мероприятий является снижение затрат на перевозку грузов в логистической системе путем подбора рационального транспортного средства для замещения им существующего.*

В статье для сопоставления существующего и предлагаемого варианта обслуживания логистической системы проведена разработка схем перевозок грузов для обоих вариантов. Для каждого из вариантов маршруты спроектированы с учетом существующего грузового автомобиля и предлагаемого. Рассчитаны показатели схем перевозок и технико-эксплуатационные параметры транспортных средств. Для принятия решения о целесообразности замены транспортного средства проведены расчеты по оценке себестоимости перевозки одной тонны груза в логистической системе города.

Ключевые слова*: транспортное средство, логистическая система, маршрут, перевозка, технико-эксплуатационные показатели, эффективность, себестоимость.*

Постановка задачи

Деятельность торговой логистической системы в городе связана с постоянным снабжением пунктов торговли необходимыми товарами. Эффективность функционирования этой системы в значительной мере зависит от величины транспортных издержек [1].

В условиях повышения конкуренции в сфере предоставления транспортных услуг важное место занимает задача выбора рационального транспортного средства для обслуживания логистической системы и разработка маршрутов перевозки грузов.

Правильное решение этой задачи позволяет своевременно обеспечивать торговую сеть логистической системы необходимыми товарами с минимальными затратами.

Анализ последних исследований

Вопросами организации грузовых перевозок, выбора рационального транспортного средства и проектирования маршрутов занималось множество авторов.

Некоторые проблемы организации грузовых перевозок в городе, загруженности улично-дорожной сети, отставания развития инфраструктуры изложены в работе [2].

В работах [3, 4] рассмотрены информационные и цифровые технологии для повышения эффективности работы грузового транспорта в городе.

Вопросы совершенствования планирования грузовых перевозок в условиях трансформации рынка, основанные на интердисциплинарном подходе, объединяющем

принципы транспорта и логистики для оптимизации перевозок грузов рассмотрены в работах [5, 6].

Задача доставки грузов автомобильным транспортом в городе из распределительного центра в розничную сеть с учетом ограничений может быть решена на основе моделирования транспортно-логистических процессов [7, 8].

Производительность и эффективность работы автомобиля зависит от оптимальных значений следующих технико-эксплуатационных показателей: коэффициентов использования грузоподъемности и пробега, технической скорости, времени погрузки-разгрузки и т. д. Вопросы выбора грузоподъемности транспортного средства и ключевые критерии, влияющие на процесс принятия решения рассмотрены в работах [9-11].

При составлении маршрутов в логистической системе необходимо стремиться к максимальному использованию грузоподъемности транспортного средства и повышению коэффициента использования пробега [6]. При проектировании маршрутов необходимо разрабатывать развозочные маршруты, так как они обеспечивают оптимальные значения эксплуатационных показателей автомобиля [12-14].

Однако в рассмотренных работах не в полной мере рассмотрен вопрос обоснования замены грузового автомобиля в действующей логистической системе.

Цель работы

Целью настоящей статьи является повышение эффективности деятельности транспортно-логистической системы на основе оптимизации выбора транспортного средства.

Основная часть

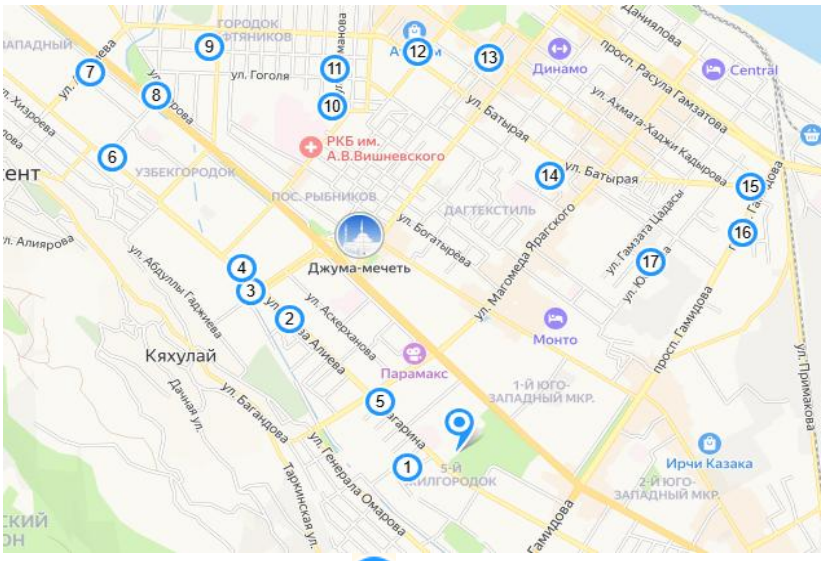
Для повышения эффективности грузовых автомобильных перевозок в городе необходимо применять математические методы, которые позволяют оптимизировать задачи составления рациональных маршрутов перевозок.

Транспортные затраты составляют значительную часть общих логистических затрат, и их оптимизация оказывает существенное влияние на эффективность поставки материального потока. На транспортные расходы оказывают влияние выбор транспортных средств, маршруты, расстояния между участниками логистической системы, тарифы на перевозку, а также расходы на топливо и техническое обслуживание.

Для оценки и сопоставления технико-эксплуатационных и экономических показателей работы в настоящее время используемого и предлагаемого транспортного средства, необходимо проектировать схемы маршрутов для обоих вариантов.

При разработке маршрутов для автомобильных перевозок необходимо правильно выбрать тип транспортного средства для перевозок материального потока, позволяющего в короткие сроки обеспечить доставку груза между наибольшим числом заказчиков. На всех маршрутах надо предусмотреть возможность контроля движением транспортных средств, координацию процесса перевозок с другими видами грузоперевозок. Рациональные маршруты разрабатываются на примере обслуживания распределительного центра (г. Махачкала) с использованием программы проектирования развозочных маршрутов, разработанной с участием первого автора в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете. Исходными данными для этой программы являются следующие данные логистической системы: GPS координаты распределительного центра и 17 торговых пунктов, объемы суточных продаж этих точек, грузоподъемность автомобиля. В качестве транспортного средства для существующего варианта используется автомобиль ГАЗ 2705 грузоподъемностью

1,2 т, для предлагаемого – ЗИЛ 5301 грузоподъемностью 3,0 т. Расположение участников логистической системы и распределительного центра приведено на рисунке 1.



1 – точки розничной сети; – распределительный центр

Рис. 1. Участники логистической системы

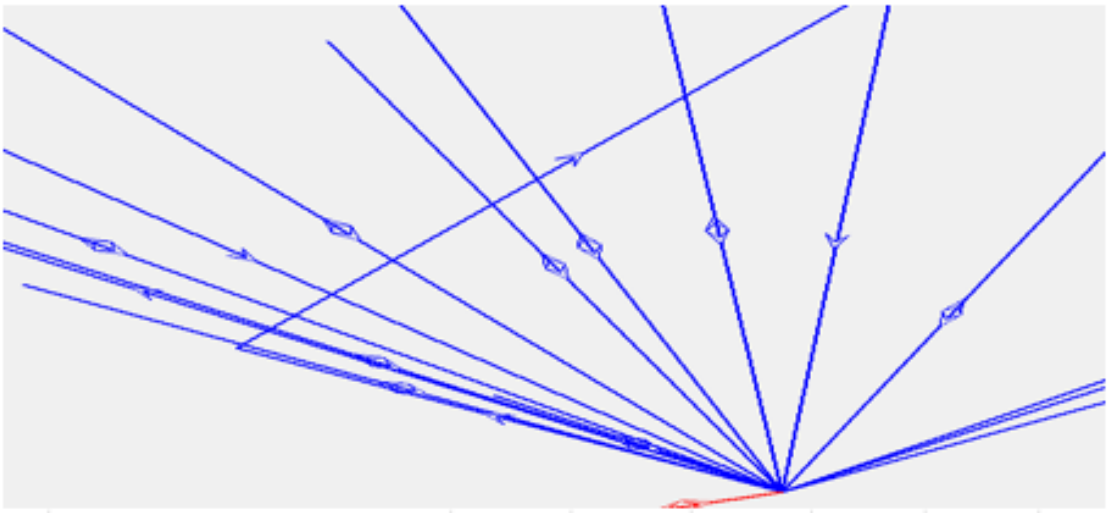
Объемы суточной реализации продуктов питания для каждой торговой точки розничной сети приведены в таблице 1.

Таблица 1

Объем суточной реализации материального потока каждой торговой точки

№ магазина	Объем суточной реализации, кг
1	620
2	550
3	1100
4	750
5	630
6	580
7	740
8	620
9	1150
10	730
11	800
12	960
13	500
14	870
15	440
16	1100
17	600
Всего	12740

Окно программы разработки развозочных маршрутов перевозки продуктов питания в логистической системе при эксплуатации автомобиля ГАЗ 2705 грузоподъемностью 1,2 т приведено на рисунке 2.



Код	Название	Заезд, ч:мин	Выезд, ч:мин	Завоз, кг | л	Вывоз, кг | л	Загрузка, кг	Пробег,
1	ул. Гагарина, 17г	7:59	8:00	0 | 0	620 | 0	620 | 0	0,0
2	ул. Сурхаева, 12б	8:00	8:05	620 | 0	620 | 0	0 | 0	0,3
1	ул. Гагарина, 17г	8:06	8:06	0 | 0	0 | 0	0 | 0	0,6

#	Начало, ч:мин	Выезд, ч:мин	Заезд, ч:мин	Окончание, ч:мин	Оборот, ч:мин	Сервис, ч:мин	Пробег, км	С грузом, км	Завоз
1	7:59	8:00	8:06	8:06	0:06	0:05	0,6	0,3	620
2	7:59	8:00	8:11	8:11	0:11	0:05	2,9	1,4	1100
3	7:59	8:00	8:12	8:12	0:12	0:05	3,3	1,7	750
4	7:59	8:00	8:07	8:07	0:07	0:05	1,2	0,6	630
5	7:59	8:00	8:17	8:17	0:17	0:05	5,9	3,0	740
6	7:59	8:00	8:22	8:22	0:22	0:10	5,7	3,0	1200
7	7:59	8:00	8:16	8:16	0:16	0:05	5,3	2,7	1150
8	7:59	8:00	8:14	8:14	0:14	0:05	4,2	2,1	730
9	7:59	8:00	8:14	8:14	0:14	0:05	4,5	2,2	800
10	7:59	8:00	8:14	8:14	0:15	0:05	4,6	2,3	960
11	7:59	8:00	8:21	8:21	0:21	0:14	5,2	2,9	1050
12	7:59	8:00	8:12	8:12	0:12	0:05	3,3	1,7	870
13	7:59	8:00	8:13	8:13	0:13	0:05	4,0	2,0	1100
14	7:59	8:00	8:19	8:19	0:19	0:11	4,4	2,9	1040

Рис. 2. Фрагмент программы формирования маршрутов (ГАЗ 2705)

В результате моделирования перевозок продуктов питания в логистической системе автомобилем ГАЗ 2705 получено 14 маршрутов, из них 11 маятниковых и 3 развозочных. При проектировании маршрутов необходимо разрабатывать развозочные маршруты, так как они обеспечивают оптимальные значения эксплуатационных показателей автомобиля.

Технико-эксплуатационные показатели работы транспортного средства для системы, состоящей из 14 маршрутов при эксплуатации автомобиля ГАЗ 2705 грузоподъемностью 1,2 т, рассчитываются с помощью используемой программы и приведены в таблице 2.

Для оценки целесообразности замены используемого в настоящее время транспортного средства в рассматриваемой логистической системе на предлагаемое определяется себестоимость перевозки одной тонны груза, которая рассчитывается по следующей зависимости:

$$S_T = \frac{l_{ег}}{q_н \cdot \gamma_{ст} \cdot \beta} \cdot \left(B_{пер} + \frac{B_п}{V_T} \right) + \frac{B_п \cdot t_{п/р}}{q_н \cdot \gamma_{ст}}, \quad (1)$$

где $l_{ег}$ – длина ездки с грузом, км;

$q_н$ – номинальная грузоподъемность транспортного средства, т;

$\gamma_{ст}$ – коэффициент статического использования грузоподъемности;

β – коэффициент использования пробега;

V_T – техническая скорость транспортного средства, км/ч;

$t_{п/р}$ – продолжительность времени на погрузку-разгрузку, ч;

$B_{пер}$ – переменные затраты транспортного процесса, руб/т;

$B_п$ – постоянные затраты транспортного процесса, руб/год.

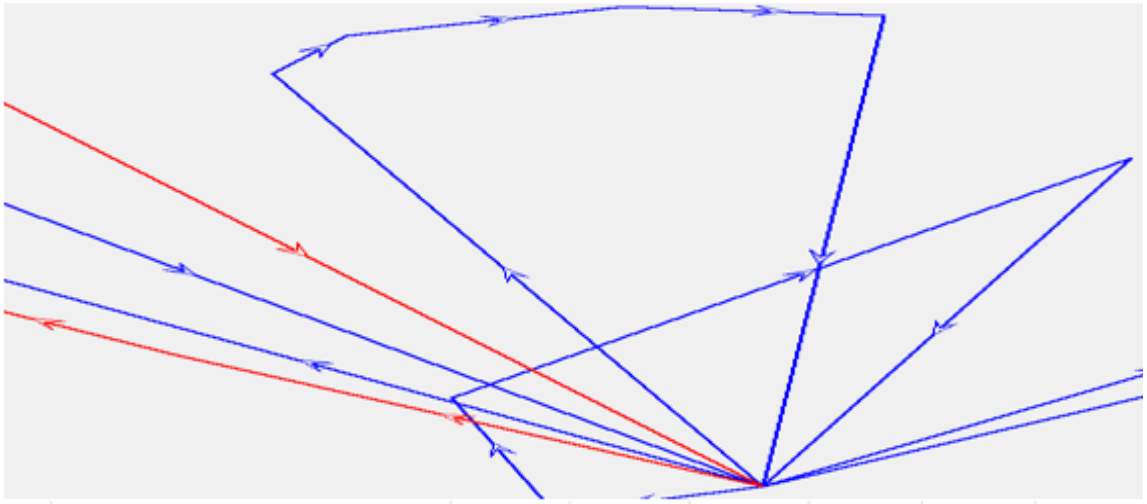
Результаты расчетов себестоимости перевозки 1 т груза по формуле (1) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Технико-эксплуатационные показатели работы транспортного средства ГАЗ 2705

Номер маршрута	Пробег с грузом, км	Объем перевозок, кг	Коэффициент статического использования грузоподъемности	Коэффициент использования пробега	Общий пробег, км	Грузооборот, ткм	Себестоимость перевозки 1 т груза, руб/т
1	0,31	620	0,52	0,50	0,62	0,19	312,51
2	1,45	1100	0,92	0,50	2,899	1,59	809,87
3	1,65	750	0,63	0,50	3,31	1,24	1354,08
4	0,60	630	0,53	0,50	1,21	0,38	590,81
5	2,95	740	0,62	0,50	5,91	2,18	2443,99
6	2,99	1200	1,00	0,53	5,65	3,32	1444,15
7	2,65	1150	0,96	0,50	5,31	3,05	1414,54
8	2,09	730	0,61	0,50	4,19	1,53	1760,14
9	2,24	800	0,67	0,50	4,48	1,79	1715,78
10	2,31	960	0,80	0,50	4,63	2,22	1477,75
11	2,93	1050	0,88	0,56	5,19	2,03	1516,19
12	1,66	870	0,73	0,50	3,32	1,44	1169,41
13	2,02	1100	0,92	0,50	4,03	2,22	1125,36
14	2,89	1040	0,87	0,66	4,39	2,70	1295,73
Итого	28,74	12740	-	-	55,14	25,88	-

В результате моделирования перевозок продуктов питания в логистической системе грузовым автомобилем ЗИЛ 5301 грузоподъемностью 3,0 т получено 5 развозочных маршрутов. Результат программы разработки развозочных маршрутов перевозки продуктов питания в логистической системе для автомобиля ЗИЛ 5301 приведен на рисунке 3.



Код	Название	Заезд, ч:мин	Выезд, ч:мин	Завоз, кг | л	Вывоз, кг | л	Загрузка, кг	Пробег, км
1	ул. Гагарина, 17г	7:59	8:00	0 | 0	2800 | 0	2800 | 0	0,0
3	ул. Азиза Алиева, 18	8:02	8:07	550 | 0	550 | 0	2250 | 0	1,0
4	ул. Абубакарова, 106	8:08	8:13	1100 | 0	1100 | 0	1150 | 0	1,5
10	ул. Некрасова, 62	8:16	8:21	1150 | 0	1150 | 0	0 | 0	2,9
1	ул. Гагарина, 17г	8:26	8:26	0 | 0	0 | 0	0 | 0	5,5

#	Начало, ч:мин	Выезд, ч:мин	Заезд, ч:мин	Окончание, ч:мин	Оборот, ч:мин	Сервис, ч:мин	Пробег, км	С грузом, км	Завоз, кг
1	7:59	8:00	8:33	8:33	0:33	0:23	6,1	3,4	2690 | 0
2	7:59	8:00	8:26	8:26	0:26	0:18	5,5	2,9	2800 | 0
3	7:59	8:00	8:31	8:31	0:31	0:22	5,3	3,1	2990 | 0
4	7:59	8:00	8:23	8:23	0:23	0:19	4,0	2,4	2120 | 0
5	7:59	8:00	8:24	8:24	0:24	0:17	4,5	2,4	2140 | 0

Рис. 3. Фрагмент программы формирования маршрутов (ЗИЛ 5301)

Технико-эксплуатационные параметры спроектированных развозочных маршрутов и значения себестоимости каждого маршрута, рассчитанные по формуле (1), приведены в таблице 3.

Сравнение данных, приведенных в таблицах 2 и 3, показывает, что при использовании автомобиля ЗИЛ 5301 пробег с грузом и общий пробег уменьшаются более чем в два раза. Это приводит к значительному сокращению затрат топлива и повышению эффективности деятельности логистической системы.

Таблица 3

Технико-эксплуатационные показатели работы транспортного средства ЗИЛ 5301

Номер маршрута	Пробег с грузом, км	Объем перевозок, кг	Коэффициент статического использования грузоподъемности	Коэффициент использования пробега	Общий пробег, км	Грузооборот, ткм	Себестоимость перевозки 1 т груза, руб/т
1	3,39	2690	0,90	0,56	6,06	7,04	510,31
2	2,86	2800	0,93	0,52	5,51	5,44	446,46
3	3,07	2990	1,00	0,58	5,34	7,51	405,53
4	2,37	2120	0,71	0,59	4,03	2,81	430,87
5	2,43	2140	0,71	0,55	4,45	4,55	471,88
Итого	14,12	12740	-	-	25,39	27,35	-

Также следует отметить, что на своевременность доставки грузов в пункты розничной торговли влияет время погрузки-разгрузки. Общее время оборота на маршрутах существующей схемы (табл. 2) составляет 4,9 ч, а время на погрузку-разгрузку – 1,67 ч, что составляет 34,1 %. При этой схеме обслуживания происходит 14 погрузок и 17 разгрузок. Общее время оборота на маршрутах предлагаемой схемы перевозок (табл. 3) составляет 3,98 ч, а время на погрузку-разгрузку – 1,06 ч, что составляет 26 %. Во втором варианте происходит 5 погрузок и 17 разгрузок.

Анализ влияния времени погрузки-разгрузки на общее время оборота показывает, что при предлагаемой схеме маршрутов общее время погрузки-разгрузки продуктов питания в логистической системе сокращается на 8,1 %, что позволяет повысить эффективность ее деятельности.

Оценка целесообразности замены транспортного средства для обслуживания логистической системы производится путем сопоставления средневзвешенной себестоимости перевозки одной тонны груза ($\overline{S_T}$) в спроектированных маршрутных системах по следующей формуле:

$$\overline{S_T} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_{Ti} \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_i}, \qquad (2)$$

где S_{Ti} – величина себестоимости перевозок 1 т груза на *i*-ом маршруте, руб/т;

Q_i – значение объема перевозок на *i*-ом маршруте, т;

n – количество маршрутов, ед.

В результате произведенных расчетов по формуле (2) получены средневзвешенные себестоимости перевозки 1 т груза для обеих схем перевозки грузов в логистической системе, которые приводятся в таблице 4.

Таблица 4

Средневзвешенная себестоимость перевозки 1 т груза

Модель транспортного средства	Грузоподъемность, т	Средневзвешенная себестоимость перевозки 1 т груза, руб/т
ГАЗ 2705	1,2	1327,45
ЗИЛ 5301	3,0	452,01

Как видно из таблицы 4, у предлагаемого транспортного средства ЗИЛ 5301 грузоподъемностью три тонны средневзвешенная себестоимость перевозки 1 т груза в логистической системе почти в три раза меньше, чем у применяемого в настоящее время автомобиля ГАЗ 2705. Это свидетельствует о целесообразности замены транспортного средства для обслуживания рассматриваемой логистической системы.

Выводы

1. Для оценки целесообразности замены транспортного средства, обслуживающего логистическую систему, необходимо проектировать элементы маршрутной системы для сопоставления параметров и затрат как для используемого в настоящее время грузового автомобиля, так и для предлагаемого.

2. При выборе грузоподъемности транспортного средства для обслуживания логистической системы при проектировании маршрутов необходимо разрабатывать развозочные маршруты. Это позволяет значительно улучшить значения технико-эксплуатационных показателей работы грузового автомобиля и параметров маршрутной системы.

3. Критерием оценки целесообразности замены транспортного средства в логистической системе является расчет и сопоставление средневзвешенной себестоимости перевозки 1 т груза.

4. Дальнейшие исследования возможно проводить с рассмотрением и сопоставлением нескольких марок транспортных средств, а также определением общих логистических затрат, связанных с транспортировкой грузов, хранением в складской системе, организацией погрузочно-разгрузочных работ, выбором вариантов пополнения запасов с целью их минимизации. Также целью дальнейших исследований является проведение анализа влияния дорожных условий и сезонных колебаний в спросе на продукты питания на своевременность их доставки в торговую сеть и оценки эффективности деятельности логистической системы.

Список литературы

1. Витвицкий Е. Е., Галактионова Е. С. Обоснование выбора технологии перевозки грузов в городских условиях // Наука и техника Казахстана. – 2022. – № 3. – С. 140–148. – DOI 10.48081/GAHH3858. – EDN TOPSGA.

2. Статенин А. О., Визгалин С. Е., Епифанов В. В. Анализ проблем грузовых перевозок в городском сообщении // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2024. – № 2. – С. 74–79. – DOI 10.61527/1684-7016-2024-2-74-79.

3. Жесткова С. А., Ширшиков А. С., Складова С. С. Оптимизация процесса доставки товаров в торговые предприятия на основе внедрения информационных технологий (на примере ОАО «Магнит») // Международный научный журнал. – 2025. – № 6(106). – С. 87–96. – DOI 10.34286/1995-4638-2025-106-6-87-96. – EDN DZLIBU.

4. Новиков А. Н., Жесткова С. А. Цифровизация управления транспортно-логистическими процессами сетевой доставки груза автомобильным транспортом // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-3(88). – С. 18–23. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-18-23. – EDN TRRDDS.

5. Асоян А. Р., Глушкова Ю. О., Солнцев А. А. Совершенствование планирования автомобильных грузовых перевозок // Транспортное дело России. – 2025. – № 2. – С. 238–241. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=81825128. – EDN IYYQIA.

6. Логистика : учебник / М. В. Чараева, Н. Е. Муромец, Е. В. Ляпунова, О. Н. Минева, Н. У. Гюлев и др. ; под общ. ред. М. В. Чараевой. – Москва : ИНФРА-М, 2025. – 461 с. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82732477. – EDN OPXXNK.

7. Жесткова С. А. Моделирование транспортно-логистических процессов сетевой доставки автомобильным транспортом // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-1(88). – С. 36–42. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-36-42. – EDN VBHCHY.

8. Витвицкий Е. Е., Галактионова Е. С. Влияние применения групп более грузоподъемных автотранспортных средств на результаты их работы при разных способах организации перевозок грузов помашинными отправками в городах // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-3(90). – С. 3–12. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-3-3(90)-3-12. – EDN UGJKYU.

9. Федорова К. О. Методологические подходы к выбору автотранспортных средств при выполнении грузовых перевозок // Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки : сборник материалов XXVIII международной очно-заочной научно-практической конференции, Москва, 17 мая 2023 г. – Москва : Империя, 2023. – Т. 2. – С. 45–52. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54384306. – EDN EIQHAD.

10. Гюлев Н. У., Муртузаев С. А., Гаджиев М. К. Выбор рационального транспортного средства для обслуживания розничной сети торгового комплекса // Современное состояние и перспективы инновационного развития науки : сборник статей международной научной конференции, Сургут, 27 января 2026 г. – Санкт-Петербург : МИПИ им. Ломоносова, 2026. – С. 9–11. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88923263. – EDN BIDFUE.

11. Лахно В. С., Витвицкий Е. Е. Влияние изменения грузоподъемности на результаты работы автомобилей в малой ненасыщенной автотранспортной системе перевозки грузов // Техника и технологии строительства. – 2025. – № 2(42). – С. 23–30. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82539708. – EDN JNRPQN.

12. Андреев А. Ю., Егоров В. Д., Терентьев А. В. Алгоритмы маршрутизации в дорожно-транспортной системе // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2(85). – С. 181–188. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-181-188. – EDN NQROMJ.

13. Гюлев Н. У., Шелопутов З. Р., Барбарин Е. А. Проектирование маршрутов в логистической системе для заданного грузового автомобиля // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития : сборник статей международной научной конференции, Тюмень, 29 января 2026 г. – Санкт-Петербург : МИПИ им. Ломоносова, 2026. – С. 14–16. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88923276. – EDN VSAHFV.

14. Андреев А. Ю. Методика определения оптимальных маршрутов в условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 1(90). – С. 107–113. – DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-1-107-113. – EDN UUTUFT.

References

1. Vitvitskiy, E.E. and Galaktionova, E.S. (2022), "Obosnovanie vybora tekhnologii perevozki gruzov v gorodskikh usloviyakh" [Justification of the choice of cargo transportation technology in urban conditions], *Nauka i tekhnika Kazakhstana*, no. 3, pp. 140–148. DOI: 10.48081/GAHH3858.

2. Statenin, A.O., Vizgalin, S.E. and Epifanov, V.V. (2024), "Analiz problem gruzovykh perevozok v gorodskom soobshchenii" [Analysis of problems of freight transportation in urban traffic], *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 2, pp. 74–79. DOI: 10.61527/1684-7016-2024-2-74-79.

3. Zhestkova, S.A., Shirshikov, A.S. and Skladova, S.S. (2025), "Optimizatsiya protsessa dostavki tovarov v torgovye predpriyatiya na osnove vnedreniya informatsionnykh tekhnologiy (na primere OAO 'Magnit')" [Optimization of the process of delivering goods to trade enterprises based on the introduction of information technologies (on the example of OJSC 'Magnit')], *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal*, no. 6(106), pp. 87–96. DOI: 10.34286/1995-4638-2025-106-6-87-96.

4. Novikov, A.N. and Zhestkova, S.A. (2025), "Tsifrovizatsiya upravleniya transportno-logisticheskimi protsessami setevoy dostavki gruza avtomobil'nym transportom" [Digitalization of management of transport and logistics processes of network cargo delivery by road], *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, no. 1-3(88), pp. 18–23. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-18-23.

5. Asoyan, A.R., Glushkova, Yu.O. and Solntsev, A.A. (2025), "Sovershenstvovanie planirovaniya avtomobil'nykh gruzovykh perevozok" [Improving the planning of road freight transportation], *Transportnoe delo Rossii*, no. 2, pp. 238–241. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=81825128 (Accessed 10 March 2026).

6. Charaeva, M.V., Muromets, N.E., Lyapunova, E.V., Mineva, O.N., Gyulev, N.U. et al. (2025), *Logistika: uchebnik* [Logistics: textbook], INFRA-M, Moscow, Russia. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82732477 (Accessed 10 March 2026).

7. Zhestkova, S.A. (2025), "Modelirovanie transportno-logisticheskikh protsessov setevoy dostavki avtomobil'nym transportom" [Modeling of transport and logistics processes of network delivery by road], *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, no. 1-1(88), pp. 36–42. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-36-42.

8. Vitvitskiy, E.E. and Galaktionova, E.S. (2025), "Vliyanie primeneniya grupp bolee gruzopod"emnykh avtotransportnykh sredstv na rezul'taty ikh raboty pri raznykh sposobakh organizatsii perevozok gruzov pomashinnymi otpravkami v gorodakh" [Influence of the use of groups of more load-lifting vehicles on the results of their work with different methods of organizing cargo transportation by truckload shipments in cities], *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, no. 3-3(90), pp. 3–12. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-3(90)-3-12.

9. Fedorova, K.O. (2023), "Metodologicheskie podkhody k vyboru avtotransportnykh sredstv pri vypolnenii gruzovykh perevozok" [Methodological approaches to the choice of vehicles when performing freight transportation], *Issledovanie razlichnykh napravleniy sovremennoy nauki: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Research of various directions of modern science: natural and technical sciences], proceedings of the XXVIII international scientific-practical conference, Moscow, May 17, 2023, Imperiya, Moscow, Russia, vol. 2, pp. 45–52. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54384306 (Accessed 10 March 2026).

10. Gyulev, N.U., Murtuzaev, S.A. and Gadzhiev, M.K. (2026), "Vybor ratsional'nogo transportnogo sredstva dlya obsluzhivaniya roznichnoy seti torgovogo kompleksa" [Selection of a rational vehicle for servicing the retail network of a shopping complex], *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovatsionnogo razvitiya nauki* [Current state and prospects of

innovative development of science], proceedings of the international scientific conference, Surgut, January 27, 2026, MIPI im. Lomonosova, Saint Petersburg, Russia, pp. 9–11. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88923263 (Accessed 10 March 2026).

11. Lakhno, V.S. and Vitvitskiy, E.E. (2025), "Vliyanie izmeneniya gruzopod"emnosti na rezul'taty raboty avtomobiley v maloy nenasyshchennoy avtotransportnoy sisteme perevozki gruzov" [Influence of changes in carrying capacity on the performance of vehicles in a small unsaturated motor transport system of cargo transportation], *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, no. 2(42), pp. 23–30. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82539708 (Accessed 10 March 2026).

12. Andreev, A.Yu., Egorov, V.D. and Terentiev, A.V. (2021), "Algoritmy marshrutizatsii v dorozhno-transportnoy sisteme" [Routing algorithms in the road transport system], *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, no. 2(85), pp. 181–188. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-181-188.

13. Gyulev, N.U., Sheloputov, Z.R. and Barbarin, E.A. (2026), "Proektirovanie marshrutov v logisticheskoy sisteme dlya zadannogo gruzovogo avtomobilya" [Designing routes in a logistics system for a given truck], *Innovatsionnye issledovaniya: problemy vnedreniya rezul'tatov i napravleniya razvitiya* [Innovative research: problems of implementing results and directions of development], proceedings of the international scientific conference, Tyumen, January 29, 2026, MIPI im. Lomonosova, Saint Petersburg, Russia, pp. 14–16. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88923276 (Accessed 10 March 2026).

14. Andreev, A.Yu. (2022), "Metodika opredeleniya optimal'nykh marshrutov v usloviyakh operativnogo planirovaniya avtomobil'nykh gruzovykh perevozok" [Methodology for determining optimal routes in the conditions of operational planning of road freight transportation], *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, no. 1(90), pp. 107–113. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-107-113.

Gyulev N.U., Dadilov A.S., Shikhsaidov B.I., Abakarov A.A.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM BY OPTIMIZING THE CHOICE OF TRANSPORT MEANS

***Abstract**. To improve the efficiency of the transport and logistics system in the face of increasing competition in the market, it is necessary to develop and implement a set of measures to reduce costs in this system. One of these measures is to reduce the cost of transporting goods in the logistics system by selecting an appropriate vehicle to replace the existing one.*

This article compares the existing and proposed logistics system service options by developing freight transportation plans for both options. For each option, routes were designed based on the existing and proposed trucks. The indicators for the transportation plans and the technical and operational parameters of the vehicles were calculated. To decide whether vehicle replacement is feasible, calculations were performed to estimate the cost of transporting one ton of freight within the city's logistics system.

***Keywords**: vehicle, logistics system, route, transportation, technical and operational indicators, efficiency, cost.*

Сведения об авторах:

Гюлев Низами Уруджевич

ФГБОУ ВО «Дагестанский ГАУ им. М.М. Джамбулатова», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» Прикаспийский межрегиональный институт (филиал), г. Махачкала, Россия, профессор

д.т.н., профессор,
e-mail: ngulev2@gmail.com

Дадилов Айдемир Султанбегович
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» Прикаспийский межрегиональный институт (филиал), г. Махачкала, Россия, зав. кафедрой АТ,
к.т.н., доцент,
e-mail: dadilov82@mail.ru

Шихсаидов Багаудин Исаевич
Дагестанский государственный аграрный университет имени М.М. Джамбулатова, Махачкала, Россия, профессор
к.т.н., профессор,
e-mail: dekan-52@mail.ru

Абакаров Абакар Адамкадиевич
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» Прикаспийский межрегиональный институт (филиал), г. Махачкала, Россия, доцент
к.т.н., доцент,
e-mail: abakarmadi@list.ru

Information about the authors:

Gyulev Nizami Urudzhevich
Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University Caspian Interregional Institute (branch), Makhachkala, Russia, Professor
Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: ngulev2@gmail.com

Dadilov Aidemir Sultanbegovich
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University Caspian Interregional Institute (branch), Makhachkala, Russia, Head of the Department of AT,
PhD, Associate Professor,
e-mail: dadilov82@mail.ru

Shikhsaidov Bagaudin Isaevich
Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov, Makhachkala, Russia, Associate Professor
PhD, Associate Professor,
e-mail: dekan-52@mail.ru

Abakarov Abakar Adamkadievich
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Caspian Interregional Institute (branch), Makhachkala, Russia, Associate Professor
PhD, Associate Professor,
e-mail: abakarmadi@list.ru

УДК 656.09:004.9

Степаненко А.С., Шишкина В.Р., Батарагин И.Д.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ IT-РЕШЕНИЙ В АВИАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКЕ

Аннотация. *В статье рассматривается проблематика внедрения информационных технологий в процессы авиатранспортной логистики в условиях повышенных требований к скорости и надежности доставки. Исследуется потенциал современных информационных технологий (ИТ) как инструмента повышения эффективности и конкурентоспособности отрасли. Рассматриваются операции, выполняющиеся в процессе перевозки грузов. Анализируются ключевые вызовы, стоящие перед участниками логистической цепочки, включая сложность координации, недостаточную прозрачность и риск задержек. Факторами эффективности цепей поставок являются гибкость авиатранспортных систем, координация операций и использование информационных систем в процессе поставок. Актуальность исследования обусловлена тенденцией к цифровой трансформации транспортной логистики как стратегическому направлению развития перевозок. Рассматриваются различные подходы к инструментам транспортной логистики, в частности к интеллектуальным платформам управления транспортными процессами. Новизна заключается в выявлении «узких мест» организации конкретного перевозочного процесса. Смоделирован алгоритм внедрения TMS в логистическую цепочку на примере доставки товаров из Хабаровска к получателю в Москве, а также представлен и приведен способ расчета эффективности функционирования модели. Оценены перспективы дальнейшего развития ИТ в транспортной логистике, в частности развитие информационных систем в связи с применением технологий искусственного интеллекта.*

Ключевые слова: *Транспортная логистика, оптимизация перевозочного процесса, информационные технологии, цепи поставок.*

Постановка задачи и цель работы

В настоящее время, когда скорость выполнения работ и эффективность производства играют ключевую роль в конкурентоспособности бизнеса, авиаперевозки занимают особое место в глобальной логистической системе. Они обеспечивают быструю доставку грузов на дальние расстояния, позволяя компаниям - клиентам оптимизировать свои цепочки поставок и сокращать операционные расходы. Сложность и многогранность авиационной логистики, включающей множество участников, процессов и географических точек, требует постоянного совершенствования и оптимизации. В этой связи, вопрос эффективного управления логистическими цепочками в авиаперевозках выходит на первый план, а с учетом объемов информации, которые необходимо оперативно обрабатывать в процессе этого управления, требует использования информационных технологий (ИТ). Рассматривая существующие

подходы к внедрению программного обеспечения в операционную деятельность предприятий, являющихся частью цепей поставок, можно разделить их на платформенные и интегрированные решения. Для такой области как авиационная логистика следует рассматривать эти подходы отдельно друг от друга.

Целью данного исследования является разработка подходов к оптимизации логистических цепочек в авиаперевозках на основе внедрения современных информационных технологий, в частности интегрированных решений программного обеспечения. Методологической научной задачей является формирование общих подходов к цифровизации операций транспортной логистики с учетом необходимости положительной динамики показателей эффективности. Как решение прикладной задачи в работе рассматривается алгоритм внедрения программного обеспечения в управление цепями поставок.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

✓ Анализ текущего состояния логистических цепочек в авиаперевозках, выявление основных проблем и возможностей для оптимизации.

✓ Изучение современных интегрированных решений программного обеспечения, применяемых в авиационной логистике, оценка их значимости и потенциала для оптимизации процессов на основе изучения опыта и моделирования реальных ситуаций.

✓ Разработка рекомендаций по оптимизации логистических цепочек с помощью внедрения интегрированных решений программного обеспечения.

Объектом исследования является авиатранспортная система как составляющая часть авиатранспортной логистики. Предмет исследования – процесс внедрения и использования информационных технологий субъектами логистического процесса как в отдельных (локальных) точках (например, складской учет), так и глобально на всех этапах транспортировки (например, отслеживание отправки).

Развитие международных транспортных коридоров, проходящих через территорию Российской Федерации, дает импульс в развитии аэропортовой сети страны, позволяющей обеспечить бесперебойность поставок в отдаленные, от основных транспортных артерий регионы. А внедрение современных информационных технологий является необходимым условием для оптимизации логистических цепочек в авиаперевозках и повышения конкурентоспособности авиакомпаний в условиях глобальной экономики.

При рассмотрении глобальных цепей поставок, следует отметить важность аэропортов-хабов, играющих роль не только воздушных гаваней, но и транспортно-логистических узлов, выполняющих функцию распределительных центров грузов. Новизна исследования обусловлена созданием системы показателей критериальной оценки информационных систем при внедрении в процессы авиатранспортной логистики.

Результаты исследований в этой области могут быть использованы авиакомпаниями и логистическими операторами для разработки и реализации эффективных стратегий цифровой трансформации, для улучшения взаимодействия между участниками логистической цепочки и для повышения эффективности функционирования транспортных систем.

Анализ последних исследований

Логистика – это наука, которая изучает процессы снабжения, поставок и перевозок. Она помогает прогнозировать, контролировать и оптимизировать передачу товаров, услуг или информации между производителями, поставщиками и потребителями. В научной литературе вопросы логистики и применения ИТ в этой сфере рассматриваются в различных аспектах. Общие принципы логистики, включая процессы снабжения,

поставок и перевозок, анализируются в совместной работе А.А. Соколова и М.Ю. Сюткина [1]. Авторы подчеркивают, что эффективная логистика позволяет прогнозировать, контролировать и оптимизировать передачу товаров и информации между участниками цепочки поставок, что дает возможность сформировать базовые понятия решаемой задачи.

Узкоспециализированные решения в области авиационной логистики рассматриваются в контексте повышения общей эффективности и оптимизации затрат [2, 3]. Авторы акцентируют внимание на необходимости адаптации к новым технологиям и гибкости в подходах к изменяющимся требованиям рынка, отмечая, что инвестиции в IT-инфраструктуру и обучение персонала являются ключевым фактором успеха. Данное исследование позволяет обозначить вектор исследования как необходимость рассмотрения технологических решений оптимизации транспортных операций.

В научных работах подчеркивается роль цифровой трансформации и внедрения конкретных IT-решений в оптимизации логистических процессов [4-8]. Среди наиболее перспективных технологий выделяются: системы управления авиаперевозками (TMS) [9, 10], системы управления складом (WMS) [11, 12], системы отслеживания грузов (Track & Trace), блокчейн [13, 14] и искусственный интеллект (AI) [15-17]. Анализируя вышеназванные научные работы в контексте данного исследования, необходимо отметить, что интеграция в производство этих технологий позволяет автоматизировать операции, повысить прозрачность и эффективность логистических операций и, следовательно, увеличить скорость поставок, которая является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность логистики в авиации, наряду с надежностью доставки и отсутствием повреждений груза. Следовательно, рассмотрение вышеуказанных технологий создаст базу для определения «узких мест» процессов внедрения и барьеров цифровизации технологических процессов авиатранспортной логистики.

Увеличение скорости поставки, что является ключевым показателем транспортно-логистических компаний и фактором, обеспечивающим поддержание и развитие грузоперевозок, также требует применения таких современных технологий, как системы автоматической сортировки, системы управления запасами и системы оптимизации маршрутов [18].

Практические примеры внедрения IT-решений в логистических компаниях, таких как АЮСС-ВСТК и крупного дистрибьютора FMCG, демонстрируют конкретные результаты, включая ускорение сборки заказов, повышение точности комплектации, сокращение брака и снижение транспортных расходов.

Анализ текущего состояния авиационной логистики

Авиатранспортные системы, включенные в оптимизированные логистические цепочки – это относительно новая форма организации логистики, вызванная объективными внешними факторами. Данный формат логистики становится все более востребованным в условиях глобализации и роста объемов авиаперевозок. Особенно, с учетом развития международных транспортных коридоров, обеспечивающих поток грузов через территории нескольких стран и континентов.

Следует отметить, что использование предложенных решений и технологий должно учитывать специфику конкретной авиакомпании и особенности рынка. Только в этом случае внедрение IT-решений приведет к реальному улучшению логистических процессов и повышению конкурентоспособности субъекта.

Развитие современных информационных технологий открывает новые возможности для автоматизации и оптимизации логистических процессов. Внедрение

ИТ-решений, таких как системы управления складом (WMS), системы отслеживания грузов (Track&Trace) и системы управления транспортом (TMS), позволяет значительно улучшить координацию между участниками логистической цепочки, сократить время доставки, повысить прозрачность и снизить риски.

Авиационная логистика представляет собой сложную многоуровневую систему, объединяющую множество участников: грузоотправители, авиакомпании, аэропорты, таможенные службы, агенты и получатели грузов. Эффективное взаимодействие между которыми критически важно для обеспечения своевременной и безопасной доставки грузов.

Сложность и многокомпонентность логистических процессов в авиационных и смежных отраслях обусловлены необходимостью слаженного взаимодействия множества участников и синхронизации разноплановых операций. Каждый этап цепочки поставок зависит от четкой работы всех звеньев. Например, авиакомпании не только обеспечивают транспортировку грузов, но и должны согласовывать графики полетов с аэропортами, где грузы проходят погрузку, сортировку и временное хранение. При этом аэропорты выступают как узлы, где пересекаются интересы наземных служб, таможенной и экспедиторской служб. Таможенные службы, в свою очередь, требуют строгого соблюдения законодательных норм: проверка документов, досмотр грузов и т.д. Наземные перевозчики (автомобильные, железнодорожные) обеспечивают этапы логистической цепочки, доставляя грузы в аэропорт и от него к конечному получателю. Эффективность деятельности наземных перевозчиков зависит от точности операций: даже незначительная задержка рейса может привести к простою транспорта или необходимости переназначать маршруты.

Обработка грузов включает десятки процедур: от приемки и маркировки до упаковки в соответствии с авиационными стандартами. Ошибка при выполнении данного процесса, например, некорректная маркировка, может привести к задержке таможенного оформления или даже конфискации груза. Таможенное оформление — это многоступенчатый процесс, где необходимо подготовить декларации, сертификаты соответствия, лицензии и другие документы, специфичные для типа груза (например, фармацевтическая продукция или электроника). Таможенное оформление может проводиться либо непосредственно владельцем (декларантом) груза, либо таможенным представителем, действующим от имени и по поручению декларанта [19]. Транспортировка требует не только выбора оптимального маршрута, но и постоянного мониторинга перемещения груза. Например, перевозка скоропортящихся продуктов (рыба, фрукты) зависит от соблюдения температурного режима и скорости доставки, что усложняется при осуществлении пересадок между рейсами или при наземной логистике. Складирование же предполагает не просто хранение, но и управление запасами: необходимо учитывать сроки годности, условия хранения (влажность, температура) и оперативно реагировать на изменения спроса. К примеру, в аэропорту Шереметьево складирование организовано с учётом специфики грузов. Для свежей рыбы используются холодильные зоны с температурным режимом, а при работе с фармацевтическими грузами применяются системы мониторинга температуры и влажности в реальном времени.

Таким образом, ключевыми факторами обеспечения функционирования авиатранспортной логистики остаются координация, гибкость и использование инновационных решений для управления многокомпонентными процессами. Соответственно аналитика процессов будет лежать в области показателей (KPI), представленных в таблице 1.

Анализируя этапы выполнения операций в логистической цепи, следует отметить разделение показателей на категории «временных» и «качественных». Так как

показатели длительности операций являются ключевыми, их рассматриваем отдельно. Указанные качественные показатели сформированы исходя из стандартных качественных параметров логистического сервиса. Целевые значения обозначены в строгих пределах. Таблица 1 иллюстрирует предлагаемую авторами структуру показателей эффективности логистической цепочки для авиатранспорта.

Методология расчета показателей (KPI), представленных в таблице 1, основана на апробированных в отрасли подходах к выявлению отклонений сроков доставки грузов и представляет собой учет отклонения расчетного времени от фактического. Текущее состояние авиационной логистики требует расширения возможностей строить гибкие цепи поставок и увеличения гибкости систем. Для этих целей стоит рассмотреть цифровизацию транспортных процессов как ключевое решение повышения гибкости систем авиационной логистики.

Таблица 1

Показатели эффективности логистической цепочки для авиатранспорта

Этап логистической цепочки	Категория показателя	Показатель	Единица измерения	Целевое значение (Пример)
1. Приемка и обработка грузов в аэропорту отправления	Временные	Время приемки груза	Минуты/ груз	< 30 минут
	Качество	Процент ошибок при приемке	%	< 1%
2. Таможенное оформление	Временные	Среднее время таможенного оформления	Часы	< 4 часа
	Качество	Процент задержанных грузов	%	< 0,5%
3. Авиационная транспортировка	Временные	Время полета	Часы	Согласно расписанию
	Надежность	Процент задержек рейсов	%	< 5%
4. Приемка и обработка грузов в аэропорту назначения	Временные	Время выгрузки и обработки груза	Минуты/ груз	< 45 минут
	Безопасность	Сохранность грузов	%	> 99,9%
5. Наземная транспортировка (от аэропорта до конечного получателя)	Временные	Время доставки "последней мили"	Часы	< 24 часа
	Качество	Процент успешных доставок с первой попытки	%	> 95%
6. Общие показатели	Временные	Общее время доставки	Дни	-
	Финансовые	Общая стоимость логистики	Руб.	-
	Удовлетворенность клиентов	Уровень удовлетворенности клиентов	%	> 90%

Систематический мониторинг и анализ значений этих показателей позволит выявлять проблемные зоны в логистической цепочке авиаперевозок и разрабатывать эффективные решения для их оптимизации. Все это, в конечном итоге, повысит эффективность и конкурентоспособность авиаперевозок.

Цифровая трансформация логистических систем затрагивает несколько ключевых направлений. Первым шагом является цифровизация всей транспортной инфраструктуры, когда информация о грузах, воздушных судах самолетах, складах и прочих элементах цепочки поставок преобразуется в электронный вид и интегрируется в общую систему. Это формирует понятную цифровую среду, позволяющую контролировать грузопоток, отслеживать его составные части в реальном времени и, следовательно, сократить издержки. Однако, при формировании единой среды следует разделять платформенные и интегрированные решения. Цифровые платформы могут рассматриваться только в масштабе международных транспортных коридоров на участках, контролируемых одим государством или таможенными союзами. В этом случае возможно применение платформенных решений, в соответствии с единым государственным подходом. В случае рассмотрения внедрения программного обеспечения в авиационную логистику в целом, можно говорить об использовании интегрированных решений для участков цепи, не покрывающихся платформенными решениями.

Существующие логистические цепочки сталкиваются с рядом проблем, которые могут быть решены с помощью современных информационно-коммуникационных технологий.

- Системы управления авиаперевозками (TMS) – это комплексные решения, которые автоматизируют планирование, выполнение и анализ всех стадий авиаперевозки. Они способствуют оптимизации маршрутов, выбору наиболее подходящих типов воздушных судов, управлению запасами на складах и повышению прозрачности движения грузов. На рынке РФ существует более пятидесяти программных решений TMS, но этот рынок не является единым и предлагает много сфер применения. Например, не все системы подходят как для отправителей грузов, так и для их перевозчиков, поскольку функции зависят от типа транспортировки.
- Технологии отслеживания грузов (Track&Trace) обеспечивают непрерывный мониторинг местонахождения и состояния груза на всём пути следования. Применение GPS, радиометок и других технологий позволяет быстро реагировать на отклонения от заданного графика и информировать клиентов о состоянии доставки.
- Системы управления складом (WMS) применяются для автоматизации складских процессов, в частности для оптимального размещения грузов, эффективной комплектации и отгрузки заказов.

Внедрение WMS может упростить управление запасами, дублировать прибытия и изменения местоположения, которые до сих пор приходилось просматривать и проверять на месте. Использование WMS чрезвычайно эффективно, поскольку управление осуществляется точно с помощью штрих-кодов, а не просмотра товаров [6].

Интеграция WMS с TMS и системами отслеживания грузов обеспечивает создание единой цифровой платформы для управления всей логистической цепочкой.

- Технология блокчейн гарантирует прозрачный и безопасный обмен данными между всеми участниками логистической цепочки, исключая возможность подделки документации и искажения данных.

Одним из важных достоинств блокчейн-технологий является то, что с их помощью можно предоставить всем сторонам логистической цепочки полную историю перемещения товаров, так как почти все данные о доставке фиксируются и доступны в

защищенной базе данных. Это также позволяет мониторить груз практически в режиме реального времени и своевременно реагировать на любые проблемы [4].

- Искусственный интеллект (AI) находит своё применение для прогнозирования спроса на авиаперевозки, совершенствования маршрутов, заблаговременного предупреждения задержек рейсов и выявления мошеннических операций.

Интеграция AI в логистические процессы позволяет сократить операционные расходы и уменьшить вероятность человеческих ошибок, что особенно важно в условиях глобальных цепочек поставок, где скорость и точность доставки играют решающую роль [5]. Внедрение различных IT-решений позволяет значительно повысить эффективность, снизить затраты и улучшить качество обслуживания. Рассмотрим, как это работает на практике, изучив примеры из практики реальных игроков рынка.

АЮСС-ВСТК. Компания столкнулась с последствиями неэффективной организации складских процессов. Это создавало дополнительную нагрузку на персонал, затягивало выполнение операций и ограничивало возможности для роста бизнеса. Показатель сборки одной строки был в 3 раза ниже среднеотраслевых показателей, частая смена сотрудников приводила к большим затратам на обучение, помимо этого отсутствовали данные о производительности и качестве работы отдельных сотрудников, а также ручное распределение товаров замедляло работу.

Решением стало внедрение автоматизированной WMS российского производства, с помощью чего были достигнуты следующие результаты.

- Ускорение сборки. Время отбора одной строки сократилось в 1,7 раза — до 72 секунд. Это, конечно, выше среднеотраслевого показателя, но прогресс очевиден.
- Повышение точности. Показатель качества комплектации заказов вырос до 99%.
- Сокращение брака. Уровень брака при отборе товара снизился на 50%.
- Ускорение приемки. Скорость приемки товара на складе увеличилась на 30%.
- Ускорение адаптации. Срок адаптации новых сотрудников сократился с 30 до 2 рабочих дней.

Кроме того, компания смогла оцифровать все складские процессы, оптимизировать хранение товаров, внедрить более эффективные способы комплектации и создать справедливую систему оплаты труда.

Оптимизация TMS в FMCG дистрибуции – 15% экономии на транспорте.

Один из крупнейших дистрибьюторов FMCG столкнулся с проблемой высоких транспортных расходов и ручного управления логистикой. Внедрение системы управления транспортом (TMS) позволило радикально изменить ситуацию. Точное расписание рейсов, исключение дублирующих маршрутов и автоматизация согласования заявок с перевозчиками привели к сокращению затрат на транспортировку на 15% уже в первом квартале после внедрения. Этот кейс демонстрирует, что даже в относительно зрелых отраслях, таких как дистрибуция FMCG, есть огромный потенциал для повышения эффективности за счет IT.

Оба кейса демонстрируют, что внедрение IT-решений может принести значительную пользу компаниям, стремящимся повысить эффективность своей деятельности. Можно сказать, что автоматизация – это не просто модный тренд, а необходимость для компаний, стремящихся выжить и преуспеть в современном конкурентном мире. Для стандартизации и унификации процедур нужно применять гармонизацию нормативной базы. Единые стандарты оформления грузов и таможенных процедур могут значительно ускорить движение товаров и уменьшить административную нагрузку [20]. На основе вышесказанного авторами сформирована Таблица 2, анализирующая стандартные решения рынка для оптимизации авиационной логистики. Выявлены преимущества и недостатки технологий, применяемых для цифровизации технологических процессов.

Таблица 2

IT-решения для оптимизации авиационной логистики

Технология	Преимущества	Недостатки	Решения / Минимизация	Показатели
Системы управления авиаперевозками (TMS)	- Оптимизация маршрутов, выбор подходящих типов ВС. - Управление запасами на складах. - Прозрачность движения грузов. - Автоматизация планирования и выполнения.	- Высокая стоимость внедрения и поддержки. - Сложность интеграции с существующими системами. - Необходимость обучения персонала.	- Выбор модульных TMS с возможностью масштабирования. - Интеграция через API. - Обучение "ключевых" пользователей для последующего обучения других.	PG1-6 K2
Системы управления складом (WMS)	- Автоматизация складских процессов. - Оптимизация размещения грузов. - Эффективная комплектация и отгрузка заказов. - Интеграция с TMS и системами отслеживания	- Значительные затраты на внедрение и настройку. - Сложность адаптации к существующим складским процессам. - Зависимость от стабильности IT-инфраструктуры.	- Тщательное проектирование внедрения. - Выбор гибкой WMS с возможностью настройки под конкретные потребности. - Резервное копирование данных и оборудования.	PG5, PG6, K2
Системы отслеживания грузов (Track & Trace)	- Непрерывный мониторинг местонахождения и состояния груза. - Быстрое реагирование на отклонения от заданного графика. - Информирование о состоянии доставки.	- Зависимость от качества покрытия GPS и сотовой связи. - Высокая стоимость оборудования и связи. - Риск потери или кражи трекеров	- Использование различных технологий отслеживания (GPS, радиометки, RFID). - Выбор экономически эффективных решений. - Страхование грузов.	PG1-6 K2
Блокчейн	- Прозрачный обмен данными - Исключение подделки документации и искажения данных. - Отслеживание истории отгрузки.	- Сложность внедрения и интеграции. - Высокие требования к квалификации персонала. - Регуляторные вопросы.	- Пилотные проекты для отработки технологии. - Разработка стандартов и протоколов. - Сотрудничество с регуляторами.	PG1-6 K1-5
Искусственный интеллект (AI)	- Прогнозирование спроса на авиаперевозки. - Совершенствование маршрутов. - Предупреждение задержек рейсов. - Выявление мошеннических операций. - Оптимизация грузопотока.	- Необходимость больших объемов данных для обучения. - Риск ошибок при принятии решений. - "Черный ящик".	- Постоянное обучение и совершенствование алгоритмов. - Мониторинг и анализ результатов. - Разработка этических принципов использования AI.	PG5-6 K1, K3-5
Системы прогнозирования и оптимизации	- Прогнозирование спроса на авиаперевозки - Оптимизация маршрутов и графиков - Улучшение использования ресурсов - Минимизация задержек и сбоев	- Требуется большое количество исторических данных - Сложность интерпретации для принятия решений	- Регулярная переоценка моделей - Комбинирование с экспертными оценками - Разработка ясных интерпретационных руководств	PG5-6 K1, K3-5

Обозначены направления нивелирования недостатков, предложенного к анализу программного обеспечения. Выделяется системная проблема функционирования IT-решений, сложность интеграции с платформенными технологиями, применяемыми в авиатранспортной отрасли и высокая концентрация «узких мест», связанных с эксплуатацией серверов и оборудования в целом.

Внедрение современных информационных технологий является ключевым фактором оптимизации логистических цепочек в авиаперевозках [21]. Системы управления авиаперевозками (TMS), системы управления складом (WMS), системы отслеживания грузов (Track&Trace), блокчейн и искусственный интеллект (AI) предоставляют широкий спектр инструментов для автоматизации, повышения прозрачности и эффективности логистических операций. Адаптация к новым технологиям и гибкость к изменяющимся требованиям рынка являются ключевыми факторами успеха в будущем авиационной логистики. Инвестиции в IT-инфраструктуру и обучение персонала – необходимая предпосылка для повышения конкурентоспособности и устойчивого развития в этой динамичной отрасли [22, 23].

В долгосрочной перспективе интеграция IT-решений с другими транспортными системами, развитие "зеленых" технологий и обеспечение кибербезопасности будут определять будущее авиационной логистики [24].

В продолжение исследования максимально эффективного использования современных информационных технологий в авиаперевозках, авторами сформулированы принципы успешного внедрения и развития IT-решений в логистических целях:

1. Разработка комплексной стратегии цифровой трансформации. Необходимо определить цели, задачи и этапы внедрения IT-решений, учитывая специфику бизнеса и текущее состояние логистических процессов.
2. Выбор подходящих IT-решений. Следует провести тщательный анализ предложений рынка и выбрать те решения, которые наилучшим образом соответствуют потребностям компании и обеспечивают максимальный эффект.
3. Интеграция IT-систем. Необходимо обеспечить бесшовную интеграцию различных IT-систем для обмена данными и автоматизации бизнес-процессов.
4. Обучение персонала. Важно обеспечить обучение персонала работе с новыми IT-системами и технологиями.
5. Непрерывное совершенствование. Необходимо постоянно отслеживать эффективность внедренных IT-решений и совершенствовать их на основе полученных данных и обратной связи от пользователей.

Рассматривая внедрение цифровых продуктов, следует отметить необходимость целенаправленной цифровизации, что позволит контролировать динамику эффективности транспортных процессов и избежать усложнения операций. Для этого предлагается рассматривать оптимизацию процессов в логистической цепи на авиатранспорте как основную область внедрения программного обеспечения в авиатранспортную логистику.

Оптимизация логистических цепочек в авиаперевозках с использованием современных информационных технологий – это необходимый шаг для повышения конкурентоспособности и эффективности бизнеса в условиях глобальной экономики. Транспорт и логистика — это совокупность процессов, связанных с производством, хранением, инвентаризацией, доставкой и распределением определенных товаров или услуг. Иногда их называют транспортировкой и логистикой, они являются неотъемлемыми элементами всей цепочки поставок и включают в себя проактивные процедуры для безопасного и эффективного перемещения продукции от производителей к продавцам и далее к конечным пользователям или потребителям [2].

Перевозка грузов воздушным транспортом включает в себя ряд этапов, состоящих из забора груза от отправителя, терминальной обработки в аэропорту отправления, терминальной обработки в аэропорту прибытия, таможенной очистки и доставки до получателя. Авиакомпании совершают перелеты между аэропортами, которые могут осуществлять промежуточные перегрузы. На различных маршрутах используются воздушные суда различных типов, что накладывает ограничения на габаритные и массовые характеристики груза [3].

Процесс начинается с обращения отправителя в логистическую компанию. Специалист проводит детальную консультацию, выясняет характеристики груза, требуемые сроки доставки и особые условия перевозки. На основе полученной информации разрабатывается оптимальный маршрут из Хабаровска в Москву, с перевалкой для распределения грузов в Красноярске, так как перевозка консолидированная. Благодаря внедрению TMS, удастся минимизировать время и затраты на доставку груза. Логист рассчитывает предварительную стоимость услуг, учитывая все возможные расходы: авиатарифы, стоимость обработки груза, хранение и дополнительные услуги. После согласования условий начинается подготовка необходимой документации. Оформляется грузовая авианакладная, заявка грузоотправителя и сопроводительная документация. Специалист консультирует отправителя по вопросам упаковки и маркировки, проверяет соответствие груза требованиям авиаперевозок.

Груз будет транспортироваться вместе с отправками других поставщиков. Логистическая компания организует транспортировку консолидированного груза от места отправления до грузового терминала аэропорта. Груз доставляется автомобильным транспортом с соблюдением всех требований безопасности. На всем маршруте от поставщика до аэропорта груз отслеживается через систему TMS. По прибытии проводится проверка целостности упаковки и соответствия маркировки. В грузовом терминале производится проверка документов. Груз проходит взвешивание и обмер, проводится визуальный осмотр на соответствие заявленным характеристикам. Оформляется разрешение на погрузку, назначается конкретный рейс до Красноярска. После этого производится погрузка консолидированного груза на борт воздушного судна. Процесс контролируется сотрудниками аэропорта и логистической компании. Во время перелёта груз находится под наблюдением экипажа, а также отслеживается через внедренную систему TMS в режиме реального времени. Соблюдаются все температурные режимы и условия транспортировки.

По прибытии в Красноярск груз проходит разгрузочные операции. На этом этапе система TMS нужна для более быстрой сортировки консолидированных грузов и для дальнейшей отправки получателю. Сотрудники грузового терминала проводят проверку целостности упаковки и сверку документов. Груз временно хранится до момента регистрации на следующий рейс до Москвы. В это время проводится необходимая подготовка документации для дальнейшей транспортировки. После регистрации на рейс груз загружается на борт самолёта, следующего в Москву. В процессе перелёта осуществляется контроль за состоянием груза и соблюдением условий транспортировки, а также, благодаря системе TMS, груз отслеживается в реальном времени.

По прибытии в Москву производится выгрузка и первичная проверка груза. В московском аэропорту груз проходит финальную проверку документов и состояния упаковки. Производится сверка с данными авианакладной. После всех проверок организуется дальнейшая доставка груза до получателя. Во время транспортировки груз также отслеживается через внедренную систему TMS.

Анализ процесса, проведенный авторами, позволил сформировать перечень «узких мест» (рисков) данной логистической цепочки:

- длительные сроки обработки грузов в аэропортах;
- возможные задержки из-за плохих погодных условий на участках маршрута;
- сложности с таможенным оформлением;
- трудности с загрузкой транспортных средств из-за разнородных грузов.

Также сформированы показатели для отслеживания грузов (таблица 3) и показатели оценки эффективности рассматриваемой модели авиаперевозок с рекомендациями по методике их расчета (таблица 4). В таблицах используются следующие обозначения: PG (Performance Indicators for Goods tracking) — показатели, характеризующие непосредственно процесс перевозки и состояние груза; K (Key performance indicators) — показатели, позволяющие оценить экономическую и качественную эффективность от внедрения IT-решений.

Таблица 3

Показатели отслеживания грузов

Наименование	Показатель	Описание
PG1	Время доставки	Среднее время от забора груза у отправителя до доставки получателю
PG2	Стоимость доставки	Общие затраты на перевозку груза
PG3	Процент своевременных доставок	Отношение количества доставок, выполненных в срок, к общему числу доставок
PG4	Использование грузового пространства	Процент заполнения грузовых отсеков воздушных судов
PG5	Степень автоматизации операций	Процент операций, выполняемых автоматически с помощью AI
PG6	Удовлетворенность клиентов	Оценка клиентами качества обслуживания

При расчете эффективности модели, в связи с особенностями внедрения и настройки алгоритмов искусственного интеллекта, в частности высокой степени уникальности каждого внедряемого решения, требуется использовать количественную оценку процессов через динамику показателей, а качественную через обратную связь от клиентов и персонала (Таблица 4).

Таблица 4

Показатели оценки эффективности рассматриваемой модели авиаперевозок

Наименование	Показатель	Рекомендации для расчета
K1	Сравнение с текущими результатами	Сравнить время доставки, стоимость, процент доставок вовремя до и после внедрения AI
K2	Анализ динамики показателей	Отслеживать изменение показателей в течение определенного периода времени (например, ежемесячно или ежеквартально)
K3	Оценка возврата инвестиций (ROI)	Рассчитать, как быстро окупятся затраты на внедрение AI за счет снижения издержек и повышения эффективности
K4	Обратная связь от клиентов	Провести опросы клиентов для оценки их удовлетворенности и выявления областей для улучшения
K5	Сравнение с конкурентами	Оценить, насколько улучшенные показатели соответствуют или превосходят показатели конкурентов

Представленная система показателей обеспечит оценку внедрения цифровых продуктов в процессы выполнения технологических операций авиатранспортной логистики и позволит диверсифицировать предлагаемые рынком системы, рассматривая показатели в динамике при внедрении цифровых решений.

Выводы

Проведение аналитического исследования проблемы оптимизации логистических цепочек в авиаперевозках на основе внедрения современных информационных технологий показало следующее:

1. Оптимизация «цепей поставок» необходима в связи с высокой волатильностью мирового рынка, которая приводит к резким изменениям работы международных транспортных коридоров, что в свою очередь снижает устойчивость логистических систем.

2. Внедрение современных информационных технологий является ключевым фактором оптимизации логистических цепочек в авиаперевозках. Системы управления авиаперевозками (TMS), системы управления складом (WMS), системы отслеживания грузов (Track & Trace), блокчейн и искусственный интеллект (AI) предоставляют широкий спектр инструментов для автоматизации, повышения прозрачности и эффективности логистических операций.

3. Адаптация к новым технологиям и гибкость к изменяющимся требованиям рынка являются ключевыми факторами успеха в будущем авиационной логистики. Инвестиции в IT-инфраструктуру и обучение персонала – необходимая предпосылка для повышения конкурентоспособности и устойчивого развития в этой динамичной отрасли.

4. В долгосрочной перспективе интеграция IT-решений с другими транспортными системами, развитие "зеленых" технологий и обеспечение кибербезопасности будут определять будущее авиационной логистики.

5. Особое внимание следует уделить преодолению "узких мест", которые могут существенно замедлять логистические процессы и увеличивать издержки. Как показывает анализ, такие факторы, как длительные сроки обработки грузов в аэропортах, возможные задержки из-за погодных условий, сложности с таможенным оформлением и трудности с оптимальной загрузкой транспортных средств, требуют разработки специализированных стратегий. Особенностью авиационной логистики можно обозначить наличие интеграции решений в областях входов и выходов информации по процессам перевозки грузов, что подчеркивает необходимость создания единой конфигурации данных при использовании различного программного обеспечения на каждом из этапов перевозки грузов по транспортным коридорам.

6. Применение современных IT-решений, таких как системы прогнозирования, автоматизированное таможенное оформление и оптимизация загрузки на основе алгоритмов искусственного интеллекта, позволит устранить эти препятствия и значительно улучшить общую эффективность логистических цепочек.

7. Разработанная авторами система показателей (представленная в таблицах 3 и 4), включающая показатели отслеживания груза (PG) и показатели оценки эффективности модели авиаперевозок (K), может стать основой для формирования оценочной модели цифровых продуктов авиатранспортной логистики. Это составляет научную новизну данного исследования, так как предлагаемый подход позволяет проводить критериальную оценку эффективности внедрения информационных систем. На основании предложенных временных барьеров имеется возможность дальнейшего моделирования цифровых двойников систем при учете применения различных программных продуктов.

Для максимально эффективного использования преимуществ современных интегрированных информационных решений в авиаперевозках, авиакомпаниям и логистическим операторам необходимо предпринять ряд ключевых шагов, обеспечивающих успешное внедрение и развитие IT-решений в любой логистической цепочке. Это включает разработку комплексной стратегии цифровой трансформации, выбор подходящих IT-решений, обеспечивающих максимальный эффект, интеграцию IT-систем для обмена данными и автоматизации бизнес-процессов, обучение персонала работе с новыми IT-системами и технологиями, а также непрерывное отслеживание эффективности внедренных IT-решений и их совершенствование на основе полученных данных и обратной связи от пользователей.

Список литературы

1. Соколова А. А., Сюткина М. Ю. Логистические аспекты во внешнеэкономической деятельности: оптимизация цепочек поставок и снижение издержек // Актуальные вопросы таможенного законодательства : материалы XVI Межвузовской научно-практической конференции творческой молодежи, Красноярск, 27 июня 2025 г. – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2025. – С. 106–108. – EDN TWHGMP.

2. Рязанцев В. В. Транспортно-логистические системы: вызовы и перспективы // Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой : материалы VII Международной студенческой научной конференции, Москва, 21–22 мая 2025 г. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2025. – С. 1097–1105. – EDN QHRUZR.

3. Кривоносова О. О. Авиационная логистика и преимущества современных моделей грузового авиатранспорта в России // Наука в современном мире: приоритеты развития. – 2018. – Т. 2, № 1(4). – С. 53–55. – EDN YSIFCT.

4. Харин А. Д., Павлова Е. И. Роль блокчейн-технологий в оптимизации международных логистических цепочек // Транспорт и логистика устойчивого развития территорий, бизнеса, государства (драйверы роста, тренды и барьеры) : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 21 ноября 2024 г. – Москва : Государственный университет управления, 2025. – С. 340–343. – EDN SSABJI.

5. Пирлиева М., Акмырадова Г., Халапова М. Оптимизация логистических цепочек в условиях глобальной цифровизации: современные технологии и подходы // Инновационная наука. – 2024. – № 10-2. – С. 107–109. – EDN ZWYZVN.

6. Павлова А. В. Информационные системы в логистике // Новое слово в науке: стратегии развития : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 15 июня 2022 г. – Чебоксары : Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2022. – С. 169–173. – DOI 10.21661/r-556762. – EDN GFVBGC.

7. Сундуков Е. А., Паламарчук В. Р. Интеграция TMS и WMS для оптимизации транспортной логистики // Интеграция систем управления и логистики на транспорте : материалы Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, Москва, 18 апреля 2025 г. – Москва : Техполиграфцентр, 2025. – С. 61–64. – EDN TBGQRR.

8. Степаненко Е. В., Румянцева М. А., Юдина А. И. Цифровизация управления технологическими процессами на воздушном транспорте // Вестник транспорта Поволжья. – 2024. – № 1(103). – С. 60–68. – EDN LJTNKQ.

9. Удодов Ю. В., Савинская Д. Н. TMS-система фирмы «1С:TMS Логистика. Управление перевозками» // Информационное общество: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов XVII Международного форума, Краснодар,

16–20 июня 2025 г. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2025. – С. 79–81. – EDN AGRQVL.

10. Усманова Е. В. TMS-программы на российском рынке // Логистика – Евразийский мост : материалы XIX Международной научно-практической конференции, Красноярск, 24–28 апреля 2024 г. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2024. – С. 379–383. – EDN PVRVFO.

11. Терентьева В. И., Комкова А. В. Автоматизация управления складом: WMS решения // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 5-5. – С. 648. – EDN UAVRMT.

12. Шаляпин А. Д., Евщик П. В., Грицук И. А. WMS-системы как решение в складской логистике на примере Manhattan WMS // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 21 марта 2025 г. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2025. – С. 145–146. – EDN HXRECQ.

13. Никулина А. Е. Применение технологии блокчейн в логистике // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – Т. 1. – С. 103–105. – EDN IXKQDW.

14. Ковга Е. В., Мацко В. А. Автоматизация логистики строительных материалов: IOT и блокчейн в цепочках поставок // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 21 марта 2025 г. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2025. – С. 57–58. – EDN LEOGVU.

15. Шукуров М., Дурдыева А., Гурбаниязов К. Оптимизация цепей поставок и логистических процессов с использованием искусственного интеллекта и анализа больших данных // Инновационная наука. – 2024. – Т. 1, № 11-1. – С. 62–64. – EDN MPXLGS.

16. Тимофеева Д. А., Володина В. А. Роль искусственного интеллекта в оптимизации логистических процессов // Цифровая трансформация в технологических и транспортно-логистических системах : сборник материалов 83-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. Подсекция «Инновации на транспорте: устойчивое развитие транспортной отрасли и бизнеса», Москва, 31 января 2025 г. – Москва : Техполиграфцентр, 2025. – С. 61–64. – EDN YTAFYM.

17. Кузьмина Ю. В., Коренякина Н. Н. Искусственный интеллект в оптимизации логистических процессов // Интеллектуальные ресурсы – региональному развитию. – 2025. – № 1. – С. 753–758. – EDN FEHNDL.

18. Сафонова А. В. Анализ проблем развития региональных авиатранспортных систем // Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы. – 2024. – Т. 1, № 14. – С. 207–211. – EDN UBYWVY.

19. Карданов В. А. Правовая регламентация международных авиаперевозок грузов // Вестник Российского нового университета. Серия: Человек и общество. – 2019. – № 1. – С. 153–159. – DOI 10.25586/RNU.V9276.19.01.P.153. – EDN YWMAVN.

20. Шалабаева А. А., Жихарев В. Ю., Пахандрина Т. П. Эффективность логистических цепочек в международных перевозках: проблемы и пути оптимизации // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екибастуз, 15 мая 2025 г. – Прокопьевск : Кузбасский государственный технический университет, 2025. – С. 305–308. – EDN VXDIGI.

21. Власова А. В., Зайцев М. И. Внедрение IT-решений в производственные процессы аэропорта // Актуальные аспекты развития гражданской авиации (Авиатранс-2025) : материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 16–21 июня 2025 г. – Ростов-на-Дону : Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2025. – С. 147–155. – EDN CYXHAK.

22. Авиационные компетенции в современных реалиях / М. М. Алексеева, А. И. Боброва, Л. Г. Большедворская [и др.]. – Москва: Дашков и К, 2025. – 260 с. – ISBN 978-5-394-06243-8. – EDN NDROQD.

23. Степаненко Е. В., Васильева Н. В., Самородова Н. О. Об освоении ключевых компетенций при подготовке кадров для гражданской авиации Российской Федерации // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2025. – № 3. – С. 32–43. – EDN MQRFSG.

24. Сушко О. П., Юрченко М. В. Внедрение CRM технологий для повышения эффективности деятельности авиатранспортного предприятия // «Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности» (шифр – МКВСС) : сборник материалов XXXVIII Международной научно-практической конференции, Москва, 30 сентября 2025 г. – Москва : Университет ИТБО, 2025. – С. 232–241. – EDN AUZNEU.

References

1. Sokolova, A.A. and Syutkina, M.Yu. (2025), "Logisticheskie aspekty vo vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti: optimizatsiya tsepochek postavok i snizhenie izderzhek" [Logistics aspects in foreign economic activity: optimization of supply chains and cost reduction], *Aktual'nye voprosy tamozhennogo zakonodatel'stva* [Current issues of customs legislation], proceedings of the XVI Interuniversity scientific-practical conference of creative youth, Krasnoyarsk, June 27, 2025, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia, pp. 106–108.

2. Ryazantsev, V.V. (2025), "Transportno-logisticheskie sistemy: vyzovy i perspektivy" [Transport and logistics systems: challenges and prospects], *Innovatsionnye mekhanizmy upravleniya tsifrovoy i regional'noy ekonomikoy* [Innovative mechanisms for managing the digital and regional economy], proceedings of the VII International Student Scientific Conference, Moscow, May 21–22, 2025, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, pp. 1097–1105.

3. Krivonosova, O.O. (2018), "Aviatsionnaya logistika i preimushchestva sovremennykh modeley gruzovogo aviatransporta v Rossii" [Aviation logistics and advantages of modern models of air cargo transport in Russia], *Nauka v sovremennom mire: prioritety razvitiya*, vol. 2, no. 1(4), pp. 53–55.

4. Kharin, A.D. and Pavlova, E.I. (2025), "Rol' blokcheyn-tekhnologiy v optimizatsii mezhdunarodnykh logisticheskikh tsepochek" [The role of blockchain technologies in optimizing international logistics chains], *Transport i logistika ustoychivogo razvitiya territory, biznesa, gosudarstva (drayvery rost a, trendy i bar'ery)* [Transport and logistics of sustainable development of territories, business, state (growth drivers, trends and barriers)], proceedings of the III International scientific-practical conference, Moscow, November 21, 2024, State University of Management, Moscow, Russia, pp. 340–343.

5. Pirliyeva, M., Akmyradova, G. and Khalapova, M. (2024), "Optimizatsiya logisticheskikh tsepochek v usloviyakh global'noy tsifrovizatsii: sovremennye tekhnologii i podkhody" [Optimization of logistics chains in the context of global digitalization: modern technologies and approaches], *Innovatsionnaya nauka*, no. 10-2, pp. 107–109.

6. Pavlova, A.V. (2022), "Informatsionnye sistemy v logistike" [Information systems in logistics], *Novoe slovo v nauke: strategii razvitiya* [New word in science: development

strategies], proceedings of the All-Russian scientific-practical conference, Cheboksary, June 15, 2022, Interactive Plus, Cheboksary, Russia, pp. 169–173. DOI: 10.21661/r-556762.

7. Sundukov, E.A. and Palamarchuk, V.R. (2025), "Integratsiya TMS i WMS dlya optimizatsii transportnoy logistiki" [Integration of TMS and WMS for transport logistics optimization], *Integratsiya sistem upravleniya i logistiki na transporte* [Integration of management systems and logistics in transport], proceedings of the International Interuniversity scientific-practical conference of young scientists, Moscow, April 18, 2025, Tekhpoligraftsentr, Moscow, Russia, pp. 61–64.

8. Stepanenko, E.V., Rumyantseva, M.A. and Yudina, A.I. (2024), "Tsifrovizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami na vozdushnom transporte" [Digitalization of technological process management in air transport], *Vestnik transporta Povolzh'ya*, no. 1(103), pp. 60–68.

9. Udodov, Yu.V. and Savinskaya, D.N. (2025), "TMS-sistema firmy '1S:TMS Logistika. Upravlenie perevozkami'" [TMS-system of the company '1C:TMS Logistics. Transportation Management'], *Informatsionnoe obshchestvo: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Information society: current state and development prospects], proceedings of the XVII International Forum, Krasnodar, June 16–20, 2025, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia, pp. 79–81.

10. Usmanova, E.V. (2024), "TMS-programmy na rossiyskom rynke" [TMS-programs on the Russian market], *Logistika – Evraziyskiy most* [Logistics – Eurasian Bridge], proceedings of the XIX International scientific-practical conference, Krasnoyarsk, April 24–28, 2024, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia, pp. 379–383.

11. Terentyeva, V.I. and Komkova, A.V. (2015), "Avtomatizatsiya upravleniya skladom: WMS resheniya" [Warehouse management automation: WMS solutions], *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik*, no. 5-5, p. 648.

12. Shalyapin, A.D., Evshchik, P.V. and Gritsuk, I.A. (2025), "WMS-sistemy kak reshenie v skladskoy logistike na primere Manhattan WMS" [WMS-systems as a solution in warehouse logistics on the example of Manhattan WMS], *Nauka – transportnoy infrastrukture* [Science for transport infrastructure], proceedings of the III International scientific-practical conference of young scientists, students and college students, Gomel, March 21, 2025, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus, pp. 145–146.

13. Nikulina, A.E. (2020), "Primenenie tekhnologii blokcheyn v logistike" [Application of blockchain technology in logistics], *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke*, vol. 1, pp. 103–105.

14. Kovga, E.V. and Matsko, V.A. (2025), "Avtomatizatsiya logistiki stroitel'nykh materialov: IOT i blokcheyn v tsepochkakh postavok" [Automation of logistics of building materials: IoT and blockchain in supply chains], *Nauka – transportnoy infrastrukture* [Science for transport infrastructure], proceedings of the III International scientific-practical conference of young scientists, students and college students, Gomel, March 21, 2025, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus, pp. 57–58.

15. Shukurov, M., Durdyeva, A. and Gurbaniyazov, K. (2024), "Optimizatsiya tsepey postavok i logisticheskikh protsessov s ispol'zovaniem iskusstvennogo intellekta i analiza bol'shikh dannykh" [Optimization of supply chains and logistics processes using artificial intelligence and big data analysis], *Innovatsionnaya nauka*, vol. 1, no. 11-1, pp. 62–64.

16. Timofeeva, D.A. and Volodina, V.A. (2025), "Rol' iskusstvennogo intellekta v optimizatsii logisticheskikh protsessov" [The role of artificial intelligence in optimizing logistics processes], *Tsifrovaya transformatsiya v tekhnologicheskikh i transportno-logisticheskikh sistemakh* [Digital transformation in technological and transport-logistics systems], proceedings of the 83rd international scientific-methodological and scientific-research conference MADI. Subsection 'Innovations in transport: sustainable development of

the transport industry and business', Moscow, January 31, 2025, Tekhpoligraftsentr, Moscow, Russia, pp. 61–64.

17. Kuzmina, Yu.V. and Korenyakina, N.N. (2025), "Iskusstvennyy intellekt v optimizatsii logisticheskikh protsessov" [Artificial intelligence in optimizing logistics processes], *Intellektual'nye resursy – regional'nomu razvitiyu*, no. 1, pp. 753–758.

18. Safonova, A.V. (2024), "Analiz problem razvitiya regional'nykh aviatransportnykh sistem" [Analysis of problems in the development of regional air transport systems], *Nauka. Tekhnika. Chelovek: istoricheskie, mirovozzrencheskie i metodologicheskie problemy*, vol. 1, no. 14, pp. 207–211.

19. Kardanov, V.A. (2019), "Pravovaya reglamentatsiya mezhdunarodnykh aviaperevozok gruzov" [Legal regulation of international air cargo transportation], *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Chelovek i obshchestvo*, no. 1, pp. 153–159. DOI: 10.25586/RNU.V9276.19.01.P.153.

20. Shalabaeva, A.A., Zhikharev, V.Yu. and Pakhandrina, T.P. (2025), "Effektivnost' logisticheskikh tsepochek v mezhdunarodnykh perevozkakh: problemy i puti optimizatsii" [Efficiency of logistics chains in international transportation: problems and ways of optimization], *Povyshenie kachestva obrazovaniya, sovremennye innovatsii v nauke i proizvodstve* [Improving the quality of education, modern innovations in science and production], proceedings of the International scientific-practical conference, Ekibastuz, May 15, 2025, Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk, Russia, pp. 305–308.

21. Vlasova, A.V. and Zaitsev, M.I. (2025), "Vnedrenie IT-resheniy v proizvodstvennye protsessy aeroporta" [Implementation of IT solutions in airport production processes], *Aktual'nye aspekty razvitiya grazhdanskoy aviatsii (Aviatrans-2025)* [Current aspects of civil aviation development (Aviatrans-2025)], proceedings of the XIV All-Russian scientific-practical conference, Rostov-on-Don, June 16–21, 2025, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Rostov-on-Don, Russia, pp. 147–155.

22. Alekseeva, M.M., Bobrova, A.I., Bolshedvorskaya, L.G. et al. (2025), *Aviatsionnye kompetentsii v sovremennykh realiyakh* [Aviation competencies in modern realities], Dashkov i K, Moscow, Russia.

23. Stepanenko, E.V., Vasilyeva, N.V. and Samorodova, N.O. (2025), "Ob osvoenii klyuchevykh kompetentsiy pri podgotovke kadrov dlya grazhdanskoy aviatsii Rossiyskoy Federatsii" [On the development of key competencies in the training of personnel for civil aviation of the Russian Federation], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, no. 3, pp. 32–43.

24. Sushko, O.P. and Yurchenko, M.V. (2025), "Vnedrenie CRM tekhnologiy dlya povysheniya effektivnosti deyatel'nosti aviatransportnogo predpriyatiya" [Implementation of CRM technologies to improve the efficiency of an air transport enterprise], *"Vyzovy sovremennosti i strategii razvitiya obshchestva v usloviyakh novoy real'nosti"* ["Challenges of our time and strategies for the development of society in the new reality"], proceedings of the XXXVIII International scientific-practical conference, Moscow, September 30, 2025, Universitet ITBO, Moscow, Russia, pp. 232–241.

Stepanenko A.S., Shishkina V.R., Bataragin I.D.

INTRODUCTION OF INFORMATION TECHNOLOGIES OF AIR TRANSPORT LOGISTICS PROCESSES

Abstract. *The article discusses the challenges of implementing information technologies in the processes of air transport logistics in the context of increased requirements for speed and reliability of delivery. It explores the potential of modern information technologies (IT) as*

a tool for improving the efficiency and competitiveness of the industry. The article examines the operations performed during the transportation of goods. It analyzes the key challenges faced by the participants in the logistics chain, including the complexity of coordination, lack of transparency, and the risk of delays. The factors of supply chain efficiency include the flexibility of air transport systems, the coordination of operations, and the use of information systems in the supply process, which becomes especially relevant with the development of cargo flows through international transport corridors passing through the Russian Federation. This highlights the importance of optimizing aviation logistics using software products. The article discusses the advantages provided by air transportation management systems (TMS), cargo tracking technologies, blockchain, and artificial intelligence (AI). The relevance of the study is due to the trend towards digital transformation of transport logistics as a strategic direction for the development of transportation. The article examines various approaches to transport logistics tools, particularly intelligent transport process management platforms. The authors identify the "bottlenecks" in the transportation process. The algorithm of TMS implementation in the logistics chain is modeled on the example of goods delivery from Khabarovsk to the recipient in Moscow, and the method of calculating the efficiency of the model functioning is presented and given. The prospects for further development of IT in transport logistics, in particular the development of information systems in connection with the use of artificial intelligence technologies, are estimated.

Key words: *Air transportation, logistics chain, optimization, information technology, digitalization, automation, artificial intelligence.*

Сведения об авторах:

Степаненко Анастасия Сергеевна
Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)
г. Москва, Российская Федерация
доцент кафедры «Организация перевозок на воздушном транспорте», к.т.н.
e-mail: xumeraass@mail.ru

Шишкина Виктория Романовна
Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)
г. Москва, Российская Федерация
студентка 3 курса
e-mail: virosha23062005@mail.ru

Батарагин Илья Дмитриевич
Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)
г. Москва, Российская Федерация
студент 4 курса
e-mail: ilya010105@mail.ru

Information about the authors:

Stepanenko Anastasia Sergeevna
Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), Moscow, Russia

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Organization of air transportation Department
e-mail: xumeraass@mail.ru

Shishkina Victoria Romanovna
Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), Moscow, Russia
3rd year student
e-mail: virosha23062005@mail.ru

Bataragin Ilya Dmitrievich
Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), Moscow, Russia
4th year student
e-mail: ilya010105@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА»

1 Материалы статей представляются в двух видах, содержание которых должно полностью совпадать.

Печатный экземпляр (1 шт.): текст отформатирован, распечатан с высоким качеством (пригодным для сканирования) на лазерном или струйном принтере на белой бумаге формата А4 (210 × 297 мм).

Электронная версия (файл): единый файл в формате Microsoft Word с расширением .docx (предпочтительно) или .doc. Рекомендуемый объем рукописи — 10–20 страниц включая аннотации, рисунки, таблицы и список литературы.

Параметры оформления текста:

Шрифт: Times New Roman.

Кегль: 12 pt (для основного текста, аннотаций и списка литературы).

Межстрочный интервал: одинарный (1.0).

Выравнивание: по ширине.

Абзацный отступ: 1 см (устанавливается через параметры абзаца, а не с помощью пробелов или табуляции).

Поля страницы: верхнее – 25 мм, нижнее – 20 мм, левое – 25 мм, правое – 25 мм.

Отступы для колонтитулов: от верхнего края – 12.5 мм, от нижнего края – 22 мм.

Колонтитулы и номера страниц не добавляются.

2. Структура рукописи (последовательность на первой и последующих страницах). Элементы должны располагаться строго в указанном порядке:

1) **УДК** — указывается в левом верхнем углу первой страницы.
2) **Пропуск строки.**
3) **Авторы:** Фамилии и инициалы авторов на языке оригинала статьи (например, *И.И. Иванов, П.П. Петров*) — по центру, курсивом.
4) **Пропуск строки.**
5) **Название статьи** на языке оригинала — по центру, **ПОЛУЖИРНЫМИ ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ**, без переносов.
6) **Пропуск строки.**
7) **Аннотация** на языке оригинала статьи (объем 100–150 слов). Должна быть структурированной и отражать цель, методы, основные результаты и выводы работы.
8) **Ключевые слова** на языке оригинала (5–10 слов или словосочетаний).
9) **Пропуск строки.**
10) **Основной текст статьи** — без расстановки переносов. Обязательная структура: Постановка задачи, Анализ последних исследований и публикаций, Цель работы, Основная часть (с подразделами), Выводы. Между разделами — пропуск строки.
11) **Благодарность/Финансирование** (при наличии)
12) **Пропуск строки**
13) **Acknowledgments/Funding** (при наличии)
14) **Пропуск строки**
15) **Список литературы (References).** Объем — 20 - 30 источников. Оформляется **по ГОСТ Р 7.0.100-2018 (Библиографическая запись)**. Ссылки в тексте — в квадратных скобках, арабскими цифрами, например [1], [2, с. 15]. **Обязательно указывать DOI** для всех источников, где он присвоен.
16) **Пропуск строки.**

17) **Метаданные на английском языке** (если статья на русском) или на русском (если статья на английском):
   - Фамилии и инициалы авторов (курсив, по центру).
   - Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру).
   - **Abstract** (объем 100–150 слов).
   - **Keywords** (5–10 слов).
18) **Сведения об авторах (на русском и английском языках):** ФИО полностью, место работы (полное официальное название в именительном падеже), должность, ученая степень, ученое звание, ORCID (при наличии), E-mail для контактов.

3. Статья должна содержать такие разделы: постановка задачи, анализ последних исследований, цель работы, основную часть и выводы. Между разделами ставится интервал. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки Вестника на компьютере.

4. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы lim, ln, arg, const, sin, cos, min, max и т.д. набираются прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5. Формулы. Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word, отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстрированный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6. Рисунки и фотографии, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисуночная подпись обязательны.

7. Таблицы следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8. Список литературы приводится общим списком в конце статьи и составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначаются арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно. Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9. Материалы, прилагаемые к статье, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):
- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Занимаемая должность.
- Ученая степень, ученое звание.
- E-mail.
- Аннотация.
- Ключевые слова.

УСЛОВИЯ И ПОРЯДОК ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА»

1. Статья должна быть оформлена в соответствии с приведенными выше требованиями.

2. Автор имеет право опубликовать в номере не более двух статей.

3. Автор может прислать статью в адрес редакции:

- по почте;
- по электронной почте;
- передать лично ответственному секретарю.

4. Статья должна соответствовать тематике журнала. Публикуются результаты фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований по направлениям:

- системный анализ, управление и обработка информации, статистика;
- наземные транспортно-технологические средства и комплексы;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- эксплуатация автомобильного транспорта;
- логистические транспортные системы.

5. Редакционная коллегия принимает статьи к публикации после тщательной научной экспертизы. Отбираются статьи, представляющие научный интерес и вносящие новый вклад в разработку проблематики. Статьи публицистического характера не принимаются.

6. Решение о возможности публикации статьи принимается на заседании редколлегии только при наличии положительной рецензии.

7. Все расходы по подготовке и изданию журнала несет академия.

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА»

Вестник Донецкой академии транспорта зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-89466 от 06 мая 2025 г.

С 24 июня 2025 включен 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». Тематические направления журнала соответствуют следующим научным специальностям:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки);

2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки);

2.9.9 – Логистические транспортные системы (технические науки).

Учредителем и издателем Вестника Донецкой академии транспорта является Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта»

Главный редактор журнала – доктор технических наук, доцент И.П. Энглези.

В состав редакционной коллегии журнала входят ведущие ученые России и ближнего зарубежья.

Научный журнал выходит с периодичностью 4 номера в год.

Вестник Донецкой академии транспорта зарегистрирован в национальном центре ISSN Российской Федерации и имеет номер ISSN 3034-6681; бесплатно рассылается центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации и включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и входит в Единый государственный перечень научных изданий (ЕГПНИ)

Почтовый адрес редакции:

283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7.

Донецкая академия транспорта.

Редакция Вестника Донецкой академии транспорта.

Телефон: +7 (949)3076242.

E-mail: rector@dat-dn.ru.

Архив Сборника и требования по оформлению статей размещены на сайте https://journal.dat-dn.ru/.

Научное издание

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№ 1
2026

(на русском и английском языках)

Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования РИНЦ и Science Index
Входит в Единый государственный перечень научных изданий (ЕГПНИ)

Требования к оформлению статей размещены на сайте
https://journal.dat-dn.ru/

Ответственный за выпуск – Н.В. Володарец

Компьютерная верстка – А.С. Маренич

Литературная обработка – Н.И. Бочарова, Е.М. Загороднова

Формат 60x84⅛. Усл. печ. л. 28,83. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Знак информационной продукции 16+
Подписано в печать 30.03.2026.
Дата выхода в свет 31.03.2026.

Учредитель:
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Донецкая академия транспорта»

Адрес учредителя и редакции:
283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7, тел. +7 (949) 3076242;
e-mail: rector@dat-dn.ru

Издатель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»
385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Донецкая академия транспорта»
283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7