ISSN 3034-6681

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА»

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№3
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**

№3

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
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**

№3

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
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

Агамиров В.Л., Агамиров Л.В., Вестяк К.В., Дыбалева А.П., Тутова Н.В. Разработка структурно-параметрической модели автоматической коробки передач с использованием сетей Петри, генетических алгоритмов и глубокого обучения 10

Сас С.И., Кузнецов В.М., Васендина И.С., Филиппова Н.А., Блохин А.Н., Гурьев А.Т., Шошина К.В. Разработка алгоритма управления для автономной навигации вездехода в неструктурированной среде на приарктических территориях 25

Володарец Н.В. Теоретические основы управления дорожным движением в условиях неопределённости 46

Пеньков А.С., Костоглотов А.А., Тавунов В.П. Анализ эффективности расширенного фильтра Калмана на основе кватернионной динамической модели при оценке пространственной ориентации автономных транспортных средств 62

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

Богумил В.Н., Власов В.М., Гусейналиев Ю.В. Повышение безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах на основе внедрения инструментальных методов контроля качества работ по их содержанию 77

Ван Чжэньюй, Зузов В.Н. Методика поиска оптимальных параметров кузова и сварных точек в нём грузопассажирского автомобиля для обеспечения пассивной безопасности и минимальной массы при фронтальном ударе с воздействием груза на кабину 88

Корытов М.С., Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю., Кашапова И.Е. Интерполяция неровности микрорельефа опорной поверхности наземной машины с использованием радиальных базисных функций 105

Лесковец И.В., Савельев С.В. Нагрузки в гусеничном движителе бульдозера при работе в режиме копания грунта 120

Лиджеев Д.В., Гончаров Р.Б., Евсеев К.Б. Исследование травмобезопасности водителя в зависимости от типа бокового удара 130

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

Юркова Е.О., Ильиных А.С., Култан М.А., Бармин Н.Н. Применение имитационного моделирования при анализе технологических процессов капитального ремонта железнодорожного пути 147

Григоренко Н.И. Интеграция цифровых и иммерсивных решений в автомобильные транспортные системы..... 162

Караева М.Р. Оптимизация параметров транспортно-логистических коридоров приграничных территорий: многоуровневый подход 181

Караева М.Р., Ефимов А.Д. Многокритериальный анализ устойчивости транспортной системы Крымского полуострова на основе данных 192

Кудрявцев А.А., Оленин М.В., Раковский Е.В., Филатов В.В. Методы машинного обучения в задаче прогнозирования времени прибытия наземного городского пассажирского транспорта на конечный остановочный пункт 204

Смирнов А.С., Филиппова Н.А., Мельник А.А., Бур А.Н. Развитие арктических транспортных систем на основе оптимизации процессов перевозок техникой высокой проходимости и технологий автономии..... 220

Фиалкин В.В., Зырянов В.В. Определение допустимой интенсивности входящего потока по критерию заданного периода устойчивого функционирования внешней улично-дорожной сети терминального комплекса 232

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Грязнов М.В., Пыталева О.А., Гасилова О.С., Серебряков В.М. Влияние интенсивности и состава транспортного потока на уровень городского шума..... 248

Иванов В.П., Зеньков В.А. Организация безотказной работы автомобильных агрегатов..... 261

Маврин В.Г. Влияние эксплуатационных факторов на технико-экономические показатели работы парка специализированных автотранспортных средств при перевозке промышленных отходов 271

Попков Т.Б., Евтюков С.А., Ануфриев К.А. Увод автомобиля при прямолинейном движении как результат несовершенства подсистемы «колесо-автодорога» (на примере шин и колесных дисков)..... 281

Феофилова А.А., Ху Лижу. Временные закономерности выезда населения автомобильным транспортом при чрезвычайных ситуациях 293

Филиппова Н.А., Власов В.М., Богумил В.Н., Сивцев С.А., Лебедев М.П., Мордовской П.Г. Прогнозирование начала и окончания работы автозимника по статистическим данным о метеорологических явлениях с использованием модели Хромова 312

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Кольева Н.С., Орлова Т.С., Кортенко Л.В., Зюзина А.С., Гибадуллин Т.В. Динамическая маршрутизация в логистике на основе IoT-данных и модифицированного алгоритма A* 321

Требования к оформлению статей для публикации в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 334

Условия и порядок публикации статей в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 336

Краткая информация о научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 337

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING, STATISTICS

Agamirov V.L., Agamirov L.V., Vestyak K.V., Dybaleva A.P., Tutova N.V. Development of a structural-parametric model of an automatic transmission using Petri nets, genetic algorithms and deep learning 10

Sas S.I., Kuznetsov V.M., Vasendina I.S., Filippova N.A., Blokhin A.N., Guryev A.T., Shoshina K.V. Development of an algorithm for static obstacle avoidance by an autonomous all-terrain vehicle in the Arctic regions 26

Volodarets N.V. Theoretical foundations of traffic management under uncertainty..... 46

Penkov A.S., Kostoglotov A.A., Tavunov V.P. Efficiency analysis of the extended Kalman filter based on a quaternion dynamic model for estimating the spatial orientation of autonomous vehicles..... 62

GROUND TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL FACILITIES AND COMPLEXES

Bogumil V.N., Vlasov V.M., Guseinaliev Yu.V. Improving road safety on motorways by implementing instrumental methods for quality control in maintenance..... 77

Wang Zhengyu, Zuzov V.N. Methodology for optimization of the body and spot welds of a cargo-passenger vehicle for passive safety and minimum mass under frontal impact with cargo impact on the cab..... 88

Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Sukharev R.Yu., Kashapova I.E. Interpolation of the unroughness of the microrelief of the support surface of a ground machine using radial basis functions..... 105

Leskovets I.V., Saveliev S.V. Loads in the tracked undercarriage of a bulldozer during soil digging operation..... 120

Lidzheev D.V., Goncharov R.B., Evseev K.B. Analysis of driver injury safety depending on the type of side impact 130

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

Yurkova E.O., Ilinykh A.S., Kultan M.A., Barmin N.N. Application of simulation modeling in the analysis of technological processes for major railway track repairs 147

Grigorenko N.I. Integration of digital and immersive solutions into automobile transport systems 162

Karaeva M.R. Optimization of transport and logistics corridors parameters in border areas: a multi-level approach..... 181

Karaeva M. R., Efimov A. D. Multi-criteria data-driven sustainability analysis of the transportation system in the Crimean Peninsula 192

Kudryavtsev A.A., Olenin M.V., Rakovsky E.V., Filatov V.V. Machine learning methods for predicting the arrival time of land-based urban passenger transport at the final stop 204

Smirnov A.S., Filippova N.A., Melnik A.A., Bur A.N. Development of Arctic transport systems based on optimization of high-mobility vehicles and autonomy technologies 220

Fialkin V.V., Zyryanov V.V. Determining the admissible inbound flow rate based on a target period of stable operation of the external road network adjacent to a terminal complex 232

OPERATION OF MOTOR TRANSPORT

Gryaznov M.V., Pytaleva O.A., Gasilova O.S., Serebryakov V.M. Influence of traffic flow intensity and composition on urban noise level 248

Ivanov V.P., Zenkov V.A. Organization of failure-free operation of automobile units..... 261

Mavrin V.G. The influence of operational factors on the technical and economic performance of a fleet of specialized vehicles in the transportation of industrial waste..... 271

Popkov T.B., Evtyukov S.A., Anufriev K.A. Vehicle withdrawal in straight-line motion as a result of imperfections in the "wheel-highway" subsystem (using tires and rims as an example) 281

Feofilova A.A., Hu Liru. Temporal patterns of population departure by car during emergencies 293

Filippova N.A., Vlasov V.M., Bogumil V.N., Sivtsev S.A., Lebedev M.P., Mordovskoy P.G. Forecasting the start and end of winter road operations based on statistical data on meteorological events using the Khromov model 312

LOGISTIC TRANSPORT SYSTEMS

Kolyeva N.S., Orlova T.S., Kortenko L.V., Zyuzina A.S., Gibadullin T.V. Dynamic routing in logistics based on IoT data and a modified A* algorithm 321

Requirements for the design of articles for publication in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta" 334

Conditions and procedure for the publication of articles in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta" 336

Brief information about the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta" ... 337

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 629.424.1:621.319.4

Агамиров В.Л., Агамиров Л.В., Вестяк К.В., Дыбалева А.П., Тутова Н.В.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ, ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. *В работе представлен комплексный подход к моделированию и оптимизации 9-ступенчатой автоматической коробки передач. Предложена гибридная модель, сочетающая математическое описание непрерывных физических процессов (динамика давления, движение поршней, передача момента) и дискретную управляющую логику на основе сетей Петри. Для настройки параметров управления применен генетический алгоритм, позволивший сократить время переключения на 12,5% и снизить пиковое давление на 15,1% путем оптимизации весовых коэффициентов управляющего сигнала. Разработан программный комплекс на Python, включающий имитационную модель и инструменты для анализа и визуализации. Для валидации гибридной модели и демонстрации потенциала методов искусственного интеллекта в задачах управления трансмиссией дополнительно реализована и протестирована прогнозная модель на основе гибридной архитектуры CNN-LSTM, показавшая точность предсказания событий переключения передач до 100% и точность определения текущей передачи 99,7%. Особенностью работы является разработка специализированного конвертера для моделей сетей Петри в формате PNML (Petri Net Markup Language) в исполняемый Python-код, что значительно ускорило процесс разработки и верификации гибридной системы. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность и перспективность предложенного комбинированного подхода для задач проектирования, калибровки и создания адаптивных систем управления современными мехатронными системами трансмиссии.*

Ключевые слова*: АКПП, сети Петри, генетический алгоритм, глубокое обучение, CNN-LSTM, имитационное моделирование, гидравлическая система, управление переключением передач, мехатроника, автоматическая генерация кода.*

Постановка задачи

Современная автоматическая коробка передач (АКПП) представляет собой сложную мехатронную систему, интегрирующую механические, гидравлические и электронные компоненты [1]. Тенденция к увеличению числа передач (до 9-10 ступеней) обусловлена стремлением повысить топливную экономичность, улучшить динамические характеристики и снизить нагрузку на двигатель [2,3]. Однако рост сложности механической части (планетарные ряды, фрикционные муфты) и

«комбинаторный взрыв» вариантов управления делают традиционные методы проектирования и калибровки недостаточно эффективными [4].

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки новых интеллектуальных методов управления, способных адаптироваться к условиям эксплуатации и стилю вождения [5]. В настоящее время для моделирования АКПП применяются различные подходы: математическое моделирование физических процессов [6], дискретно-событийное моделирование логики управления [7], методы оптимизации и машинного обучения [8]. Однако большинство существующих решений рассматривают эти аспекты изолированно, что не позволяет в полной мере учесть взаимовлияние непрерывных и дискретных процессов в системе [9]. Кроме того, наблюдается методологический разрыв между классическими методами параметрической оптимизации и перспективными подходами на основе глубокого обучения [10], а также отсутствие инструментов для автоматического преобразования формальных моделей в исполняемый код.

Анализ последних исследований

Современные исследования управления автоматическими трансмиссиями демонстрируют активное развитие нескольких взаимодополняющих направлений. Математическое моделирование гидромеханических процессов (динамика давления, перемещение поршней, передача крутящего момента) достигло высокой степени детализации благодаря численному решению систем дифференциальных уравнений и применению методов конечных элементов. Однако эти подходы не учитывают дискретно-событийную природу алгоритмов переключения, что приводит к методологическому разрыву при верификации сложных логико-управляющих структур.

В формальном моделировании логики управления мехатронных систем сети Петри остаются доминирующим аппаратом, позволяя решать задачи достижимости, выявлять конфликты и строить недетерминированные сценарии переключения. Современные работы, включая материалы конференции Petri Nets 2024, предлагают модульные P/T-сети для киберфизических систем и верификации цифровых двойников, однако на практике применительно к трансмиссиям это чаще всего базовые модели без расширенной семантики, а главное — отсутствует инструментарий для автоматической генерации исполняемого кода из PNML-формализаций, из-за чего теоретическая модель так и остается оторванной от реального кода.

Параллельно методы эволюционной оптимизации вроде генетических алгоритмов и NSGA-II хорошо зарекомендовали себя для многокритериальной настройки управляющих сигналов с учетом времени переключения, пикового давления и энергопотребления, но они работают в рамках жестко заданной структуры сигнала и не подстраиваются под нелинейности, которые проявляются в данных. Глубокое обучение, напротив, выдает впечатляющую точность классификации и прогнозирования событий переключения, особенно в гибридных архитектурах CNN-LSTM, однако такие модели остаются «черными ящиками», несовместимыми с формальной верификацией и требующими больших размеченных массивов данных, которые для АКПП редко доступны в полном объеме. В итоге сегодняшний ландшафт страдает от четырех системных разрывов: непрерывная физика и дискретная логика существуют отдельно друг от друга, нет готового конвейера PNML→Python с поддержкой машинного обучения на переходах, гибридные подходы, объединяющие интерпретируемость генетических алгоритмов с мощью нейросетей, практически не проработаны, а верификация формальных моделей и параметрическая оптимизация живут каждая своей жизнью, не пересекаясь в практическом контуре управления. Данная работа устраняет указанные ограничения, предлагая интегрированную гибридную модель АКПП,

объединяющую математическое описание физики, логику сетей Петри с автогенерацией кода, генетическую оптимизацию параметров и CNN-LSTM валидацию в едином программном комплексе Python.

Цель работы

Научная новизна работы состоит в создании и валидации гибридной структурно-параметрической модели автоматической коробки передач, объединяющей несколько взаимодополняющих компонентов в единой вычислительной среде. В модели сочетаются непрерывное математическое описание гидромеханических процессов и формальная дискретно-событийная логика переключений, основанная на сетях Петри, что позволяет совместно учитывать динамику физических параметров и структуру управляющих переходов. Для настройки управляющих коэффициентов применяется эволюционный алгоритм параметрической оптимизации, а для независимой проверки корректности функционирования системы и анализа потенциала методов искусственного интеллекта используется прогнозная модель на основе архитектуры CNN-LSTM. Существенным элементом разработанного подхода является специализированный конвертер ColabPNMLConverter, обеспечивающий автоматическую генерацию исполняемого Python-кода из формальных моделей сетей Петри и тем самым сокращающий разрыв между моделированием и практической реализацией. Предложенная методика реализована в виде программного комплекса на Python, включающего средства моделирования, анализа и визуализации гибридной системы управления.

Общая структура модели

Разработанная модель включает следующие взаимосвязанные компоненты.

1) Математическая модель физических процессов: система дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих динамику давления в гидравлической системе, движение исполнительных механизмов и передачу крутящего момента [6].

2) Модель логики управления на основе сетей Петри: формальное описание дискретных состояний и переходов между передачами [11].

3) Модуль параметрической оптимизации: генетический алгоритм для настройки весовых коэффициентов в управляющем сигнале [12].

4) Прогнозно-валидационный модуль: гибридная CNN-LSTM модель для предсказания состояний АКПП и независимой валидации работы системы [13].

5) Модуль автоматической генерации кода: конвертер ColabPNMLConverter для преобразования PNML-моделей в исполняемый Python-код.

6) Визуализация: инструменты для графического представления результатов моделирования.

1. Математическая модель физических процессов

1.1. Управляющий сигнал

Управляющий сигнал $u(t)$, формируемый электронным блоком управления трансмиссией (ТСМ), описывается взвешенной суммой нормализованных параметров [14,15]:

$$u(t) = k_u \cdot (k_\theta \cdot \theta + k_v \cdot v + k_\omega \cdot \omega + k_{T_{охл}} \cdot T_{охл} + k_R \cdot R + k_{T_M} \cdot T_M) \quad (1)$$

где $\theta \in [0;1]$ — нормализованный угол нажатия педали акселератора, $v \in [0;1]$ — нормализованная скорость автомобиля, $w \in [0;1]$ — нормализованные обороты двигателя, $T_{охл}, T_м \in [0;1]$ — нормализованные температуры, $R \in \{-1,0,1\}$ — положение

селектора, k_u — коэффициент масштабирования. Изначально весовые коэффициенты $k_\theta, k_v, k_w, k_{T_{охл}}, k_R, k_{T_м}, k_u$ были определены эмпирически. В разделе 5.2 описывается их оптимизация с помощью генетического алгоритма.

1.2. Динамика гидравлической системы

Давление в гидравлической линии описывается уравнением [16]:

$$P(t) = \frac{E_f \cdot x_p(t)}{V_0 - A_p \cdot x_p(t)}\ , \tag{2}$$

где $E_f = 1{,}5\times10^9$ Па — модуль упругости жидкости, $V_0 = 5\times10^{-5} м^3$ — начальный объем, $A_p = 0{,}001\, м^2$ — площадь поршня, $x_p(t)$ — перемещение поршня.

Движение поршня моделируется уравнением [17]:

$$m_p \cdot x_p^{''} + b_p \cdot x_p^{'} + p(t)\cdot A_p = F_S(t)\ , \tag{3}$$

где $m_p = 0{,}1$ кг — масса поршня, $b_p = 50\ Н\cdot с / м$ — коэффициент демпфирования, $F_s(t)$ —управляющая сила от соленоида.

1.3. Передаваемый крутящий момент

Момент, передаваемый фрикционной муфтой [18]:

$$M(t) = \mu_f \cdot A_f \cdot P(t) \cdot r_f\ , \tag{4}$$

где $\mu_f = 0{,}12$ — коэффициент трения, $A_f = 0{,}01 м^2$ — эффективная площадь трения, $r_f = 0{,}08 м$ — средний радиус трения.

2. Модель логики управления на основе сетей Петри

Сети Петри широко применяются для моделирования дискретных систем, в том числе мехатронных [11, 19]. Для формализации логики переключения передач разработана модель на основе сетей Петри, приведенная на рис. 1. Сеть Петри для управления одной передачей определяется кортежем:

$$PN = (P, T, F, W, M_0), \tag{5}$$

где $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_7\}$ — множество позиций, $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_7\}$ — множество переходов, $F \subseteq (P\times T)\cup(T\times P)$ — отношение инцидентности, $W : F \to \mathbb{N}$ — вес дуг, $M_0 : P \to \mathbb{N}$ — начальная разметка.

3. Автоматическая генерация кода для моделей управления

Для формализации и автоматизации реализации дискретно-событийной компоненты разработан специализированный конвертер ColabPNMLConverter (https://colab.research.google.com/drive/1WgyAfSbqDBZ0AvPdeqYoNCgFvxVnDcCh), преобразующий модели сетей Петри в формате PNML (Petri Net Markup Language) в исполняемый Python-код. Данный инструмент позволяет преодолеть ограничения среды Google Colab, где установка специализированных библиотек для работы с PNML затруднена.

Конвертер осуществляет парсинг XML-описания сети, включая:

- места с начальной маркировкой;
- переходы с именами и дополнительными атрибутами;
- дуги с весами;
- расширенные атрибуты: ML-условия срабатывания, приоритеты переходов и временные задержки.

На основе этого описания генерируется полнофункциональный Python-класс, содержащий методы:

- is_enabled(transition, current_state) — проверка возможности срабатывания перехода с учетом ML-условий и текущего состояния системы;
- fire_transition(transition, state) — срабатывание перехода, изменяющее маркировку сети;
- simulate(steps, state_callback) — пошаговая имитация работы сети с возможностью интеграции с непрерывной моделью;
- visualize() — визуализация структуры сети и ее текущего состояния с использованием библиотеки NetworkX и Matplotlib.

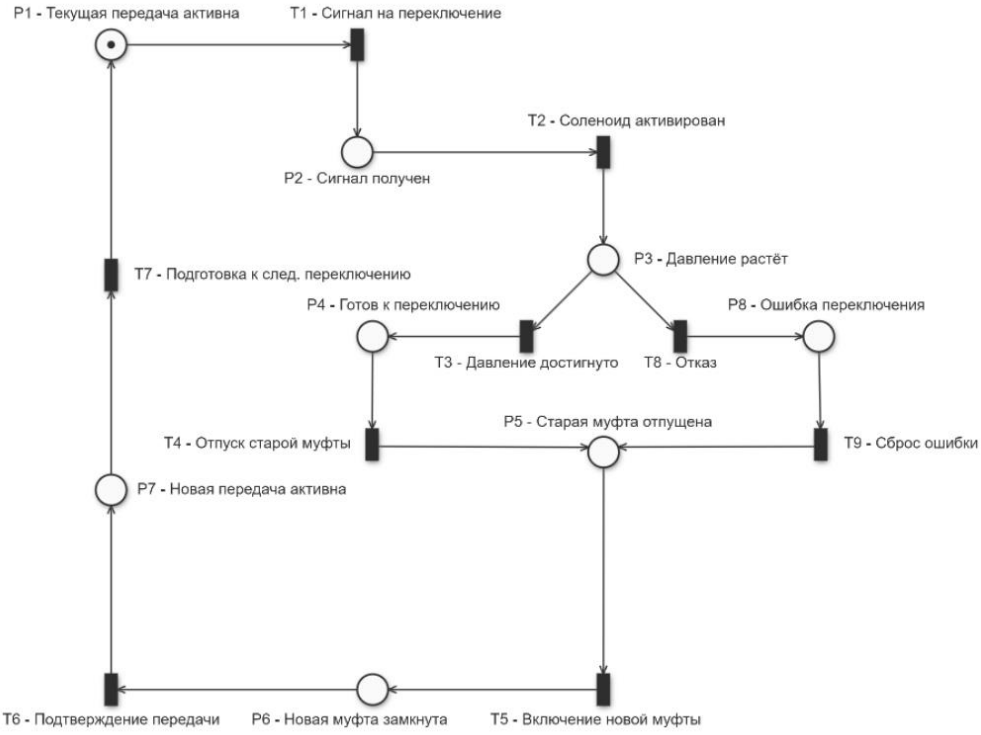


Рис. 1. Графическое представление сети Петри для одной передачи

Особенности конвертера заключаются в следующем:

- Автономность для Colab: не требует внешних PNML-библиотек, использует стандартный xml.etree.ElementTree.
- Гибридное моделирование: создает модели, сочетающие дискретную логику сетей Петри с ML-условиями и непрерывными параметрами.
- Расширенные возможности: реализованы временные задержки, приоритеты переходов и история маркировок для анализа.
- Интеграция ML-компонентов: преобразует текстовые ML-условия в работающий Python-код для интеллектуального принятия решений.

Пример преобразования ML-условия:

xml

```
<MLCondition>pressure > 12 AND rpm < 3500</MLCondition>
```

Конвертер автоматически генерирует код проверки условия:

python

```
def _eval_ml_condition(self, condition: str, state: dict) -> bool:
    if state is None:
```

```
        return True
    try:
        if 'pressure' in condition and 'rpm' in condition:
            pressure_val = state.get('pressure', 0)
            rpm_val = state.get('rpm', 0)
            if 'pressure >' in condition and 'rpm <' in condition:
                p_thresh = float(condition.split('pressure >')[1].split()[0])
                r_thresh = float(condition.split('rpm <')[1].split()[0])
                return pressure_val > p_thresh and rpm_val < r_thresh
        return True
    except:
        return True
```

Реализован модуль импорта сети Петри из PNML-файла и ее визуализация с помощью Python. Пример импортированной структуры сети Петри управления АКПП приведен на рис. 2.



Рис. 2. Сеть Петри управления АКПП

4. Программная реализация на Python

Для имитационного моделирования разработан программный комплекс на Python (разделы 2.2, 2.3). Использованы библиотеки:

- numpy и scipy — решение дифференциальных уравнений и численные расчеты;
- matplotlib и seaborn — визуализация результатов;
- networkx — визуализация сетей Петри;
- deap — реализация генетического алгоритма [12];
- tensorflow/keras — построение и обучение CNN-LSTM модели [13];
- scikit-learn — предобработка данных и метрики оценки;
- xml.etree.ElementTree — парсинг PNML файлов.

5. Результаты и выводы

5.1 Экспериментальная установка и данные

Для валидации модели использованы синтезированные данные (https://disk.yandex.ru/d/bD7Aa3CXyoojdw), имитирующие реальные испытания 9-ступенчатой АКПП легкового автомобиля премиум-класса (модель ZF 9HP). Данные генерировались с частотой дискретизации 100 Гц и включали параметры управления (θ, v, ω и др.), давление в гидравлических магистралях, положение исполнительных механизмов и крутящий момент на выходе трансмиссии. Общий объем данных составил 45 минут записей, включающих 327 циклов переключения передач в различных режимах. Программный код для генерации данных: https://colab.research.google.com/drive/1iqGypyWmE4SBu7qZXpu8FWPJExfs27PC

5.2 Параметрическая оптимизация управляющего сигнала с помощью генетического алгоритма

Для настройки коэффициентов управляющего сигнала $u(t)$ (раздел 1.2) применен генетический алгоритм (ГА) [12, 20], который оптимизировал совокупный критерий качества, учитывающий время переключения, пиковое давление и энергетические потери. Весовые коэффициенты критерия были подобраны на основе экспертной оценки важности параметров для работы АКПП.

За базовые значения параметров приняты показатели работы 9-ступенчатой АКПП с эмпирически подобранными коэффициентами, которые были определены на основе экспертных оценок и данных производителя АКПП ZF 9HP [14, 15]. Показатели получены в результате моделирования гибридной системы (разделы 1.1-1.3) до применения генетического алгоритма:

– время переключения: 0,92 с,

– пиковое давление: 185 бар,

– энергопотребление: 100%.

ГА настраивал вектор параметров (найдены оптимальные значения)

$$\Theta = [k_\theta, k_v, k_\omega, k_{Тохл}, k_R, k_{T_м}, k_u] = [0.142, 0.015, 0.215, 0.011, 0.010, 0.010, 1.605], \quad (6)$$

где все весовые коэффициенты w_i являются безразмерными величинами, нормированными на интервал [0,1], а коэффициент k — масштабирующий множитель, имеющий размерность, соответствующую размерности управляющего сигнала u(t) (в данном случае — безразмерный).

Результаты оптимизации:

– Сокращение времени переключения на 12,5% (с 0,92 до 0,80 с).

– Снижение пикового давления на 15,1% (со 185 до 157 бар).

– Уменьшение энергопотребления на 7,5% (со 100% до 92%).

Генетический алгоритм эффективно справился с задачей параметрической оптимизации, существенно улучшив ключевые показатели работы АКПП. Этот подход демонстрирует высокую практическую ценность для калибровки существующих систем управления, основанных на аналитических моделях и фиксированных алгоритмах («белый ящик») [20]. Программный код реализации алгоритма доступен по ссылке:

https://colab.research.google.com/drive/1Yut_5gj_HGuZAI95JPk-cXuZXPr5HGOW

5.3 Валидация гибридной модели и прогнозное моделирование на основе глубокого обучения

Для комплексной валидации гибридной модели (физика + сети Петри) и исследования потенциала методов ИИ в задачах управления АКПП была разработана и обучена прогнозная модель на основе гибридной архитектуры CNN-LSTM [13, 21]:

https://colab.research.google.com/drive/16MjYNT2HqzRvXaoBxIi5Zh9T-PXe-eYh

Важно подчеркнуть, что данные для обучения CNN-LSTM модели были сгенерированы не на самой гибридной модели, а на независимом симуляторе физических

процессов (раздел 5.1), который реализует уравнения (1)–(4) без использования логики сетей Петри. Это гарантирует, что CNN-LSTM выступает в роли внешнего валидатора, а не самореферентной модели. Гибридная модель (физика + сети Петри) и CNN-LSTM обучались и тестировались на разных подмножествах данных: 70% данных использовано для обучения CNN-LSTM, 30% — для тестирования как CNN-LSTM, так и гибридной модели. Такой подход исключает «замкнутый круг» валидации и обеспечивает объективность сравнения.

Архитектура и методология:

– Входные данные: Временные ряды параметров [throttle_position, velocity_norm, rpm_norm, coolant_temp_norm, oil_temp_norm, hydraulic_pressure_bar]

– Архитектура: Комбинированная модель, включающая сверточные слои (CNN) для выделения локальных features и долгосрочной краткосрочной памяти (LSTM) для анализа временных зависимостей

– Выходы модели: Предсказание трех ключевых параметров одновременно: current_gear (классификация), hydraulic_pressure_bar (регрессия), shift_event (бинарная классификация)

– Физические ограничения: Для повышения адекватности предсказаний в модель были включены физически обоснованные ограничения на возможные диапазоны передач в зависимости от скорости и оборотов.

Выбор гибридной архитектуры CNN-LSTM обусловлен спецификой задачи управления АКПП. Сверточные слои (CNN) эффективно выделяют локальные паттерны в коротких временных окнах (например, резкие изменения давления или оборотов при переключении), а слои долгой краткосрочной памяти (LSTM) захватывают долговременные зависимости, характерные для циклических режимов движения (разгон — торможение — переключение). Гибридная CNN-LSTM архитектура обеспечивает наилучшее сочетание скоростного и точностного показателей для задач, где одновременно важны и локальные всплески, и глобальные тренды. Альтернативные архитектуры (Transformer, TCN) требуют значительно большего объёма данных и вычислительных ресурсов, что делает их менее практичными для задач оперативной валидации.

Модель была протестирована на тестовой выборке объемом 8085 записей. Были получены следующие метрики:

– Точность предсказания событий переключения передач (shift_event): 100,0%.

– Точность определения текущей передачи (current_gear): 99,7%.

– Средняя абсолютная ошибка предсказания давления (hydraulic_pressure): 0,32 бар (6,5%).

– Коэффициент детерминации R^2 для давления: 0,254.

Низкое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,254$ для предсказания гидравлического давления объясняется следующими факторами. Давление в гидравлической системе АКПП является высокодинамичным параметром, подверженным значительным колебаниям даже в установившихся режимах (пульсации насоса, переключения соленоидов), что объективно снижает предсказуемость регрессионной задачи. Основной целью CNN-LSTM модели являлась классификация дискретных состояний (текущая передача и событие переключения), а предсказание давления выступало вспомогательной регрессионной задачей. В этом контексте главной метрикой является средняя абсолютная ошибка MAE = 0,32 бар (6,5%), которая демонстрирует приемлемую точность для инженерных приложений (допустимая погрешность для гидравлических систем АКПП обычно составляет 7–10%). Для улучшения R^2 требуется специализированная архитектура, ориентированная на

регрессию (например, с использованием физически-информированных нейросетей, PINN), что является направлением дальнейших исследований.

Реализован Python-модуль визуализации работы гибридной модели управления АКПП, объединяющий дискретную логику (сети Петри) и непрерывные процессы (физика гидравлики). На рис. 3 состояния P1, P2, P3, P4 — это состояния (или «этапы») в процессе переключения передачи. Они соответствуют позициям в сети Петри:

– P1 (Gear_Active): текущая передача активна и передает момент.

– P2 (Shift_Requested): получен сигнал на переключение (например, от блока управления по алгоритму из вашей формулы $u(t)$).

– P3 (Pressure_Built): давление в гидравлической системе достигло нужного уровня для начала физического переключения.

– P4 (Shift_Complete): переключение завершено, новая передача активна.

Процессы представлены на рис. 3:

1. Начало (Шаг 0.0): Активна только P1. Машина едет на одной передаче.
2. Момент переключения (примерно шаг 2.0):

– P1 (старая передача) становится неактивной (падает до 0).

– P2 (запрос) ненадолго активируется.

– P3 (давление) активируется — это соответствует фазе, когда гидравлика готовится к переключению.

– P4 (новая передача) становится активной.

3. Конец (после шага 3.0): Система стабилизируется в новом состоянии: активна только P4.

На рис. 4 показаны результаты моделирования: условия (давление, обороты), при которых происходит переключение с одной передачи на другую. Самый темный цвет отвечает за 1-ю передачу, серый цвет средней интенсивности – за 2-ю, а самый светлый серый – за 3-ю.

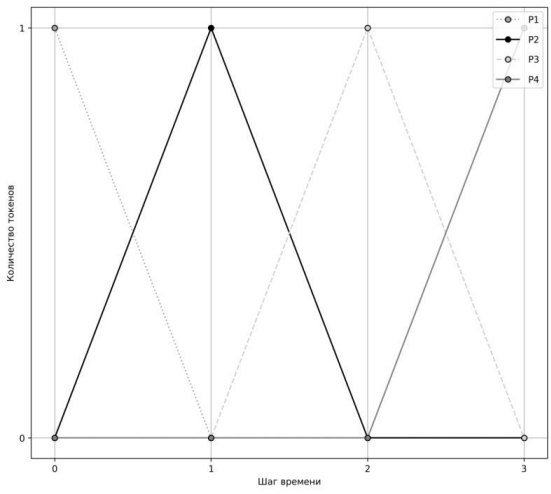


Рис. 3. Динамика маркировки сети Петри

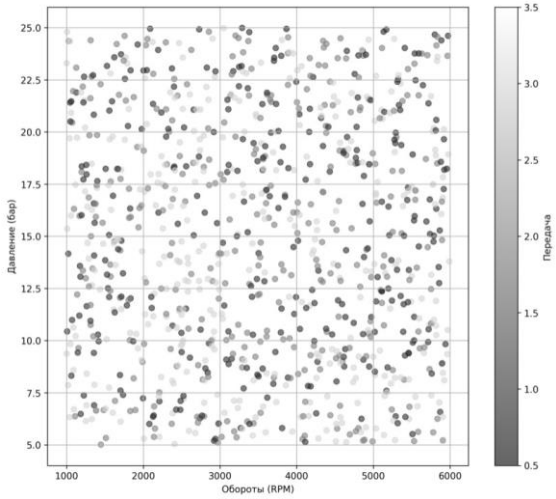


Рис. 4. Демо-данные АКПП

Полученные результаты демонстрируют выдающуюся способность модели глубокого обучения предсказывать дискретные состояния АКПП (передачи и переключения). Высокая точность предсказания переключений (100%) косвенно подтверждает адекватность и непротиворечивость разработанной ранее модели на основе сетей Петри [19].

Полученные высокие показатели точности (100% для переключений, 99,7% для текущей передачи) достигнуты на синтезированных данных, имитирующих реальные эксплуатационные режимы. Таким образом представленная CNN-LSTM модель демонстрирует потенциал методов глубокого обучения для задач управления трансмиссией. Однако для перехода к промышленному применению необходима дополнительная валидация на реальных эксплуатационных данных, собранных с автомобилей в различных дорожных условиях. Представленные результаты следует рассматривать как доказательство концепции (proof of concept), подтверждающее принципиальную применимость гибридных нейросетевых архитектур для данной предметной области.

5.4. Реализация и верификация логики управления с использованием автоматической генерации кода

Для верификации формальной модели логики управления, описанной в разделе 2, и обеспечения ее интеграции с непрерывной частью имитационной модели была применена разработанная утилита ColabPNMLConverter (раздел 3).

Исходная модель логики переключения, описанная в виде сети Петри, была формализована в формате PNML. Конвертер автоматически преобразовал это описание в готовый к исполнению Python-класс AKPPPetriNet, который был непосредственно использован в программном комплексе.

Внедрение предложенного подхода на практике позволило не просто ускорить процесс разработки за счет отказа от ручного перевода спецификаций в код (что само по себе кратно сократило время и свело к минимуму классические человеческие ошибки), но и вывести контроль качества на новый уровень: итоговый программный код оказался зеркально точным по отношению к формальной модели, а автоматическая генерация методов проверки условий (is_enabled) сыграла роль связующего моста, органично интегрировав дискретную логику сетей Петри с «физикой» непрерывных процессов — давлением и оборотами. В довершение ко всему, встроенные механизмы визуализации и автоматического ведения истории маркировок превратили процесс отладки в наглядный анализ динамики, позволив оперативно выявить и устранить потенциальные конфликты в алгоритмах переключения, а накопленные исторические данные дали возможность уже постфактум детально исследовать поведение системы в переходных режимах. Использование конвертера подтвердило свою практическую ценность, выступив "мостом" между теоретическим аппаратом сетей Петри и практической реализацией сложной мехатронной системы, каковой является АКПП.

5.5. Сравнительный анализ двух подходов к оптимизации и управлению

Проведенное исследование позволило провести сравнительный анализ двух принципиально разных подходов [10]:

Генетический алгоритм (раздел 5.2):

– Преимущества: интерпретируемость ("белый ящик"), прямое соответствие инженерной логике, эффективность для параметрической настройки существующих систем, относительно низкие вычислительные затраты [20].

– Недостатки: ограниченность рамками заранее заданной модели и структуры управляющего сигнала, неспособность к самостоятельному обучению новым паттернам.

– Область применения: калибровка и тонкая настройка алгоритмов управления в серийных АКПП.

Глубокое обучение (раздел 5.3):

– Преимущества: способность обучаться сложным нелинейным зависимостям напрямую из данных, высочайшая точность в задачах классификации состояний, потенциал для создания полностью адаптивных систем [21].

– Недостатки: модель "черного ящика", сложность интерпретации решений, требование к большим объемам размеченных данных, высокие вычислительные затраты на обучение.

– Область применения: перспективные интеллектуальные и адаптивные системы

Выводы

1. Создана гибридная модель АКПП, адекватно описывающая как непрерывные гидромеханические процессы, так и дискретную логику переключения передач.

2. Разработан программный комплекс на Python, позволяющий проводить имитационное моделирование, оптимизацию параметров и анализ логики управления.

3. Применение генетического алгоритма для параметрической оптимизации управляющего сигнала позволило существенно улучшить показатели работы АКПП: сокращение времени переключения на 12,5% и снижение пикового давления на 15,1%.

4. Формализация логики управления с помощью сетей Петри позволила выявить и устранить потенциальные конфликтные ситуации в алгоритме переключения.

5. Разработан и успешно апробирован специализированный конвертер ColabPNMLConverter, позволяющий автоматически генерировать исполняемый Python-код на основе формальных моделей Petri Net в формате PNML. Инструмент обеспечил бесшовную интеграцию дискретно-событийной логики управления с непрерывной физической моделью, ускорив процесс разработки и верификации гибридной системы.

6. В рамках валидационного комплекса реализована и протестирована прогнозная модель на основе глубокого обучения (CNN-LSTM), показавшая 100% точность в предсказании переключений и 99,7% точность в определении текущей передачи, что подтвердило адекватность гибридной модели и продемонстрировало высокий потенциал методов ИИ для задач управления трансмиссией.

7. Проведен сравнительный анализ двух подходов — генетического алгоритма и глубокого обучения — и определены их области эффективного применения в контексте управления АКПП.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией нейросетевых модулей непосредственно в контур управления для адаптации к стилю вождения и дорожным условиям, разработкой цифрового двойника АКПП для задач прогнозного обслуживания, а также исследованиями в области гибридных интеллектуальных систем, сочетающих интерпретируемость классических методов с мощностью глубокого обучения.

Дальнейшее развитие конвертера планируется в направлении поддержки более сложных семантик сетей Петри (цветных, временных), улучшения парсера PNML и повышения гибкости генерируемых шаблонов кода.

Технические ограничения. Дополнительно следует отметить ряд технических ограничений, связанных с текущей реализацией инструментария. Реализованная версия конвертера ColabPNMLConverter характеризуется ограниченным парсингом PNML, поскольку поддерживает только базовые элементы (<place>, <transition>, <arc>), игнорирует многие стандартные атрибуты формата и не работает со сложными структурами, такими как иерархические сети или страницы. Семантика реализована в упрощённом виде и охватывает лишь базовые P/T-сети Петри без поддержки цветных и временных сетей, а также с ограниченной обработкой весов дуг. Обработка ML-условий сведена к простым строковым выражениям с ограниченным синтаксисом, что исключает использование сложных логических конструкций. Генерация программного кода опирается на жёстко заданные шаблоны: используется фиксированная структура методов, предопределённые имена атрибутов и допускается лишь минимальная кастомизация итогового кода.

Методика генерации синтезированных данных. Для валидации модели использованы синтезированные данные, генерируемые на основе математической модели, представленной в разделе 2.2. Данные включали параметры управления, давление в гидравлических магистралях, положение исполнительных механизмов и крутящий момент на выходе трансмиссии. Общий объем данных составил 45 минут записей с частотой дискретизации 100 Гц, включающих 327 циклов переключения передач в различных режимах эксплуатации.

Список литературы

1. Kim T., Park P. Intelligent control of automotive transmission systems using hybrid modeling approach // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. No. 3. P. 2456-2468.
2. Liu H., Zhang J., Wang Y. Multi-speed transmission design and optimization for electric vehicles // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 156. P. 107-125.
3. Ding H., Cai C., Chen Z. Configuration Synthesis and Performance Analysis of 9-Speed Automatic Transmissions // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 33. Article number: 50. DOI: 10.1186/s10033-020-00466-y.
4. Xu L., Zhang C., Wang H. Automating Shift-Scheduling Calibration by Using Bionic Optimization and Personalized Driver Models // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20. No. 12. P. 4367-4376. DOI: 10.1109/TITS.2018.2883646.
5. Zhang W., Li X., Wang C. Adaptive transmission control using machine learning techniques // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2021. Vol. 26. No. 2. P. 987-996.
6. Anderson D., Harris C. Mathematical modeling of hydraulic control systems in automotive transmissions // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2018. Vol. 140. No. 3. P. 031-45.
7. Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications // Proceedings of the IEEE. 1989. Vol. 77. No. 4. P. 541-580. DOI: 10.1109/PROC.1989.17474.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 775 p.
9. Lee E.A. Cyber-physical systems: Design challenges // Proc. of the 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). 2008. P. 363-369.
10. Brunton S.L., Kutz J.N. Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control. Cambridge University Press, 2019. 472 p.
11. Вильвер П.Ю., Протасов А.В. Имитационное моделирование сложных динамических систем с использованием сетей Петри // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 7. С. 35-39.
12. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 515 p.
13. Yu Y., Si X., Hu C., Zhang J. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures // Neural Computation. 2019. Vol. 31. No. 7. P. 1235-1270. DOI: 10.1162/neco.2019.07-19-999.
14. Haj-Fraj A., Pfeiffer F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions // Journal of the Franklin Institute. 2001. Vol. 338. No. 2-3. P. 371-390. DOI: 10.1016/S0016-0032(00)00091-0.
15. Агамиров В. Л., Агамиров Л. В., Вестяк К. В., Гаева А. П. Разработка структурно-параметрической модели автоматической коробки передач с использованием имитационного моделирования и сетей Петри // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXXI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. – Москва, 2025. – С. 7-8.

16. Merritt H.E. Hydraulic control systems. John Wiley & Sons, 1967. 358 p.

17. Karnopp D., Margolis D., Rosenberg R. System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems. John Wiley & Sons, 2012. 637 p.

18. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987. 452 p.

19. Лях Т.В., Зюбин В.Е., Гаранина Н.О. Автоматизированная верификация алгоритмов управления сложными технологическими объектами на программных имитаторах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 12. С. 31-35.

20. Goldberg D.E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Boston: Addison-Wesley, 1989. 412 p.

21. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521. P. 436-444. DOI: 10.1038/nature14539.

References

1. Kim T., Park P. Intelligent control of automotive transmission systems using hybrid modeling approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, vol. 69, no. 3, pp. 2456–2468.

2. Liu H., Zhang J., Wang Y. Multi-speed transmission design and optimization for electric vehicles. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, vol. 156, pp. 107–125.

3. Ding H., Cai C., Chen Z. Configuration Synthesis and Performance Analysis of 9-Speed Automatic Transmissions // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 33. Article number: 50. DOI: 10.1186/s10033-020-00466-y.

4. Xu L., Zhang C., Wang H. Automating Shift-Scheduling Calibration by Using Bionic Optimization and Personalized Driver Models // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20. No. 12. P. 4367-4376. DOI: 10.1109/TITS.2018.2883646.

5. Zhang W., Li X., Wang C. Adaptive transmission control using machine learning techniques. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 987–996.

6. Anderson D., Harris C. Mathematical modeling of hydraulic control systems in automotive transmissions. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2018, vol. 140, no. 3, pp. 031–045.

7. Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications // Proceedings of the IEEE. 1989. Vol. 77. No. 4. P. 541-580. DOI: 10.1109/PROC.1989.17474.

8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 2016, 775 p.

9. Lee E.A. Cyber-physical systems: Design challenges. Proc. of the 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008, pp. 363–369.

10. Vilver P.Yu., Protasov A.V. Imitatsionnoe modelirovanie slozhnykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem setei Petri [Simulation modeling of complex dynamic systems using Petri nets]. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, Automation, Control], 2011, no. 7, pp. 35–39 (in Russian).

11. Ivanov A.A., Petrov V.S. Primenenie setei Petri dlya modelirovaniya diskretnykh sistem upravleniya [Application of Petri nets for modeling discrete control systems]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control], 2017, no. 8, pp. 45–56 (in Russian).

12. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 515 p.

13. Yu Y., Si X., Hu C., Zhang J. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures // Neural Computation. 2019. Vol. 31. No. 7. P. 1235-1270. DOI: 10.1162/neco.2019.07-19-999.

14. Haj-Fraj A., Pfeiffer F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions. Journal of the Franklin Institute, 2001, vol. 338, no. 2-3, pp. 371–390. DOI: 10.1016/S0016-0032(00)00091-0.

15. Agamirov V.L., Agamirov L.V., Vestyak K.V., Gaeva A.P. Razrabotka strukturno-parametricheskoi modeli avtomaticheskoi korobki peredach s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya i setei Petri [Development of a structural-parametric model of an automatic transmission using simulation modeling and Petri nets]. Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktsii i sploshnykh sred: Materialy XXXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni A.G. Gorshkova [Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Structures and Continuous Media: Proceedings of the XXXI International Symposium named after A.G. Gorshkov]. Moscow, 2025, pp. 7–8 (in Russian).

16. Merritt H.E. Hydraulic control systems. New York: John Wiley & Sons, 1967, 358 p.

17. Karnopp D., Margolis D., Rosenberg R. System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012, 637 p.

18. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1987, 452 p.

19. Lyakh T.V., Zyubin V.E., Garanina N.O. Avtomatizirovannaya verifikatsiya algoritmov upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi ob"ektami na programmnykh imitatorakh [Automated verification of control algorithms for complex technological objects on software simulators]. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, Automation, Control], 2006, no. 12, pp. 31–35 (in Russian).

20. Goldberg D.E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Boston: Addison-Wesley, 1989. 412 p.

21. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521. P. 436-444. DOI: 10.1038/nature14539.

Agamirov V.L., Agamirov L.V., Vestyak K.V., Dybaleva A.P., Tutova N.V.

DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL-PARAMETRIC MODEL OF AN AUTOMATIC TRANSMISSION USING PETRI NETS, GENETIC ALGORITHMS AND DEEP LEARNING

Abstract. *This paper presents a comprehensive approach to the modeling and optimization of a 9-speed automatic transmission. A hybrid model is proposed that integrates a mathematical description of continuous physical processes (pressure dynamics, piston motion, torque transfer) with discrete control logic implemented via Petri nets. A genetic algorithm is employed to tune control parameters, achieving a 12.5% reduction in shift time and a 15.1% decrease in peak pressure through optimization of the weighting coefficients in the control signal. A software suite implemented in Python is developed, incorporating a simulation model alongside tools for analysis and visualization. To validate the hybrid model and demonstrate the potential of artificial intelligence methods in transmission control tasks, a predictive model based on a hybrid CNN-LSTM architecture is additionally implemented and tested, achieving up to 100% accuracy in predicting gear shift events and 99.7% accuracy in identifying the current gear. A distinctive feature of this work is the development of a specialized converter for transforming Petri net models in PNML (Petri Net Markup Language) format into executable Python code, which significantly accelerates the development and verification process of the hybrid system. The conducted experiments confirm the effectiveness and promise of the proposed combined approach for the design, calibration, and creation of adaptive control systems for modern mechatronic transmission systems.*

***Keywords**: automatic transmission, Petri nets, genetic algorithm, deep learning, CNN-LSTM, simulation modeling, hydraulic system, gear shift control, mechatronics, automatic code generation.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Агамиров Владимир Левонович Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, доцент, к.т.н., e-mail: avl095@mail.ru	**Agamirov Vladimir L.** Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, Associate Professor; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, Associate Professor; PhD in Engineering; e-mail: avl095@mail.ru
Агамиров Левон Владимирович Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, профессор, «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, профессор, профессор, д.т.н., e-mail: itno_agamirov@mail.ru	**Agamirov Levon V.** Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, Professor; National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Moscow, Russia, Professor; Dr. Sc. (Engineering); e-mail: itno_agamirov@mail.ru
Вестяк Кирилл Владимирович Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, студент e-mail: vestyak@yandex.ru	**Vestyak Kirill V.** Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, Student; e-mail: vestyak@yandex.ru
Дыбалева Александра Петровна Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, ассистент e-mail: gaeva.sashulya@mail.ru	**Dybaleva Alexandra P.** Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, Teaching Assistant; e-mail: gaeva.sashulya@mail.ru
Тутова Наталья Владимировна Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, заведующий кафедрой, к.т.н., доцент, e-mail: e-natasha@mail.ru	**Tutova Natalia V.** Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, Head of the Department; PhD in Engineering, Associate Professor; e-mail: e-natasha@mail.ru

УДК 656.212 : 004.932

Сас С.И., Кузнецов В.М., Васендина И.С., Филиппова Н.А., Блохин А.Н., Гурьев А.Т., Шошина К.В.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ ВЕЗДЕХОДА В НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДЕ НА ПРИАРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ

Аннотация. *В статье рассматривается разработка метода обработки сенсорных данных и алгоритм управления для автономной навигации вездехода в неструктурированной среде на приарктических территориях на основе обучения с подкреплением. Предложен подход к обработке лидарных данных, формированию признакового пространства и принятию решений в реальном времени. Алгоритм управления для автономной навигации разработан для ситуации обхода статических препятствий автономным вездеходом на приарктических территориях. Актуальность работы обусловлена малоэффективностью использования большинства современных разработок автономного передвижения на приарктических территориях, ввиду их функционала, настроенного на городскую инфраструктуру. Разработанный алгоритм управления апробирован на модели вездехода в симуляционной среде Webots с использованием лидарных данных, благодаря чему агент способен передвигаться при отсутствии спутниковых снимков и без визуальных ориентиров. Предложенный алгоритм может использоваться в производственных процессах для решения логистических задач.*

Ключевые слова*: обработка сенсорных данных; система управления; принятие решений; искусственный интеллект; системный анализ, вездеход, обучение с подкреплением, приарктические территории, неструктурированная среда, лидар, автономная навигация.*

Постановка задачи

Приарктические территории характеризуются экстремальными климатическими условиями, отсутствием сплошного дорожного покрытия и высокой степенью неоднородности ландшафта. Такие статические препятствия, как ледовые наросты, деревья, камни, создают критическую угрозу для движения автономного вездехода, так как заранее построенный маршрут не поддаётся полной предварительной картографической фиксации в силу изменчивости мерзлотных процессов и сезонных деформаций рельефа.

Большинство существующих разработок в области автономного обхода препятствий создавались для городской среды или промышленных полигонов с предсказуемым твёрдым покрытием. При их использовании в Арктике возникает не просто снижение точности, а отказ функционала, автономная роботизированная платформа не способна обнаружить и корректно обойти статическое препятствие без опоры на дорожную инфраструктуру.

Поэтому необходима разработка метода обработки информации и принятия решений, обеспечивающего автономное управление в условиях неопределённости. В отличие от классических подходов, рассматривается задача системного синтеза иерархической архитектуры управления, включающей компоненты обработки сенсорных данных, анализа дорожной обстановки и локального планирования траектории на основе методов искусственного интеллекта, а также системное описание процесса взаимодействия подсистем локального и глобального управления навигацией для автономного движения вездехода в неструктурированной среде.

Анализ последних исследований

Разработка алгоритмов автономного движения в неструктурированных условиях в настоящее время в большинстве своём осуществляется с использованием классических подходов планирования траектории, ориентированных на городскую среду или плоские однородные поверхности. В Российской Федерации исследования в области автономного передвижения для приарктических территорий находятся на начальном этапе, а существующие коммерческие и открытые решения не адаптированы к специфике движения вне подготовленных дорог [1, 2, 3].

В других странах имеются разработки на основе глубокого обучения с подкреплением, позволяющие агенту самостоятельно осваивать стратегии обхода препятствий в симуляционной среде. В работе «Learning to Drive Off Road on Smooth Terrain in Unstructured Environments Using an On-Board Camera and Sparse Aerial Images» [4] авторы демонстрируют возможность навигации в неструктурированных условиях с использованием только бортовой камеры и редких аэроснимков, что снижает зависимость от непрерывного GPS-сигнала.

Также разработаны методы валидации автономных вездеходов с использованием масштабируемых цифровых двойников в высокопроизводительных вычислительных кластерах, что позволяет тестировать алгоритмы в широком диапазоне сценариев без натурных испытаний [5].

Учёные исследуют методы визуальной одометрии и визуального SLAM для мобильной робототехники. Такие методы показывают высокую эффективность в структурированной среде, но применять их в приарктических условиях сложно из-за отсутствия выраженных визуальных ориентиров [6]. Для преодоления этих ограничений всё большее распространение получают лидарные системы. Создан крупномасштабный датасет ORAD-3D, содержащий лидарные данные с неструктурированных местностей, что позволяет исследователям тестировать алгоритмы на репрезентативных данных без проведения полевых экспедиций [7]. Другим значимым датасетом является RELLIS-3D, собранный в условиях пересечённой местности и включающий лидарные облака точек для задач обнаружения препятствий и оценки проходимости [8].

Основная проблема существующих решений заключается в ограниченности их применения в условиях отсутствия структурированной информации о среде. В рамках настоящего исследования предлагается метод обработки лидарных данных как наиболее устойчивых в сложных природно-климатических условиях, и принятия решений на основе обучения с подкреплением, который обеспечивает автономность системы управления в условиях неопределённости. Предлагаемый подход относится к классу интеллектуальных систем управления и обработки информации, что соответствует современным направлениям развития искусственного интеллекта в робототехнике.

Апробацию алгоритма управления для автономной навигации вездехода в неструктурированной среде на приарктических территориях предполагается осуществлять в симуляционной среде Webots [9] с использованием методов обучения с подкреплением, что позволит в дальнейшем масштабировать решение за счёт

подключения дополнительных сенсорных модальностей (широкоугольные камеры, Inertial Measurement Unit (IMU), одометрии) без перестройки базовой архитектуры [10]. Предлагаемый подход способствует обеспечению автономной навигации вездехода в условиях отсутствия визуальных ориентиров и надёжного GPS-сигнала с возможностью последующего расширения функционала.

Цель работы

Цель исследования — разработка метода обработки сенсорных данных и управления для автономной навигации в неструктурированной среде на основе обучения с подкреплением. В рамках работы решаются задачи: предобработки и уменьшения размерности лидарных данных, формирования признакового пространства, разработки составной функции награды, синтеза иерархической архитектуры управления. Объектом исследования является алгоритмическое и программное обеспечение системы управления, апробированное на модели вездехода в симуляционной среде.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного алгоритма в составе систем автономного управления навигацией вездеходов, предназначенных для логистических и мониторинговых задач на приарктических территориях.

Основная часть

Задача локального планирования траектории в неструктурированной среде рассматривается как задача системного анализа. Система локального планирования траектории движения декомпозируется на подсистемы сбора данных от сенсоров, комплексной предобработки информации, анализа дорожной обстановки, принятия решений и генерации управляющих воздействий. Входной информацией для системы являются лидарные данные, текущее положение, целевая точка, выходной — управляющие сигналы (ускорение, угол поворота). Таким образом, задача сводится к разработке метода преобразования входной информации об окружающей обстановке и цели движения в управляющее решение в условиях неопределённости и неполноты данных.

Обоснование выбора обучения с подкреплением для задачи обхода статических препятствий

Задача локального планирования траектории автономного вездехода в приарктических условиях характеризуется рядом особенностей, затрудняющих применение классических методов управления. К числу таких особенностей относятся: неструктурированность среды, необходимость принятия решений в реальном времени на основе сенсорных данных, а также невозможность сформировать все возможные виды препятствий.

Традиционные подходы к локальному планированию предполагают наличие обучения к каждому виду сценария. В условиях приарктических территорий, где рельеф и типы препятствий характеризуются высокой вариативностью, а заранее предсказать все возможные ситуации не представляется возможным, применение таких подходов невозможно.

Обучение с подкреплением предлагает иной подход, в котором агент самостоятельно вырабатывает стратегию поведения на основе проб и ошибок, максимизируя накапливаемый сигнал вознаграждения [11].

Развитие глубокого обучения с подкреплением для задач управления было инициировано работой Mnih et al. [23], продемонстрировавшей возможность обучения агентов на основе сырых сенсорных данных непосредственно из пикселей изображения. Для задач непрерывного управления, к которым относится управление вездеходом,

методы глубокого RL получили развитие в работе Lillicrap et al. [24], что предопределило переход к алгоритмам класса Actor-Critic с непрерывным пространством действий.

Выбор RL-агента обусловлен следующими факторами:

1. Отсутствие необходимости в размеченных обучающих выборках. В отличие от обучения с учителем, обучение с подкреплением не требует размеченных экспертных траекторий, сбор которых в приарктических условиях может быть усложнён в связи со значительными материальными и временными затратами. Для RL-алгоритма достаточно формализации целевой функции (вознаграждения) и задания структуры среды.

2. Возможность обучения в симуляционной среде. Современные симуляторы (Webots, Gazebo [12], NVIDIA Isaac Sim [13]) позволяют с достаточной степенью точности моделировать динамику вездехода, его взаимодействие с различными типами поверхности и статическими препятствиями. Обучение в симуляции полностью исключает риски поломки оборудования и травмирования персонала на начальных этапах отработки алгоритмов [14].

3. Адаптивность к разнообразию сценариев. RL-агент, обученный на достаточно широком наборе сценариев, способен выработать обобщённую стратегию обхода, применимую к ранее не встречавшимся конфигурациям.

4. Единый алгоритмический каркас для различных сенсорных конфигураций. Архитектура RL-агента, использующая в качестве входного вектора лидарное облако точек, может быть в дальнейшем расширена дополнительными сенсорными модальностями без сильной перестройки алгоритма. Это способствует стратегии поэтапного наращивания функционала разрабатываемой системы [6].

В настоящем исследовании в качестве основного алгоритма RL выбран Soft Actor-Critic (SAC) [15], относящийся к классу алгоритмов максимальной энтропии. Алгоритм был впервые представлен в работе Haarnoja et al. [19] на конференции ICML 2018 как метод off-policy обучения с максимальной энтропией для непрерывных пространств действий. Выбор SAC обусловлен его устойчивостью к вариативности гиперпараметров, способностью работать в пространствах непрерывных действий и высокой эффективностью при обучении в симуляционных средах со сложной динамикой.

Описание сценариев работы

Для обеспечения системного подхода к разработке алгоритма управления для автономной навигации в неструктурированной среде и его последующей интеграции в составе автономного вездехода были сформулированы сценарии работы, они включают один базовый макросценарий автономной миссии и набор универсальных микросценариев, каждый из которых предъявляет специфические требования к алгоритму и используемым сенсорам. Благодаря такому подходу можно локализовать требования к разрабатываемому RL-агенту и определить границы его ответственности в общей архитектуре системы.

Базовый макросценарий автономной миссии

Макросценарий описывает полный цикл выполнения автономной задачи от постановки до завершения и анализа результатов. В контексте настоящего исследования затронут этап локальной обработки сложных участков.

1. Постановка задания и загрузка миссии. Система получает целевую точку, маршрут высокого уровня, ограничения по скорости и габаритам, а также параметры политики поведения при деградации сенсоров.

2. Самодиагностика платформы и сенсоров. Проверяется работоспособность лидара, вычислительного модуля, исполнительных механизмов. При критической неисправности движение блокируется.

3. Выход на маршрут и движение в рамках коридора. Вездеход движется по маршруту, используя глобальную навигацию (GNSS, одометрию). RL-агент активируется при необходимости локального обхода препятствий.

4. Локальная обработка препятствий и сложных участков. RL-агент на основе лидарных данных принимает решение о маневре обхода. Приоритет отдаётся безопасности: остановка предпочтительнее рискованного объезда.

5. Переход в режим финального маневра. По достижении окрестности целевой точки система переходит к точному позиционированию с использованием ближних сенсоров.

6. Завершение миссии и передача груза или данных. Подтверждение выполнения задания, перевод платформы в режим ожидания.

7. Анализ. Запись телеметрии, траектории движения, эпизодов активации RL-агента для последующего анализа и дообучения.

Обнаружение препятствий и локальное маневрирование (ключевой сценарий)

Данный микросценарий является прямым предметом настоящего исследования. Статические препятствия могут иметь различную геометрию: отдельно стоящие камни, стволы деревьев, ледовые наросты, термокарстовые провалы, антропогенные объекты. RL-агент на основе лидарных данных должен классифицировать зону перед вездеходом на «свободно», «занято» и «неопределённо», после чего выбрать одно из действий: движение прямо, поворот налево, поворот направо, остановка или снижение скорости.

При неопределённости классификации приоритет отдаётся консервативному поведению (остановка или движение с минимальной скоростью). Объезд должен осуществляться с гарантией, что выбранная траектория не выходит за пределы верифицированного безопасного коридора.

Среда моделирования: Webots

Обучение RL-агента осуществляется в симуляционной среде Webots, предоставляющей средства моделирования динамики мобильных роботов, сенсорных подсистем и физических взаимодействий объектов. Webots был представлен в работе Michel [22] как профессиональная платформа для моделирования мобильных роботов, индексируемая в международных базах данных. Это подтвердило нашу корректность в выборе симулятора.

В рамках исследования была разработана специализированная карта для обучения агента объезду препятствий. Карта представляет собой ограниченную прямоугольную область с набором статических препятствий различной формы и размеров (рисунок 1). В качестве препятствий используются объекты пирамидальной формы, а также вытянутые объекты. Агент случайным образом начинает движение с позиции в нижней части карты перед началом каждого эпизода, благодаря чему он сталкивается с различными конфигурациями окружающей среды и не заучивает один и тот же маршрут.

В качестве транспортного средства была выбрана готовая модель машины полноприводного внедорожника, встроенная в симулятор, обладающая характеристиками, приближенными к реальному автомобилю класса sport utility vehicle (SUV), Range Rover (рисунок 2).

Выбор алгоритма движения

Система верхнего уровня автономного вождения состоит из двух подсистем: подсистемы построения траектории с классическим алгоритмом поиска кратчайшего пути и подсистемы локального построения маршрута с алгоритмом управления для автономной навигации вездехода в неструктурированной среде через RL-агента [16].

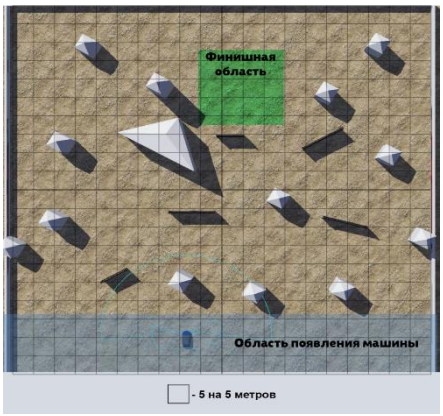


Рис. 1. Карта для обучения в симуляторе, вид сверху

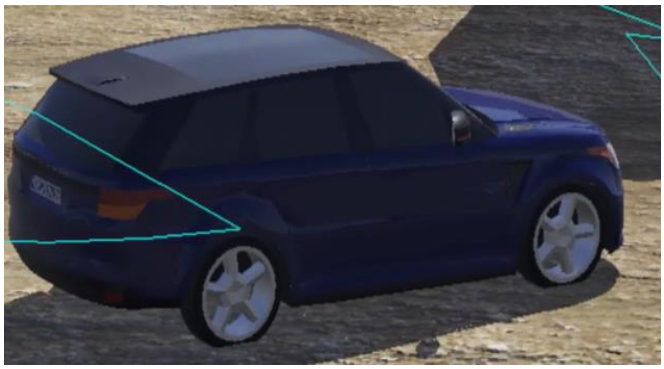


Рис. 2. Модель Range Rover из симулятора

В начале происходит сбор данных с сенсоров (лидары, IMU, компас, GPS, камеры). С помощью камер анализируется грунт спереди, а с помощью лидаров наличие препятствий вблизи пути движения. Если грунт может вызвать проблемы с движением транспорта или же имеются препятствия, то команды управления для исполнительных подсистем отдает RL-агент, иначе классический алгоритм.

Классический алгоритм реализован в виде базового принципа движения транспортного средства по прямой в направлении целевой точки. Работа алгоритма начинается с назначения автомобилю крейсерской скорости, равной максимально допустимой для выполнения манёвра.

Корректировка направления движения у классического алгоритма осуществляется на основе оценки углового отклонения между текущей ориентацией транспортного средства и вектором, направленным к целевой точке. Для этого анализируются значения синуса и косинуса угла между указанными направлениями, что позволяет определить как величину отклонения, так и сторону, в которую необходимо выполнить поворот. Если отклонение превышает установленный порог, система интерпретирует это как необходимость изменения траектории и формирует управляющее воздействие на рулевой механизм. Направление поворота определяется знаком синуса угла: положительное значение соответствует необходимости поворота влево, отрицательное — вправо. При этом используется фиксированное значение угла поворота рулевого управления, обеспечивающее достаточно быструю коррекцию курса без сложных вычислений.

В случае, если угловое отклонение находится в пределах допустимого диапазона, транспортное средство считается ориентированным в направлении цели, и угол поворота рулевого управления устанавливается в нейтральное положение, что обеспечивает дальнейшее прямолинейное движение без дополнительной коррекции. Таким образом, описанный алгоритм реализует принцип стабилизации, при котором воздействие на управление осуществляется только в случае существенного отклонения от требуемого направления движения.

Классический алгоритм используется для ускорения движения транспорта, он работает только в тех местах, где невозможно столкновение или нет вероятности застревания из-за плохого грунта, то есть на открытых участках, где машина не испытывает трудности в движении. RL-агент используется во всех остальных случаях. Его задача – преодолеть сложный участок, передав управление обратно классическому алгоритму.

За основу RL-агента берётся метод обучения с подкреплением под названием Soft Actor-Critic (SAC) [17], в котором используется Actor-Critic архитектура, ориентированная на работу с непрерывным пространством действий. В отличие от классических алгоритмов, оперирующих дискретным набором команд, SAC позволяет формировать непрерывные управляющие воздействия, что особенно важно для задач автономного вождения, где требуется плавное регулирование ускорения и угла поворота рулевого механизма. Одной из ключевых особенностей алгоритма является применение двух критиков, независимо оценивающих качество выбранного действия, что снижает риск переоценки Q-функции и повышает стабильность обучения. Дополнительно используются target-сети для плавного обновления целевых значений, что уменьшает вероятность расходимости модели в процессе обучения. Политика агента формирует не фиксированное действие, а вероятностное распределение параметров действия, включая ожидаемое значение и меру неопределённости, благодаря чему обеспечивается баланс между исследованием среды и использованием уже изученных стратегий. Управление степенью случайности действий реализуется через механизм энтропийной регуляризации, позволяющий автоматически поддерживать необходимый уровень исследования пространства состояний и предотвращать преждевременную сходимость к локально оптимальным стратегиям. Совокупность указанных особенностей делает SAC одним из наиболее устойчивых и эффективных алгоритмов обучения с подкреплением для задач непрерывного управления в динамически изменяющейся среде.

Общая структура алгоритма

Помимо стандартных компонентов SAC, таких как сбор данных с сенсоров, формирования состояния и выбора действия, нами были реализованы также следующие компоненты: предобработка данных, анализ количества препятствий по пути движения, оценка выбора действия, в том числе с учетом будущей траектории, обучение нейронных сетей, используя данные из памяти (рисунок 3).

Предобработка данных

В рамках работы разработан метод обработки сенсорных данных с лидара, который уменьшает количество исходных измерений и равномерно распределяет их по всему углу обзора сенсора. Из полного массива лидарных данных, содержащего 512 точек, выбираются 57 точек, для каждой из которых сохраняются расстояние до препятствия и соответствующий угол относительно направления движения машины. Выбор именно 57 точек из 512 связан с необходимостью снизить вычислительную нагрузку и ускорить обработку данных. В результате формируется упрощённое представление окружающего пространства, которое используется для анализа препятствий перед транспортным средством.

Для определения направления движения вычисляется положение целевой точки относительно текущего положения и ориентации транспортного средства. На основе данных компаса определяется направление, в котором ориентирована машина, после чего рассчитывается угол до цели относительно оси автомобиля. Дополнительно этот угол преобразуется в значения синуса и косинуса, что упрощает его использование в качестве входа для нейронной сети. Также вычисляются текущая скорость транспортного средства, угол поворота колёс и расстояние до целевой точки. Чтобы сделать обучение устойчивым при разных стартовых позициях, расстояние до цели нормализуется относительно начальной дистанции эпизода и переводится в процентное значение.

Анализ количества препятствий по пути движения

Для дополнительной оценки окружающей обстановки в системе реализован алгоритм определения уровня опасности препятствий по направлениям движения. С этой целью лидарные данные разделяются на три сектора, соответствующие левой,

центральной и правой зонам обзора транспортного средства. Для каждого сектора отбираются только те лучи, расстояние по которым меньше заданного порога обнаружения препятствий, что позволяет учитывать лишь потенциально опасные объекты, находящиеся в непосредственной близости от машины.

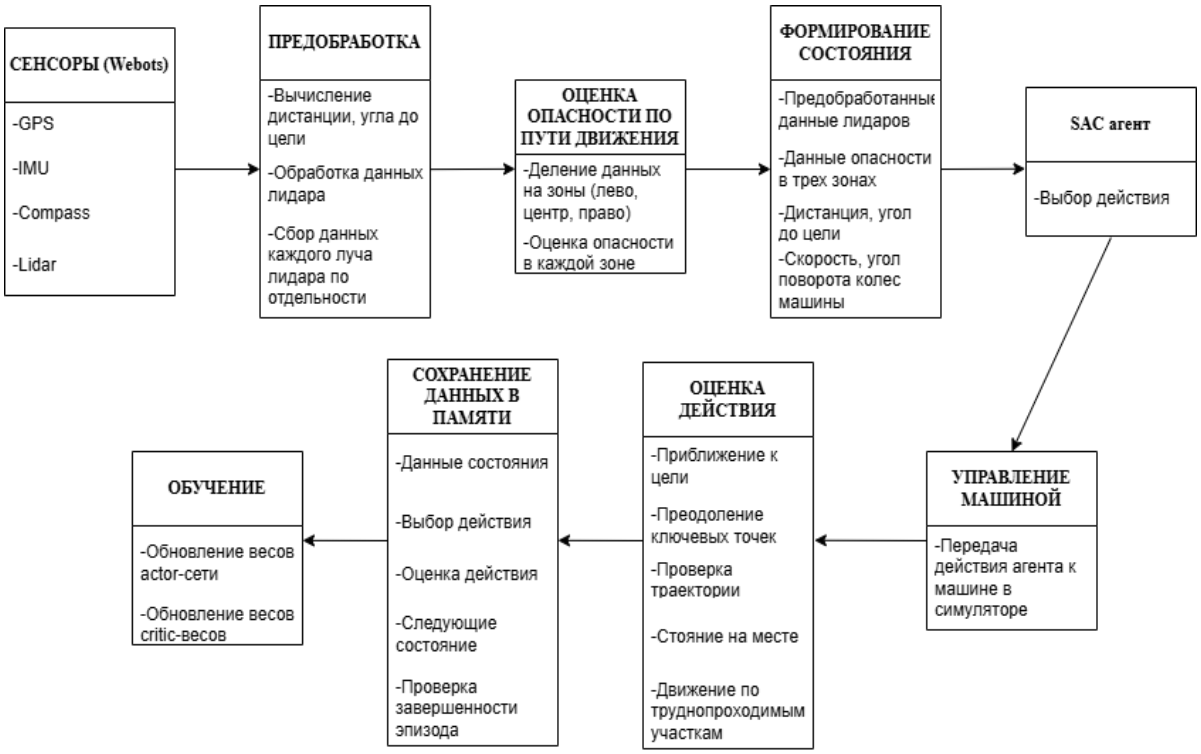


Рис. 3. Схема алгоритма обучения RL-агента

На следующем этапе для каждой зоны рассчитывается оценка опасности, учитывающая количество обнаруженных препятствий, расстояние до ближайшего препятствия, текущую скорость и текущее направление поворота колёс. Дополнительно угол поворота колёс преобразуется в дискретную форму, отражающую направление движения транспортного средства: влево, прямо или вправо. Это позволяет повысить значимость препятствий, расположенных в предполагаемом направлении дальнейшего движения машины. Итогом работы алгоритма является формирование трёх нормализованных коэффициентов опасности, характеризующих уровень загруженности препятствиями в левой, центральной и правой областях перед транспортным средством (рисунок 4). Полученные значения используются в дальнейшем при расчёте функции вознаграждения и формирования состояния.

Функция награды

Для обучения агента была разработана составная функция награды, направленная на формирование безопасной и эффективной стратегии движения автономного вездехода к целевой точке. Основной задачей функции награды является стимулирование агента к поступательному движению в сторону цели, поддержанию устойчивой скорости, выбору безопасной траектории и избеганию столкновений либо попадания в непроходимые участки местности. При проектировании функции особое внимание уделялось балансу между поощрением прогресса и штрафованием потенциально опасного поведения, что позволило предотвратить выработку локально оптимальных, но практически бесполезных стратегий.

Положительная часть награды формируется за сокращение расстояния до целевой точки. При этом используется двухуровневый подход: агент получает небольшую

постоянную награду за каждое уменьшение дистанции до цели, а также дополнительное поощрение при прохождении крупных контрольных интервалов расстояния, что стимулирует как локальное продвижение, так и устойчивое движение на длинной дистанции.

Штрафные компоненты отвечают за снижение награды при движении по сложным или потенциально непроходимым типам покрытия, а также за выбор траектории, пересекающей препятствия. Дополнительно вводится штраф за слишком низкую скорость движения, мотивирующий агента поддерживать поступательное движение и не затягивать прохождение эпизода. Критические ситуации, такие как столкновение с препятствием, попадание в непроходимую область или успешное достижение цели, завершают эпизод с выдачей крупной фиксированной награды или штрафа.

В общем виде функция награды может быть представлена следующим образом:

$$R = R_{\text{progress}} + R_{\text{checkpoint}} - P_{\text{idle}} - P_{\text{terrain}} - P_{\text{trajectory}} + R_{\text{goal}} - P_{\text{collision}} \quad (1)$$

где *R_progress*— награда за текущее приближение к цели,

R_checkpoint— дополнительная награда за прохождение крупных интервалов дистанции,

P_idle— штраф за отсутствие движения или прогресса,

P_terrain— штраф за движение по сложному покрытию,

P_trajectory— штраф за опасную траекторию относительно препятствий,

R_goal— награда за достижение цели,

P_collision— штраф за столкновение.

Таким образом, разработанная функция награды обеспечивает комплексную оценку поведения агента и направляет процесс обучения на выработку стратегии, сочетающей быстроту достижения цели, безопасность движения и адаптацию к особенностям окружающей среды.

Отдельным пунктом стоит выделить штраф за опасную траекторию относительно препятствий. Данный компонент функции награды предназначен для предварительной оценки безопасности выбранного направления движения ещё до фактического столкновения с объектом (рисунок 5).

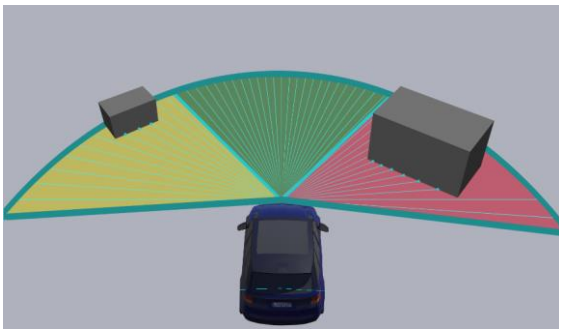


Рис. 4. Визуальное представление работы алгоритма определения уровня опасности

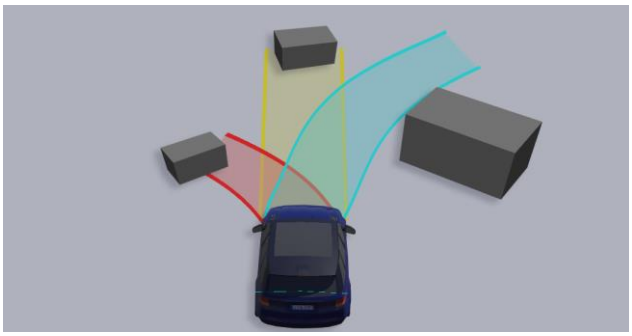


Рис. 5. Визуальное представление работы функции оценки траектории движения

Для этого на каждом шаге моделируется краткосрочная прогнозируемая траектория транспортного средства на основе его текущей скорости и угла поворота рулевого управления. Прогноз выполняется путём последовательного расчёта будущих положений машины на фиксированное количество временных шагов вперёд с использованием упрощённой кинематической модели движения. В результате

формируется набор точек, описывающих предполагаемую траекторию движения транспортного средства в ближайшем будущем.

Далее каждая точка прогнозируемой траектории сопоставляется с ранее сформированным массивом лидарных данных, содержащим расстояния до препятствий и соответствующие углы обзора сенсора. Для каждой точки определяется расстояние и угол относительно текущего положения машины, после чего выполняется поиск ближайшего лидарного луча, совпадающего с направлением движения данной точки в пределах допустимого углового отклонения. Если прогнозируемая точка траектории оказывается расположенной дальше, чем зафиксированное лидаром препятствие в том же направлении, это интерпретируется как потенциальное пересечение траектории с объектом.

В таком случае агенту назначается штраф, величина которого зависит от расстояния до обнаруженного препятствия: чем ближе препятствие находится к транспортному средству, тем больше штрафное значение. Таким образом, данный механизм позволяет учитывать не только текущее положение препятствий, но и потенциальную опасность выбранной траектории движения, что способствует формированию у агента упреждающего поведения и обучает его заранее выбирать более безопасные маршруты обхода препятствий вместо реагирования непосредственно перед столкновением.

Формально данный компонент штрафа может быть представлен следующим выражением:

$$P_{\text{trajectory}} = \begin{cases} \frac{D_{\max} - d_{\text{obs}}}{10}, & \text{если прогнозируемая траектория пересекает препятствие} \\ 0, \text{противном случае} \end{cases} \quad (2)$$

где *d_obs* – расстояние до препятствия по соответствующему лидарному лучу;

D_max – максимальная дальность анализа лидарных данных (20 метров).

Коэффициент нормализации (10) используется для масштабирования штрафа и ограничения его вклада в итоговую функцию награды, чтобы он не доминировал над другими компонентами. Значение данного коэффициента было подобрано эмпирически в процессе экспериментов.

Архитектура и обучение нейронных сетей

Для реализации алгоритма Soft Actor-Critic в разработанной системе используется архитектура, состоящая из одной actor-сети и двух независимых critic-сетей. Actor-модель отвечает за формирование управляющего действия на основе текущего состояния среды, генерируя непрерывный вектор управления, включающий ускорение и угол поворота рулевого механизма [18].

Critic-сети предназначены для оценки качества выбранных действий в текущем состоянии среды. Каждая critic-модель получает на вход текущее состояние и действие агента, после чего вычисляет прогнозируемое значение функции ценности Q. Использование двух независимых critic-сетей позволяет снизить эффект переоценки полезности действий, характерный для многих алгоритмов обучения с подкреплением. При расчёте целевого значения Q-функции используется минимальное значение из двух оценок критиков, что делает процесс обучения более устойчивым и предотвращает накопление завышенных оценок.

Обновление actor-сети выполняется путём генерации нового действия для текущего состояния и последующей оценки этого действия обеими critic-моделями. На основе минимальной оценки Q-value и логарифма вероятности действия вычисляется функция потерь actor-сети, минимизация которой направлена на увеличение ожидаемой награды при сохранении достаточного уровня исследования среды (рисунок 6). Таким образом, actor обучается выбирать действия, которые одновременно являются эффективными и сохраняют необходимую степень стохастичности.

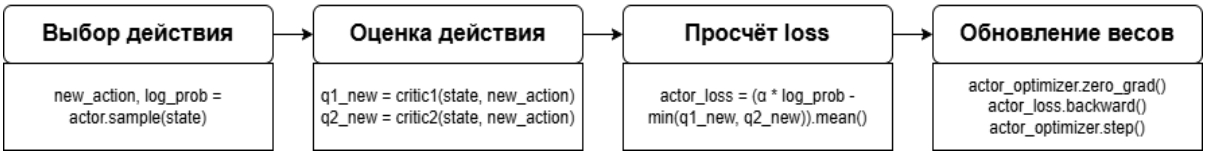


Рис. 6. Обновление actor-сети

Обновление critic-сетей осуществляется через сравнение текущих оценок Q-функции с целевым значением, рассчитываемым по уравнению Беллмана с энтропийной регуляризацией. Целевое значение определяется на основе текущей награды, ожидаемой выгоды от следующего состояния и поправки, отвечающей за сохранение исследовательского поведения агента.

$$y = r + \gamma' \cdot V(s) - \alpha \cdot H \quad (3)$$

где y — целевое значение, r — текущая награда,

γ’ — коэффициент дисконтирования (это «обесценивание» будущих наград с каждым шагом),

$V(s)$ — ожидаемая выгода от следующего состояния,

α — коэффициент исследовательской активности,

H — энтропийная поправка (мера случайности действий агента).

После вычисления ошибки между предсказанными и целевыми значениями выполняется обратное распространение ошибки и обновление весов обеих critic-сетей (рисунок 7).

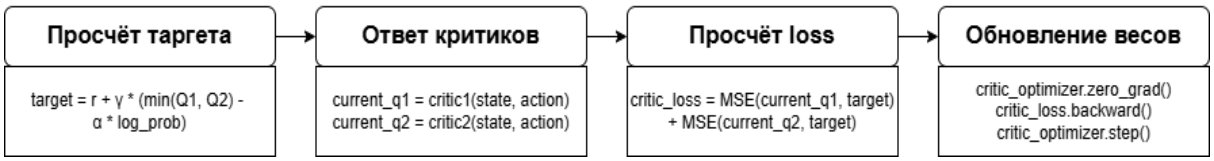


Рис. 7. Обновление critic-сетей

В рамках реализации данной архитектуры особое внимание уделялось настройке гиперпараметров, поскольку именно они во многом определяют стабильность и скорость сходимости алгоритма Soft Actor-Critic. Перечень ключевых параметров приведён в таблице ниже.

Таблица 1

Гиперпараметры финальной модели SAC (эксперимент от 07.04.2025)

Параметр	Значение
Архитектура Actor-сети	69 → 128 → 256 → 2
Архитектура Critic-сети	(69 + 2) → 128 → 256 → 1
Количество скрытых слоёв Actor	2
Количество скрытых слоёв Critic	2
Размер скрытых слоёв	128 и 256 нейронов
Функция активации	ReLU
Скорость обучения Actor (Learning Rate)	1×10^{-4}
Скорость обучения Critic (Learning Rate)	1×10^{-4}
Коэффициент дисконтирования γ	0,99
Коэффициент мягкого обновления целевых сетей τ	0,005
Коэффициент энтропийной регуляризации α	0,4
Размер мини-батча	128
Размер буфера воспроизведения (Replay Buffer)	200 000 переходов
Функция активации выходного слоя Actor	tanh
Оптимизатор	Adam

Таким образом, процесс обучения модели на каждом шаге включает выбор действия actor-сетью, оценку его качества critic-сетями, вычисление функций потерь для всех моделей и последующее обновление их параметров методом градиентного спуска. Подобная архитектура обеспечивает устойчивое обучение в непрерывном пространстве действий и позволяет формировать плавную, адаптивную стратегию управления автономным транспортным средством в сложной динамической среде.

Программная реализация

Для воспроизведения результатов приведены сведения о версиях программного Для воспроизведения результатов приведены сведения о версиях программного обеспечения, библиотек и аппаратной платформы, использованных при разработке и обучении RL-агента.

Симуляционная среда построена на базе Webots версии R2025a, в которой использованы встроенная модель полноприводного внедорожника Range Rover и стандартный лидарный сенсор с углом обзора 360°. Управление симуляцией и взаимодействие с ней реализованы на языке Python версии 3.11.3.

Алгоритм Soft Actor-Critic реализован с применением фреймворка глубокого обучения PyTorch версии 2.0.1. Управление симуляцией и взаимодействие с вездеходом выполнены на языке Python с применением встроенного API Webots (vehicle). Для численных операций использована библиотека NumPy.

Результат обучения и тестирования

Для подбора эффективной конфигурации алгоритма обучения была проведена серия последовательных экспериментов, в рамках которых изменялись параметры reward-функции, стратегия формирования обучающих батчей, гиперпараметры SAC-модели и логика обновления сети. Целью экспериментов являлось повышение стабильности обучения, улучшение сходимости модели и увеличение доли успешных заездов агента в тестовой среде.

Первые эксперименты от 21.03, представленные в таблице 1, были посвящены базовой интеграции алгоритма Soft Actor-Critic в существующую систему управления. На данном этапе модель демонстрировала низкую эффективность обучения, что выражалось в минимальном количестве успешных заездов и нестабильных значениях функции награды. Это подтвердило необходимость дальнейшей настройки reward-функции и гиперпараметров обучения.

В эксперименте 24.03_1 была переработана функция награды в сторону усиления штрафных компонентов. Однако избыточная «штрафующая» структура reward-функции привела к ухудшению исследовательского поведения агента и не позволила достичь существенного роста качества обучения. В связи с этим в следующем эксперименте 24.03_2 часть штрафов была удалена, а также были скорректированы ключевые гиперпараметры обучения: скорость обучения уменьшена до $1 \cdot 10^{-4}$, а размер обучающего батча увеличен с 64 до 128. Данные изменения позволили повысить стабильность обновления весов и улучшить начальные показатели обучения.

В эксперименте 25.03 была протестирована схема обучения со стандартными гиперпараметрами SAC, а также внедрён механизм ступенчатой награды за прохождение каждых двух метров маршрута. Дополнительно обновление модели стало выполняться раз в 20 шагов среды вместо постоянного обучения. Несмотря на заметный рост средней награды, итоговый показатель успешных заездов оставался недостаточным, что свидетельствовало о частичном переобучении агента на локальные шаблоны поведения.

Следующий этап оптимизации, проведённый 27.03, включал ограничение значения target Q-функции и переход к полностью случайному формированию обучающих батчей вместо смешанной схемы, в которой использовались как случайные, так и лучшие примеры из replay buffer. Данные изменения позволили повысить устойчивость critic-

сетей и уменьшить переоценку Q-value, однако значительного роста итогового качества управления достигнуто не было.

Наиболее существенное улучшение результатов было получено в эксперименте от 02.04, где вместо прямого штрафа за приближение к препятствиям была внедрена система штрафования прогнозируемой траектории движения. Одновременно была отменена схема периодического обучения, и обновление модели стало происходить на каждом шаге среды. Это позволило значительно повысить частоту успешных заездов и добиться лучшего баланса между исследованием среды и эксплуатацией изученной стратегии. Данный эксперимент продемонстрировал наивысший показатель успешности среди всех протестированных конфигураций.

В финальном эксперименте 07.04 была дополнительно скорректирована reward-функция путём удаления штрафа за движение задним ходом, уменьшена максимальная скорость транспортного средства с 30 до 20 единиц и реализована полноценная поддержка реверсивного движения. Данный эксперимент являлся развитием конфигурации, полученной на этапе 02.04, и позволил дополнительно расширить пространство допустимых действий агента, повысив гибкость его поведения в сложных навигационных ситуациях. Внедрение заднего хода обеспечило возможность выхода из неудачных траекторий и маневрирования в ограниченном пространстве, что в совокупности с доработанной функцией награды привело к достижению наилучших итоговых метрик среди всех проведённых экспериментов.

Анализ проведённых экспериментов показал, что наибольшее влияние на качество обучения оказали структура reward-функции и способ оценки опасности траектории движения. В частности, использование прогноза траектории вместо прямого анализа расстояния до препятствий позволило агенту перейти от реактивного избегания столкновений к более упреждающему и стратегическому поведению, что существенно повысило эффективность навигации в сложной среде.

Краткие результаты данных экспериментов можно увидеть в таблице 1. Для оценки качества обучения и сравнения различных конфигураций модели использовался набор метрик, характеризующих как итоговую эффективность поведения агента, так и внутреннюю стабильность процесса обучения.

Таблица 2

Результаты экспериментов

Эксперимент	Норм. награда (усл.ед)	Норм. дистанция (метры)	Успешность заезда (проценты)	Норм. Critic loss	Норм. Actor loss	Log prob	Норм. Q
21.03	0.493	0.577	3.05	0.043	0.593	10.613	0.408
24.03_1	0.535	0.623	0.21	0.244	0.610	5.280	0.391
24.03_2	0.549	0.580	0.88	0.168	0.519	5.357	0.482
25.03	0.726	0.546	1.17	0.347	0.430	7.323	0.571
27.03	0.559	0.532	15.22	0.328	0.353	4.127	0.650
02.04	0.516	0.450	53.37	0.053	0.315	-1.050	0.680
07.04	0.511	0.389	41.84	0.035	0.315	-1.025	0.685

Нормированная награда отражает среднее значение функции награды за всё время обучения, получаемой агентом в процессе обучения, приведённое к единому масштабу для сопоставимости между экспериментами. Данный показатель характеризует общую эффективность поведения агента с точки зрения заложенной reward-функции.

Нормированная дистанция показывает среднее расстояние за всё время обучения, которое агенту остается пройти до целевой точки во время завершения эпизода. Метрика используется для оценки способности модели продвигаться к цели.

Успешность заезда характеризует количество успешных завершений маршрута или относительную частоту достижения целевой точки во время обучения. Измеряется путём деления количества всех эпизодов на количество эпизодов, в которых агент успешно завершил маршрут, с последующим умножением на 100.

Нормированный Critic Loss представляет собой усреднённую ошибку critic-сетей при оценке Q-функции за весь период обучения и позволяет оценивать стабильность процесса обучения критиков.

Нормированный Actor Loss характеризует величину функции потерь actor-сети за весь период обучения и отражает интенсивность корректировки стратегии поведения агента в процессе обучения.

Показатель Log Prob отображает средний логарифм вероятности выбираемых действий за весь период обучения и используется для контроля уровня случайности политики агента.

Нормированное Q отражает среднюю оценку ожидаемой суммарной награды, прогнозируемой critic-сетями для действий, выбираемых агентом, за весь период обучения и показывает, насколько высоко модель оценивает качество собственной стратегии.

Совокупный анализ представленных метрик позволяет комплексно оценивать практическую результативность RL-агента при прохождении маршрута.

На рисунке 8 представлен график, показывающий среднее значение награды во время обучения в эксперименте 07.04.



Рис. 8. График среднего значения награды в эксперименте 07.04

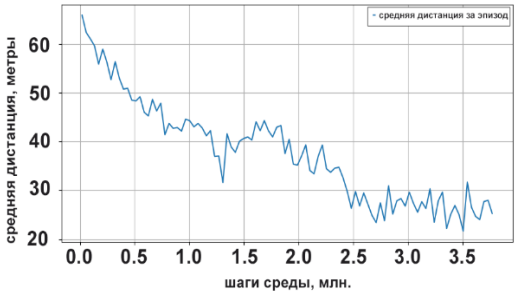


Рис. 9. График среднего значения дистанции в эксперименте 07.04

По нему можно сделать следующие выводы: на протяжении всего процесса обучения наблюдается устойчивый рост среднего значения награды, что свидетельствует о постепенном улучшении стратегии поведения агента и успешном освоении задачи автономной навигации в заданной среде.

На этом графике присутствуют локальные колебания исследуемых значений, обусловленные стохастической природой алгоритма Soft Actor-Critic и сохранением исследовательского поведения агента даже на поздних этапах обучения. Подобные колебания являются ожидаемыми и свидетельствуют о том, что модель продолжает исследовать альтернативные варианты поведения, избегая преждевременной сходимости к локально оптимальной стратегии. После приблизительно двух миллионов шагов среды темп роста награды заметно снижается, а значения начинают колебаться в пределах относительно стабильного диапазона, что может свидетельствовать о приближении процесса обучения к стадии насыщения и достижении агентом устойчивой стратегии управления.

На рисунке 9 представлен график изменения средней суммарной дистанции до цели за эпизод в процессе обучения RL-агента в эксперименте 07.04.

По графику видно устойчивое снижение данного показателя на протяжении обучения, что свидетельствует о постепенном улучшении навигационной стратегии агента и его способности эффективнее приближаться к целевой точке.

Наиболее резкое уменьшение дистанции наблюдается на ранних этапах обучения, что указывает на быстрое освоение базовых принципов движения к цели. В дальнейшем темп улучшения снижается, а кривая переходит в режим постепенной стабилизации с характерными локальными колебаниями.

Важно понимать, что это среднее значение дистанции за эпизод, поэтому итоговое снижение средней дистанции более чем в два раза относительно начального значения подтверждает успешное формирование эффективной стратегии навигации.

В результате итогового тестирования обученного RL-агента было проведено 100 независимых испытаний. Агент успешно достиг целевой точки в 85 случаях из 100. Данный показатель свидетельствует о высокой практической эффективности разработанного алгоритма управления и подтверждает способность обученной модели стабильно решать задачу автономной навигации в большинстве тестовых сценариев. Наличие 15% неуспешных попыток указывает на сохранение отдельных сложных или пограничных ситуаций, в которых агент всё ещё допускает ошибки, однако в целом достигнутый уровень успешности позволяет говорить о формировании устойчивой и работоспособной стратегии обхода препятствий.

Ограничения и перспективы переноса алгоритма на реальную платформу

Все предоставленные в работе результаты получены в симуляционной среде Webots, это позволило обеспечить на начальном этапе исследований безопасность и воспроизводимость экспериментов, но это приводит к проблеме sim-to-real gap. То есть разрыв между динамикой модели и проведением реального вездехода в приарктических условиях. Чтобы преодолеть данный разрыв при переходе к натурным испытаниям, запланирован комплекс мер, включающий этап подготовки симуляции и адаптации модели на реальном объекте.

На уровне симуляции рассматривается применение domain randomization, а именно вариация параметров трения шин с грунтом, включая снежное и ледяное покрытие, масса транспортного средства, задержек в канале управления и шумов лидарных измерений. Данный подход был предложен в работе Tobin et al. [20] для переноса нейросетевых моделей с симуляции на реальные роботы и показал высокую эффективность в задачах компьютерного зрения и управления. Это позволит сформировать алгоритм, устойчивый к неопределенностям физической среды. Также будет проведена процедура калибровки коэффициентов динамической модели Webots по данным, полученным на реальном вездеходе, для минимизации систематического отклонения в кинематике и отклике приводов. Современное состояние методов обучения роботов в рандомизированных симуляциях представлено в обзоре Muratore et al. [21].

Архитектура агента, использующего в качестве входных данных только лидарное облако точек и одометрию, изначально снижает риск визуального разрыва, поскольку лидарные данные менее чувствительны к изменениям освещённости и текстурным различиям между симулятором и реальностью, чем оптические камеры. Но для финальной адаптации политики к реальному сенсору предусмотрен механизм дообучения (fine-tuning): небольшая часть весов actor-сети будет дообучена на короткой

выборке реальных траекторий, собранных при телеуправлении вездеходом на полигоне схожей конфигурации.

Для повышения безопасности будет разработана двухуровневая архитектура управления. В случае деградации политики SAC в реальных условиях система верхнего уровня может временно передать управление классическому алгоритму с жёсткими ограничениями по безопасности, что снижает риск аварийных ситуаций на этапе отладки.

Выводы

В ходе выполнения работы проведён анализ существующих подходов к автономной навигации в неструктурированных условиях, выявивший их неприменимость для приарктических территорий из-за отсутствия дорожной инфраструктуры. Сформулированы базовый макросценарий автономной миссии и набор универсальных микросценариев, определяющие требования к разрабатываемому алгоритму. Обоснован выбор обучения с подкреплением как метода, не требующего размеченных экспертных траекторий и позволяющего обучать агента в симуляционной среде.

В рамках исследования разработан метод обработки сенсорных данных и алгоритм управления для автономной навигации вездехода в неструктурированной среде, основанные на обучении с подкреплением Soft Actor-Critic. Предложенный подход позволяет автоматически обрабатывать лидарные данные, формировать признаковое пространство и генерировать непрерывные управляющие воздействия в реальном времени без необходимости заранее задавать фиксированные правила поведения, не требующий подробной карты местности и работающий в условиях отсутствия или неустойчивого сигнала ГНСС. Разработанная система управления демонстрирует устойчивую работу в 85% тестовых сценариев, что подтверждает эффективность предложенного метода обработки информации и алгоритма управления для автономной навигации в условиях неопределённости. Результаты апробации алгоритма показали высокую значимость предложенной структуры функции награды в RL-агенте и способа оценки опасности траектории. Предложенный подход может быть масштабирован на другие классы робототехнических платформ, что подтверждает его универсальность как метода системного анализа и управления в робототехнических приложениях.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования методов глубокого обучения с подкреплением для управления автономными транспортными средствами в сложных природно-климатических условиях и создают основу для дальнейшего расширения алгоритма на более сложные сценарии движения, добавления новых сенсоров и для более крупных и проработанных карт. В дальнейшем планируется развитие системы за счёт совершенствования методов построения и анализа карты местности, расширения набора сценариев движения, а также повышения эффективности алгоритмов маршрутизации и оценки проходимости поверхности с использованием дополнительных источников данных.

Статья подготовлена при финансовой поддержке в виде гранта в форме субсидии за счет средств бюджета Архангельской области (Соглашение № 7 от 29.12.2025) в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка программно-аппаратного комплекса автономного передвижения вездеходов в сложных природно-климатических условиях на основе технологий искусственного интеллекта».

Список литературы

1. Герасёв М., Савченко А. В., Макаров И. Повышение эффективности автономного вождения с использованием пространственной памяти и механизмов внимания в обучении с подкреплением // Труды Института системного анализа РАН. – 2024. – Т. 74, № 3. – С. 45–56. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3486602. (Примечание: данное исследование параллельно издано командой в международном пуле IEEE).

2. Караваев Ю. Л., Килин А. А., Клековкин А. В. Методы и безмодельные алгоритмы обучения с подкреплением в задачах имитационного моделирования робототехнических систем // Нелинейная динамика. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 215–228. – DOI: 10.20537/nd230206.

3. Анисимов Ю. О., Кацай Д. А. Разработка интеллектуальной системы управления курсом движения автономного транспортного средства методами глубокого обучения с подкреплением // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 89–98. – DOI: 10.14529/ctcr210408.

4. Learning to Drive Off Road on Smooth Terrain in Unstructured Environments Using an On-Board Camera and Sparse Aerial Images / T. Manderson [et al.] // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2020. – P. 1263–1270. – DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341656.

5. Off-Road Autonomy Validation Using Scalable Digital Twin Simulations Within High-Performance Computing Clusters / T. V. Samak [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – URL: arxiv.org (дата обращения: 01.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.2405.04743.

6. Yousif K., Bab-Hadiashar A., Hoseinnezhad R. An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics // Intelligent Industrial Systems. – 2015. – Vol. 1, № 4. – P. 289–311. – DOI: 10.1007/s40903-015-0032-7.

7. Advancing Off-Road Autonomous Driving: The Large-Scale ORAD-3D Dataset and Comprehensive Benchmarks / C. Min [et al.] // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2026). – IEEE, 2026. – URL: arxiv.org (дата обращения: 01.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.2510.16500.

8. RELLIS-3D Dataset: Data, Benchmarks and Analysis / P. Jiang [et al.] // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2021. – P. 1110–1116. – DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561251.

9. Webots: Official website of Cyberbotics [Электронный ресурс]. – URL: cyberbotics.com (дата обращения: 01.05.2026).

10. Tao S., Hu Y., Huang H. Application of reinforcement learning algorithm on robot motion control and navigation in Webots simulator // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2580, № 1. – Art. 012036. – DOI: 10.1088/1742-6596/2580/1/012036.

11. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. – 2nd ed. – Cambridge, MA: MIT Press, 2018. – 552 p.

12. Gazebo: Official website of Gazebo Simulator [Электронный ресурс]. – URL: gazebosim.org (дата обращения: 01.05.2026).

13. NVIDIA Isaac Sim: Official website of NVIDIA [Электронный ресурс]. – URL: nvidia.com (дата обращения: 01.05.2026).

14. Mohammad N., Bezzo N. Soft Actor-Critic-based Control Barrier Adaptation for Robust Autonomous Navigation in Unknown Environments // arXiv preprint. – 2025. – URL: arxiv.org (дата обращения: 08.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.2503.08479.

15. Soft Actor-Critic Algorithms and Applications / T. Haarnoja [et al.] // arXiv preprint. – 2018. – URL: arxiv.org (дата обращения: 08.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.1812.05905.

16. Kapania N. A., Subosits J., Gerdes J. C. Hierarchical Off-Road Path Planning and Its Validation Using a Scaled Autonomous Car // Proceedings of the ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC 2017). – 2017. – Vol. 2. – Art. V002T23A004. – DOI: 10.1115/DSCC2017-5374.

17. Soft Actor-Critic // OpenAI Spinning Up Documentation [Электронный ресурс]. – URL: openai.com (дата обращения: 02.05.2026).

18. Enhancing Autonomous Driving Navigation Using Soft Actor-Critic / B. B. Elallid [et al.] // Future Internet. – 2024. – Vol. 16, № 7. – Art. 238. – URL: https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/12185/ (дата обращения: 01.05.2026). – DOI: 10.3390/fi16070238.

19. Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor / T. Haarnoja [et al.] // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML 2018). – 2018. – Vol. 80. – P. 1861–1870. – DOI: 10.48550/arXiv.1801.01290.

20. Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World / J. Tobin [et al.] // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – P. 23–30. – DOI: 10.1109/IROS.2017.8202133.

21. Robot Learning From Randomized Simulations: A Review / F. Muratore [et al.] // Frontiers in Robotics and AI. – 2022. – Vol. 9. – Art. 799893. – DOI: 10.3389/frobt.2022.799893.

22. Michel O. Webots: Professional Mobile Robot Simulation // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2004. – Vol. 1, № 1. – P. 39–42. – DOI: 10.5772/5618.

23. Human-level control through deep reinforcement learning / V. Mnih [et al.] // Nature. – 2015. – Vol. 518, № 7540. – P. 529–533. – DOI: 10.1038/nature14236.

24. Continuous control with deep reinforcement learning / T. P. Lillicrap [et al.] // International Conference on Learning Representations (ICLR 2016). – 2016. – URL: openreview.net (дата обращения: 02.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.1509.02971.

References

1. Gerasyov M., Savchenko A. V., Makarov I. Enhancing Autonomous Driving With Spatial Memory and Attention in Reinforcement Learning // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 173316–173324. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3486602.

2. Karavaev Yu. L., Kilin A. A., Klekovkin A. V. Methods and model-free reinforcement learning algorithms in problems of simulation modeling of robotic systems // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2023. – Vol. 19, No. 2. – P. 215–228. – DOI: 10.20537/nd230206.

3. Anisimov Yu. O., Katcai D. A. Development of an Intelligent System for Controlling the Course of Movement of an Autonomous Vehicle by Deep Reinforcement Learning Methods // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer

Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 89–98. – DOI: 10.14529/ctcr210408.

4. Learning to Drive Off Road on Smooth Terrain in Unstructured Environments Using an On-Board Camera and Sparse Aerial Images / T. Manderson [et al.] // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2020. – P. 1263–1270. – DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341656.

5. Off-Road Autonomy Validation Using Scalable Digital Twin Simulations Within High-Performance Computing Clusters / T. V. Samak [et al.] // arXiv preprint. – 2024. – URL: arxiv.org (accessed: 01.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.2405.04743.

6. Yousif K., Bab-Hadiashar A., Hoseinnezhad R. An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics // Intelligent Industrial Systems. – 2015. – Vol. 1, No. 4. – P. 289–311. – DOI: 10.1007/s40903-015-0032-7.

7. Advancing Off-Road Autonomous Driving: The Large-Scale ORAD-3D Dataset and Comprehensive Benchmarks / C. Min [et al.] // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2026). – IEEE, 2026. – URL: arxiv.org (accessed: 01.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.2510.16500.

8. RELLIS-3D Dataset: Data, Benchmarks and Analysis / P. Jiang [et al.] // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2021. – P. 1110–1116. – DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561251.

9. Webots: Official website of Cyberbotics [Online]. – URL: cyberbotics.com (accessed: 01.05.2026).

10. Tao S., Hu Y., Huang H. Application of reinforcement learning algorithm on robot motion control and navigation in Webots simulator // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2580, No. 1. – Art. 012036. – DOI: 10.1088/1742-6596/2580/1/012036.

11. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. – 2nd ed. – Cambridge, MA: MIT Press, 2018. – 552 p.

12. Gazebo: Official website of Gazebo Simulator [Online]. – URL: gazebosim.org (accessed: 01.05.2026).

13. NVIDIA Isaac Sim: Official website of NVIDIA [Online]. – URL: nvidia.com (accessed: 01.05.2026).

14. Mohammad N., Bezzo N. Soft Actor-Critic-based Control Barrier Adaptation for Robust Autonomous Navigation in Unknown Environments // arXiv preprint. – 2025. – URL: arxiv.org (accessed: 08.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.2503.08479.

15. Soft Actor-Critic Algorithms and Applications / T. Haarnoja [et al.] // arXiv preprint. – 2018. – URL: arxiv.org (accessed: 08.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.1812.05905.

16. Kapania N. A., Subosits J., Gerdes J. C. Hierarchical Off-Road Path Planning and Its Validation Using a Scaled Autonomous Car // Proceedings of the ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC 2017). – 2017. – Vol. 2. – Art. V002T23A004. – DOI: 10.1115/DSCC2017-5374.

17. Soft Actor-Critic // OpenAI Spinning Up Documentation [Online]. – URL: openai.com (accessed: 02.05.2026).

18. Enhancing Autonomous Driving Navigation Using Soft Actor-Critic / B. B. Elallid, N. Benamar, M. Bagaa, Y. Hadjadj-Aoul // Future Internet. – 2024. – Vol. 16, No.

7. – Art. 238. – URL: https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/12185/ (accessed: 01.05.2026). – DOI: 10.3390/fi16070238.

19. Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor / T. Haarnoja [et al.] // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML 2018). – 2018. – Vol. 80. – P. 1861–1870. – DOI: 10.48550/arXiv.1801.01290.

20. Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World / J. Tobin [et al.] // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – P. 23–30. – DOI: 10.1109/IROS.2017.8202133.

21. Robot Learning From Randomized Simulations: A Review / F. Muratore [et al.] // Frontiers in Robotics and AI. – 2022. – Vol. 9. – Art. 799893. – DOI: 10.3389/frobt.2022.799893.

22. Michel O. Webots: Professional Mobile Robot Simulation // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2004. – Vol. 1, No. 1. – P. 39–42. – DOI: 10.5772/5618.

23. Human-level control through deep reinforcement learning / V. Mnih [et al.] // Nature. – 2015. – Vol. 518, No. 7540. – P. 529–533. – DOI: 10.1038/nature14236.

24. Continuous control with deep reinforcement learning / T. P. Lillicrap [et al.] // International Conference on Learning Representations (ICLR 2016). – 2016. – URL: openreview.net (accessed: 02.05.2026). – DOI: 10.48550/arXiv.1509.02971.

Sas S.I., Kuznetsov V.M., Vasendina I.S., Filippova N.A., Blokhin A.N., Guryev A.T., Shoshina K.V.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR STATIC OBSTACLE AVOIDANCE BY AN AUTONOMOUS ALL-TERRAIN VEHICLE IN THE ARCTIC REGIONS

Abstract*. The article discusses an approach to creating an algorithm for bypassing static obstacles by an autonomous all-terrain vehicle in the Arctic territories, based on creating an agent that works on reinforcement learning. The relevance of the work is due to the ineffectiveness of using most of the modern developments of autonomous driving in the Arctic territories, due to their functionality tuned for urban infrastructure. An algorithm is proposed, in which, as the movement to the key point, the RL-agent independently identifies obstacles and chooses the most optimal bypass path. The training is conducted in the Webots simulation environment using lidar data, which allows the agent to navigate without satellite imagery or visual landmarks. The RL agent can be used in manufacturing processes for logistics tasks.*

Keywords*: RL-agent, all-terrain vehicle, reinforcement learning, Arctic territories, obstacle avoidance, lidar, Webots simulator, autonomous navigation, static obstacles.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Сас Сергей Игоревич ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия Бакалавр e-mail: sas.s@edu.narfu.ru	**Sas Sergei Igorevich** Northern (Arctic) Federal University named after Lomonosov, Arkhangelsk, Russia Bachelor e-mail: sas.s@edu.narfu.ru

Кузнецов Владислав Михайлович ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия Бакалавр e-mail: i.am.viad@yandex.ru	**Kuznetsov Vladislav Mikhailovich** Northern (Arctic) Federal University named after Lomonosov, Arkhangelsk, Russia Bachelor e-mail: i.am.viad@yandex.ru
Васендина Ирина Сергеевна ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия Кандидат технических наук, доцент e-mail: i.vasendina@narfu.ru	**Vasendina Irina Sergeevna** Northern (Arctic) Federal University named after Lomonosov, Arkhangelsk, Russia Candidate of Technical Sciences, Associate Professor e-mail: i.vasendina@narfu.ru
Филиппова Надежда Анатольевна ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», г. Москва, Россия доктор технических наук, профессор e-mail: umen@bk.ru	**Filippova Nadezhda Anatolyevna** Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia Doctor of Technical Sciences, Professor e-mail: umen@bk.ru
Блохин Александр Николаевич Институт транспортных систем Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия Кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО «Завод вездеходов амфибий» (ООО «ЗВЕЗДА») e-mail: vezdekhod@zavod-vezdekhodov.ru	**Blokhin Alexander Nikolaevich** Institute of Transport Systems, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, General Director of LLC “Amphibious All-Terrain Vehicle Plant” (LLC “ZVEZDA”) e-mail: vezdekhod@zavod-vezdekhodov.ru
Гурьев Александр Тимофеевич ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия Доктор технических наук, профессор e-mail: a.gurev@narfu.ru	**Guryev Alexander Timofeevich** Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia Doctor of Technical Sciences, Professor e-mail: a.gurev@narfu.ru
Шошина Ксения Владимировна ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия Кандидат технических наук, доцент e-mail: k.shoshina@narfu.ru	**Shoshina Kseniya Vladimirovna** Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia Candidate of Technical Sciences, Associate Professor e-mail: k.shoshina@narfu.ru

УДК 004.9: 656.07

Володарец Н.В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Аннотация. *В статье предложена многомерная классификация источников информационной неопределённости в транспортных системах по природе возникновения, месту проявления, уровню управления и степени формализуемости, отличающаяся установлением прямой связи между типом неопределённости и методом её компенсации. На основе классификации разработана формальная модель интеллектуальной системы управления дорожным движением, учитывающая интегральный показатель уровня неопределённости $\Upsilon(t)$ и адаптивные веса частных критериев. Введено определение ε_{max}-робастности системы. Предложен гибридный интегральный критерий эффективности, обобщающий вероятностный и робастный подходы. Разработана методология количественной оценки влияния неопределённости на ключевые показатели эффективности. Выполнена формальная постановка четырёх взаимосвязанных задач системного анализа.*

Ключевые слова: *системный анализ, информационная неопределённость, классификация, формальная модель, робастность, гибридный критерий, идентификация, прогнозирование.*

Постановка задачи

Управление дорожным движением в современном городе представляет собой сложную человеко-машинную систему, функционирующую в условиях стохастических возмущений, неполноты и запаздывания информации [1–3]. Количественный анализ показывает, что за период 2015–2025 гг. уровень автомобилизации в крупных городах России вырос на 28–35%, что привело к увеличению средних задержек на перекрёстках в 1,5–2 раза. При этом около 70% аварийных ситуаций могли бы быть предотвращены при наличии систем раннего обнаружения аномалий [4].

Существующие подходы к управлению (SCATS, SCOOT) ориентированы на компенсацию отдельных типов неопределённости – сенсорной, средовой или структурной. В реальных дорожных сценариях все эти факторы действуют одновременно и взаимосвязанно, порождая эффекты циклического усиления неопределённостей [5, 6]. Это приводит к снижению надёжности, точности и адаптивности управления, особенно в условиях ограниченной видимости, частичных окклюзий и других возмущений.

Научная проблема состоит в отсутствии целостной методологии системного анализа, позволяющей на этапе проектирования устанавливать соответствие между типом неопределённости и методом её компенсации и интегрировать учёт неопределённости в единую модель управления.

Анализ последних исследований

Теоретические основы управления транспортными потоками заложены в фундаментальных трудах зарубежных учёных: Уэбстера (формулы для светофорных циклов), Сингара (модели движения), Папагеоргиу (системы управления автомагистралями), Социалиса (интегрированное управление транспортными сетями), а также Кернера (теория трёхфазного потока) [7–9].

В России значительный вклад в развитие теории и практики интеллектуальных транспортных систем внесли В.М. Власов (транспортная телематика), С.В. Жанказиев (методология формирования ИТС), Ю.В. Трофименко (экологические аспекты), О.Н. Ларин (системный анализ в транспортной логистике) [10–12].

В работе [13] предложен подход к формализации неопределённости в задачах управления транспортными потоками на основе интервальных моделей, позволяющий учитывать диапазоны возможных значений интенсивности движения. В работе [14] развит нечётко-вероятностный подход, объединяющий стохастическое и лингвистическое описание неопределённости. В исследованиях [15, 16] предложены методы мультисенсорной фузии, однако они рассматривают только сенсорную неопределённость и не учитывают её взаимосвязь с другими типами.

Однако анализ показывает, что существующие подходы рассматривают отдельные типы неопределённости изолированно. Отсутствует комплексная теоретическая база, интегрирующая классификацию неопределённости, формальную модель управления и критерии эффективности в единую методологию. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела.

Цель работы

Цель исследования – разработка многомерной классификации источников информационной неопределённости и построение на её основе формальной модели управления дорожным движением, включающей интегральный показатель уровня неопределённости и гибридный критерий эффективности.

Научная новизна исследования:

1) разработана многомерная классификация источников информационной неопределённости в транспортных системах, отличающаяся установлением прямой связи между типом неопределённости и методом её компенсации;

2) разработана формальная модель интеллектуальной системы управления дорожным движением, учитывающая интегральный показатель уровня неопределённости $\Upsilon(t)$ и адаптивные веса частных критериев $w_i(\Upsilon(t))$; введено определение ε_{max}-робастности системы;

3) предложен гибридный интегральный критерий эффективности, обобщающий вероятностный и робастный подходы и позволяющий гибко настраивать баланс между оптимальностью и робастностью через коэффициенты $\lambda_i \in [0,1]$.

Основная часть

1. Многомерная классификация источников информационной неопределённости.

Информационная неопределённость является неотъемлемой характеристикой транспортных систем, обусловленной сложностью, динамичностью и стохастической природой процессов, протекающих в дорожных сетях. В системотеоретическом подходе выделяются три фундаментальные категории неопределённости: алеаторная (стохастическая), эпистемическая (познавательная) и онтологическая (модельная) [1, 2].

В рамках настоящего исследования под информационной неопределённостью понимается состояние неполноты, неточности, неоднозначности или противоречивости

информации о параметрах, состоянии и поведении элементов транспортной системы, используемой для принятия управляющих решений.

На рис. 1 представлена разработанная многомерная классификация, построенная по четырём признакам.



Рис. 1. Многомерная классификация источников информационной неопределённости в транспортных системах (разработано автором)

По природе возникновения выделяются четыре типа неопределённости:

- алеаторная неопределённость связана со случайными флуктуациями интенсивности потока, вариативностью скоростей и интервалов, стохастическим характером ДТП и поведенческих отклонений; она принципиально неустранима и описывается вероятностными моделями;

- эпистемическая неопределённость обусловлена недостатком знаний о параметрах модели (пропускная способность, критические плотности), неполнотой данных о состоянии системы (ограниченный пространственный охват детекторов, погрешности измерений) и неопределённостью прогнозов;

- онтологическая неопределённость связана с неполнотой самих моделей, их неспособностью описать все релевантные аспекты реальной системы, включая человеческий фактор и структурные упрощения;

- лингвистическая неопределённость обусловлена нечёткостью качественных характеристик, неоднозначностью экспертных оценок и субъективностью суждений.

По месту проявления неопределённость классифицируется на уровень входных данных (погрешности измерений, пропуски, запаздывание), уровень модели (неопределённость параметров, структуры и граничных условий), уровень управления (неопределённость целей, критериев и управляющих воздействий) и уровень реализации (задержки исполнения, отказы оборудования).

По уровню управления неопределённость проявляется на стратегическом (долгосрочные прогнозы спроса), тактическом (параметры потоков, погодные условия) и оперативном (текущие измерения, поведение водителей, внезапные события) уровнях.

По степени формализуемости выделяются вероятностно-статистическая, интервальная, нечёткая и комбинированная неопределённость.

На рис. 2 представлены методы формализации информационной неопределённости в транспортных системах.



Рис. 2. Методы формализации информационной неопределённости в транспортных системах (разработано автором)

Ключевой результат разработанной классификации – установление прямого соответствия между типом неопределённости и методом её компенсации (таблица 1). Это позволяет на этапе проектирования системы управления обоснованно выбирать математический аппарат для каждого функционального модуля.

Таблица 1

Соответствие между типами неопределённости и методами компенсации

Тип неопределённости	Метод компенсации	Математический аппарат
Алеаторная	Вероятностный, стохастический	Теория вероятностей, марковские процессы
Эпистемическая	Интервальный, байесовский	Интервальная арифметика, фильтр Калмана
Онтологическая	Гибридный, машинное обучение	Нейросетевые модели, ансамблевые методы
Лингвистическая	Нечёткий	Теория нечётких множеств, нечёткий вывод

На рис. 3 представлена схема алгоритмов управления дорожным движением, визуализирующая связи между типами неопределённостей (U1–U4) и методами их компенсации.

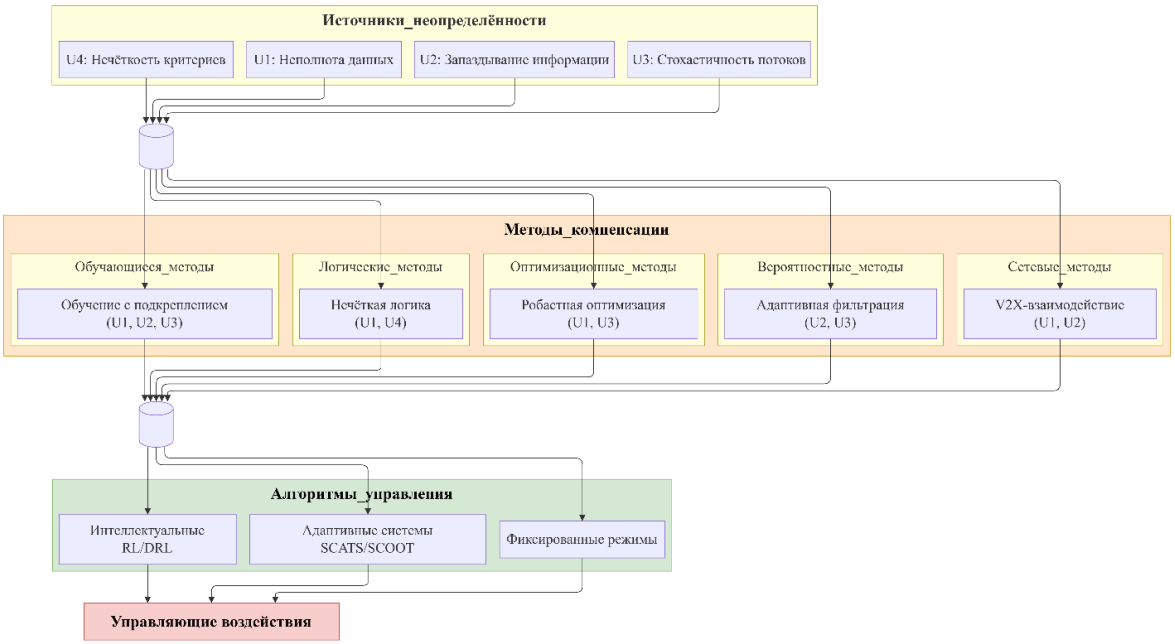


Рис. 3. Схема алгоритмов управления дорожным движением в условиях информационной неопределённости (разработано автором)

Таким образом, разработанная классификация создаёт системную основу для построения формальной модели управления, учитывающей комплексный характер неопределённости. Перейдём к построению такой модели.

2. Формальная модель интеллектуальной системы управления дорожным движением.

На основе разработанной классификации предложена формальная модель интеллектуальной системы управления дорожным движением (ИСУДД). Модель описывается кортежем:

$$\Sigma = \langle S, X, U, Y, \Delta, \Upsilon, F, H, G \rangle, \quad (1)$$

где S – множество состояний системы, включающее параметры транспортного потока (интенсивности $q_i(t)$, скорости $v_i(t)$, плотности $\rho_i(t)$), а также параметры, влияющие на состояние (состояние дорожного полотна, климатические условия и др.);

X – пространство входных сигналов (видеоданные, показания детекторов, V2X-сообщения, метеоданные, данные систем фиксации инцидентов);

U – множество управляющих воздействий, включающее длительности фаз светофорного регулирования $p_1(t)$, $p_2(t)$, …, $p_M(t)$ (в общем случае M фаз), офсеты, рекомендации интеллектуального помощника, V2X-сообщения;

Y – множество выходных сигналов (результаты детекции, треки, прогнозы параметров потока с доверительными интервалами, управляющие команды для контроллеров);

Δ – множество факторов информационной неопределённости, структура которого определяется разработанной выше классификацией;

$\Upsilon(t) \in [0,1]$ – интегральный показатель уровня неопределённости **в** момент времени t, вычисляемый на основе ковариационной матрицы оценок состояния, метрик качества трекинга и показателей качества сигнала от сенсорных систем. Данный показатель является количественной мерой доверия к текущей оценке состояния системы и используется для адаптивной настройки алгоритмов управления;

$F: X \times S \times \Delta \to S$ – функция переходов состояний, описывающая эволюцию системы;

$H: S \to Y$ – функция наблюдения, описывающая связь состояния с измерениями;

$G: Y \times \Delta \times \Upsilon \to U$ – правило управления, реализующее адаптивную стратегию.

Функция F описывает эволюцию системы под действием управляющих воздействий и факторов неопределённости. Функция H определяет, какая информация доступна системе наблюдения. Функция G реализует правило управления, учитывающее текущий уровень неопределённости $\Upsilon(t)$. Таким образом, модель (1) охватывает все этапы управления – от восприятия до воздействия.

Множество факторов информационной неопределённости Δ представляется как композиция трёх компонент:

$$\Delta = \Delta_{\text{алеатор}} \bigcup \Delta_{\text{эпистемич}} \bigcup \Delta_{\text{онтолог}}, \quad (2)$$

где $\Delta_{\text{алеатор}}$ – стохастическая неопределённость, связанная со случайными флуктуациями параметров потока $q_i(t), v_i(t), \rho_i(t)$;

$\Delta_{\text{эпистемич}}$ – неопределённость знаний (интервальные оценки параметров, пропуски данных);

$\Delta_{\text{онтолог}}$ – модельная неопределённость (учёт человеческого фактора, непредвиденные ситуации).

Центральным элементом модели является интегральный показатель неопределённости $\Upsilon(t)$. Он вычисляется по формуле:

$$\Upsilon(t) = \alpha \cdot \text{tr}(P(t)) + \beta \cdot (1 - \text{IoU}(t)) + \gamma \cdot (1 - \text{SNR}(t)), \quad (3)$$

где $\text{tr}(P(t))$ – след ковариационной матрицы оценок состояния, характеризующий дисперсию ошибок оценивания;

$\text{IoU}(t)$ – средняя метрика качества трекинга, отражающая точность сопровождения объектов;

$\text{SNR}(t)$ – отношение сигнал/шум для сенсорных данных;

$\alpha, \beta, \gamma \in [0,1]$ – весовые коэффициенты, сумма которых равна 1 (определяются эмпирически на основе анализа чувствительности).

Физический смысл $\Upsilon(t)$ состоит в количественной оценке доверия к текущей оценке состояния системы. Чем выше $\Upsilon(t)$, тем выше неопределённость и тем более консервативными должны быть управляющие решения.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма управления ИСУДД с учётом уровня неопределённости $\Upsilon(t)$.

Для оценки устойчивости системы к неопределённости вводится определение $\varepsilon_{\max}$-робастности. Система Σ называется $\varepsilon_{\max}$-робастной по отношению к множеству неопределённостей Δ, если для любых $d \in \Delta$, любых допустимых начальных условий $s_0 \in S$ и любого уровня неопределённости $\Upsilon(t) \in [0,1]$ выполняется неравенство

$$\left\| G(H(F(\xi, s_0, d)), \Upsilon(t)) - G_{ref} \right\| \le \varepsilon_{\max}, \quad (4)$$

где G_{ref} – эталонное управление, полученное в детерминированных условиях (при $d=0$, $\Upsilon=0$), т.е. решение задачи оптимизации без учёта неопределённости;

$\varepsilon_{\max}$ – максимально допустимое отклонение реального управления от эталонного, при котором ещё сохраняются целевые показатели эффективности (например, средняя задержка не превышает 30 с на перекрёсток).

Таким образом, формальная модель позволяет количественно оценивать, насколько система устойчива к неопределённости. Однако для практического применения необходимо также иметь критерий, по которому можно сравнивать различные управляющие решения. Такой критерий предлагается в следующем разделе.

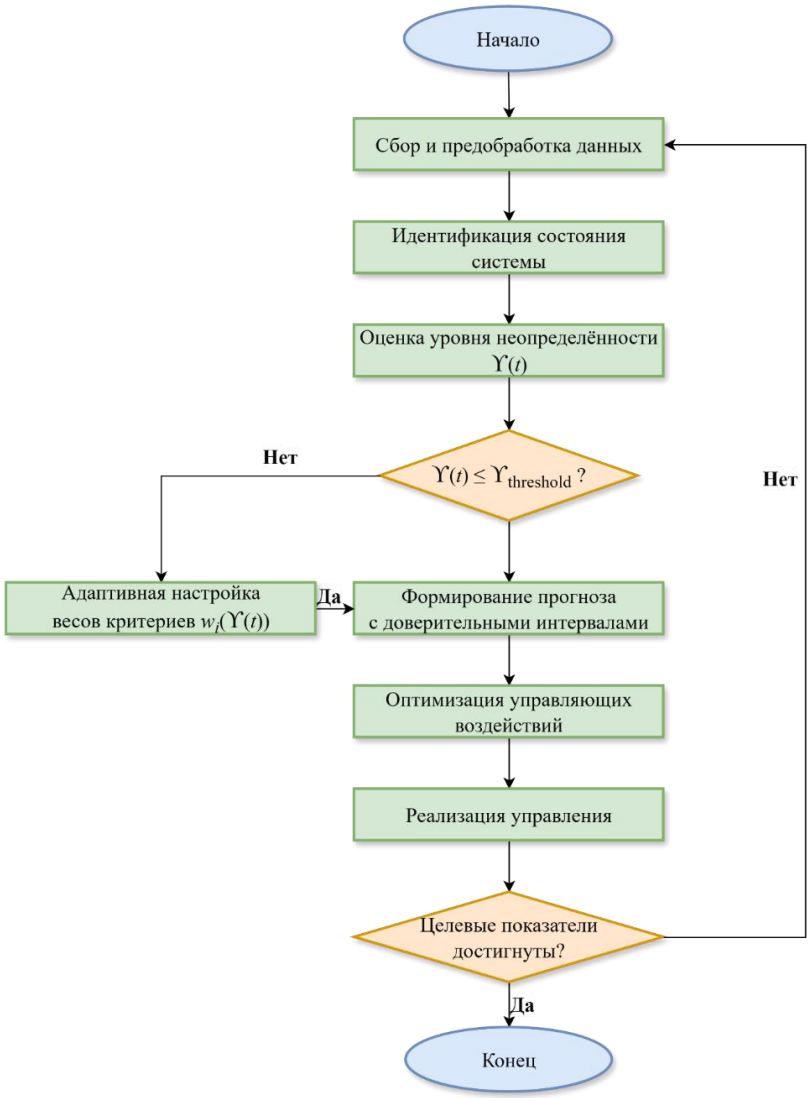


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления ИСУДД с учётом уровня неопределённости (разработано автором)

3. Гибридный интегральный критерий эффективности.

Для количественной оценки эффективности управления в условиях неопределённости предложен гибридный интегральный критерий, обобщающий вероятностный и робастный подходы. Он позволяет гибко настраивать баланс между оптимальностью и робастностью для каждого частного критерия через коэффициенты робастности λ_i.

Пусть U – множество допустимых управляющих воздействий, $\delta \in \Delta$ – вектор неопределённых параметров, $K(u,\delta)=(K_1(u,\delta), \ldots, K_m(u,\delta))$ – вектор частных критериев. Тогда гибридный интегральный критерий имеет вид:

$$J(u) = \sum_{i=1}^{m} w_i \left[(1-\lambda_i) \cdot \mathbb{E}\left[K_i(u,\boldsymbol{\delta}) \right] + \lambda_i \cdot \max_{\delta \in \Delta} K_i(u,\boldsymbol{\delta}) \right] \to \min, \quad (5)$$

где: w_i – весовые коэффициенты, отражающие приоритеты ЛПР ($\sum w_i=1$);

$\lambda_i \in [0,1]$ – коэффициенты робастности, определяющие степень учёта наихудших сценариев для каждого частного критерия;

$\mathbb{E}\left[K_i(u,\boldsymbol{\delta}) \right]$ – математическое ожидание i-го критерия;

$\max_{\delta \in \Delta} K_i(u,\delta)$ – наихудшее значение i-го критерия.

Критерий (5) обладает следующими свойствами:

- при $\lambda_i = 0$ для всех i сводится к вероятностному (минимизация средневзвешенных значений);
- при $\lambda_i = 1$ для всех i сводится к робастному (минимаксный подход);
- при $0 < \lambda_i < 1$ обеспечивает компромисс между оптимальностью и робастностью;
- различные λ_i для разных критериев позволяют гибко настраивать систему в зависимости от степени неопределённости и важности каждого аспекта эффективности.

Выбор коэффициентов λ_i осуществляется на основе анализа чувствительности и отношения лица, принимающего решения, к риску. При высокой неопределённости или высокой цене ошибки рекомендуется увеличивать λ_i, приближаясь к робастному подходу. При низкой неопределённости значения λ_i могут быть уменьшены в пользу оптимизации средних показателей.

Частные критерии K_i включают четыре группы показателей:

- K_{safety} – критерий безопасности (риск ДТП, оцениваемый через суррогатные показатели TTC, PET, DRAC);
- $K_{capacity}$ – критерий пропускной способности и задержек (средняя задержка, длина очереди);
- $K_{ecology}$ – экологический критерий (выбросы CO_2, NO_x, CO, HC, PM);
- $K_{economy}$ – экономический критерий (эксплуатационные затраты, CAPEX/OPEX).

На рис. 5 представлена иерархическая структура системы критериев, показывающая, как частные критерии агрегируются в интегральный показатель.

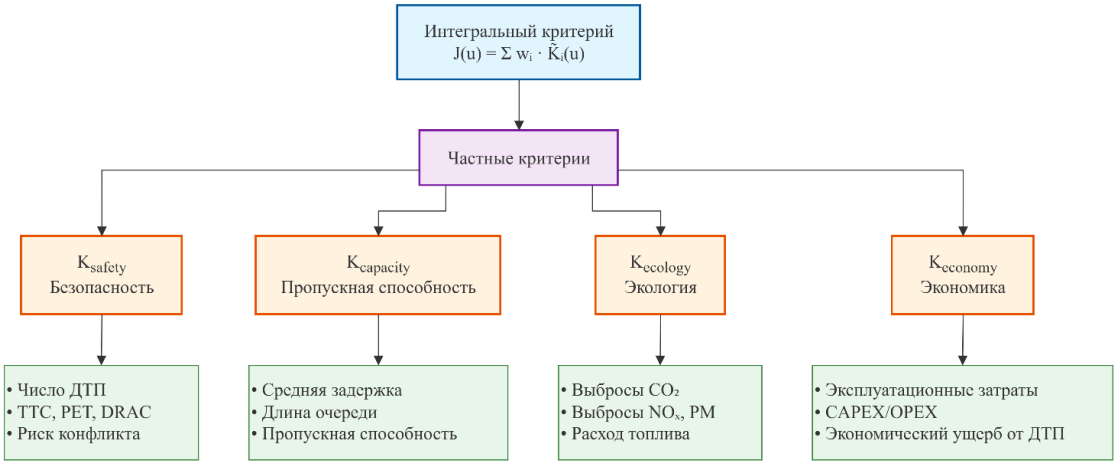


Рис. 5. Иерархическая структура системы критериев эффективности управления транспортной системой (разработано автором)

Предложенный гибридный критерий позволяет лицу, принимающему решения, выбирать стратегию управления в зависимости от уровня неопределённости: при низкой неопределённости – оптимизировать средние значения, при высокой – ориентироваться на наихудшие сценарии. Это особенно важно для транспортных систем, где цена ошибки может быть высокой.

4. Методология количественной оценки влияния неопределённости.

Для практического применения разработанной классификации и модели управления необходима количественная оценка влияния неопределённости на ключевые показатели эффективности (KPI). Предлагается трехуровневая методология.

Уровень 1. Анализ чувствительности. На этом уровне определяются параметры, оказывающие наибольшее влияние на выходные показатели системы. Для типовой задачи управления изолированным перекрёстком средняя задержка рассчитывается по формуле Уэбстера. Коэффициент чувствительности S_i рассчитывается как отношение относительного изменения выходного показателя к относительному изменению параметра: $S_i = (\Delta K/K) / (\Delta p/p)$. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка чувствительности средней задержки к неопределённости параметров

Параметр	Диапазон	Изменение задержки	Коэффициент чувствительности
Интенсивность λ	±10%	+15% / -12%	1,35
Насыщенный поток S	±5%	-8% / +10%	1,80
Длительность цикла C	±5%	±5%	1,00
Длительность фазы g	±10%	±12%	1,20

Коэффициент чувствительности показывает, на сколько процентов изменяется средняя задержка при изменении параметра на 1%. Как видно из таблицы, наибольшее влияние на среднюю задержку оказывает неопределённость насыщенного потока S (коэффициент 1,80) и интенсивности потока λ (коэффициент 1,35). Это означает, что ошибки в оценке пропускной способности перекрёстка и интенсивности потока приводят к существенным погрешностям в прогнозе задержек.

Уровень 2. Метод Монте-Карло. Для получения распределений выходных показателей выполняется многократное случайное моделирование входных параметров с последующим статистическим анализом. На рис. 6 представлена схема оценки влияния неопределённости на выбросы CO_2.

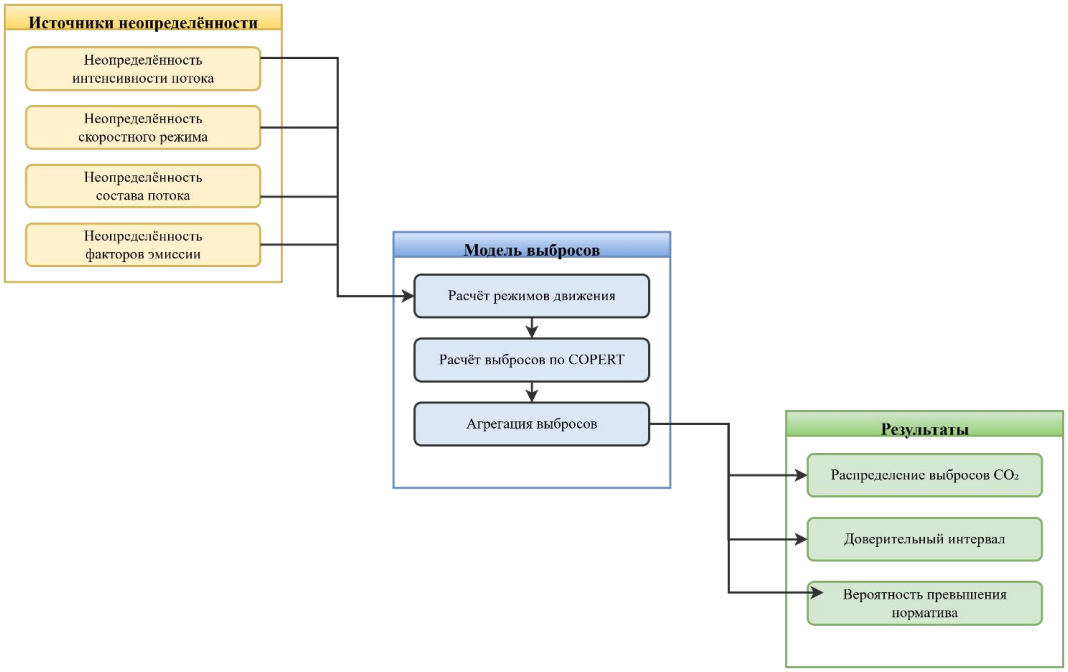


Рис. 6. Схема оценки влияния неопределённости на выбросы CO_2 (разработано автором)

Уровень 3. Построение доверительных интервалов. Для количественной оценки неопределённости прогнозов и оценок KPI применяются параметрические и

непараметрические методы построения доверительных интервалов. В таблице 3 представлены результаты оценки влияния неопределённости на показатели эффективности.

Таблица 3

Оценка влияния неопределённости на показатели эффективности

Показатель	Точечная оценка	95% доверительный интервал	Относительная неопределённость
Средняя задержка, с	35,6	[32,8; 38.4]	±7,9%
Выбросы CO_2, г/км	185	[178; 192]	±3,8%
Риск ДТП (отн. ед.)	1,25	[1,08; 1,42]	±13,6%

Как показывают результаты, наибольшая относительная неопределённость характерна для риска ДТП (±13.6%), что объясняется сложностью прогнозирования аварийных ситуаций. Наименьшая – для выбросов CO_2 (±3.8%), так как они тесно коррелируют с режимом движения, который более предсказуем.

5. Формализация задач системного анализа.

Разработанные классификация, модель и критерий позволяют формализовать четыре взаимосвязанные задачи системного анализа в процессе управления дорожным движением. На рис. 7 представлена обобщённая схема их взаимосвязи.

Представленные задачи образуют замкнутый цикл управления: идентификация определяет текущее состояние, прогнозирование оценивает его изменение, обнаружение аномалий выявляет отклонения, а оптимизация формирует управляющие воздействия, которые изменяют состояние системы, после чего цикл повторяется.

Задача идентификации состояния заключается в определении параметров транспортного потока на основе мультимодальных данных. Состояние системы в момент времени t описывается вектором:

$$\mathrm{x}(t)=[q_1(t), q_2(t), \ldots, q_m(t), v_1(t), \ldots, vm(t), \rho_1(t), \ldots, \rho_m(t)]^\top \quad (6)$$

где $q_i(t)$ – интенсивность потока на i-м участке (авт./ч);

$v_i(t)$ – средняя скорость (км/ч);

$\rho_i(t)$ – плотность потока (авт./км);

m – число наблюдаемых участков.

Наблюдения (мультимодальные данные) связаны с состоянием нелинейным оператором с аддитивной ошибкой

$$y(t)=\mathrm{h}(\mathrm{x}(t), t)+\varepsilon(t), \varepsilon(t)\sim\mathrm{N}(0, \mathrm{R}(t)), \quad (7)$$

где $\varepsilon(t)$ – ошибка наблюдений с ковариационной матрицей $R(t)$.

Для решения задачи идентификации применяются методы калмановской фильтрации, мультисенсорной фузии и машинного обучения.

Задача краткосрочного прогнозирования состоит в оценке значений параметров потока на горизонте H шагов вперёд:

$$\hat{\mathbf{z}}\left(t+H\right)=\mathcal{F}(\mathbf{z}(t),\mathbf{z}(t-1),\ldots,\mathbf{z}(t-L+1),\mathbf{u}(t),\ldots,\mathbf{u}(t-L+1),\theta), \quad (8)$$

где $\hat{\mathbf{z}}\left(t+H\right)$ – прогнозное значение вектора параметров на момент $t+H$;

L – длина ретроспективного окна (глубина истории);

$\mathbf{u}(t)$ – вектор внешних факторов (погодные условия, календарные особенности, день недели, время суток и др.);

θ – параметры модели прогнозирования (подлежат обучению);

$\mathcal{F}$ – оператор прогнозирования (в общем случае нелинейный).

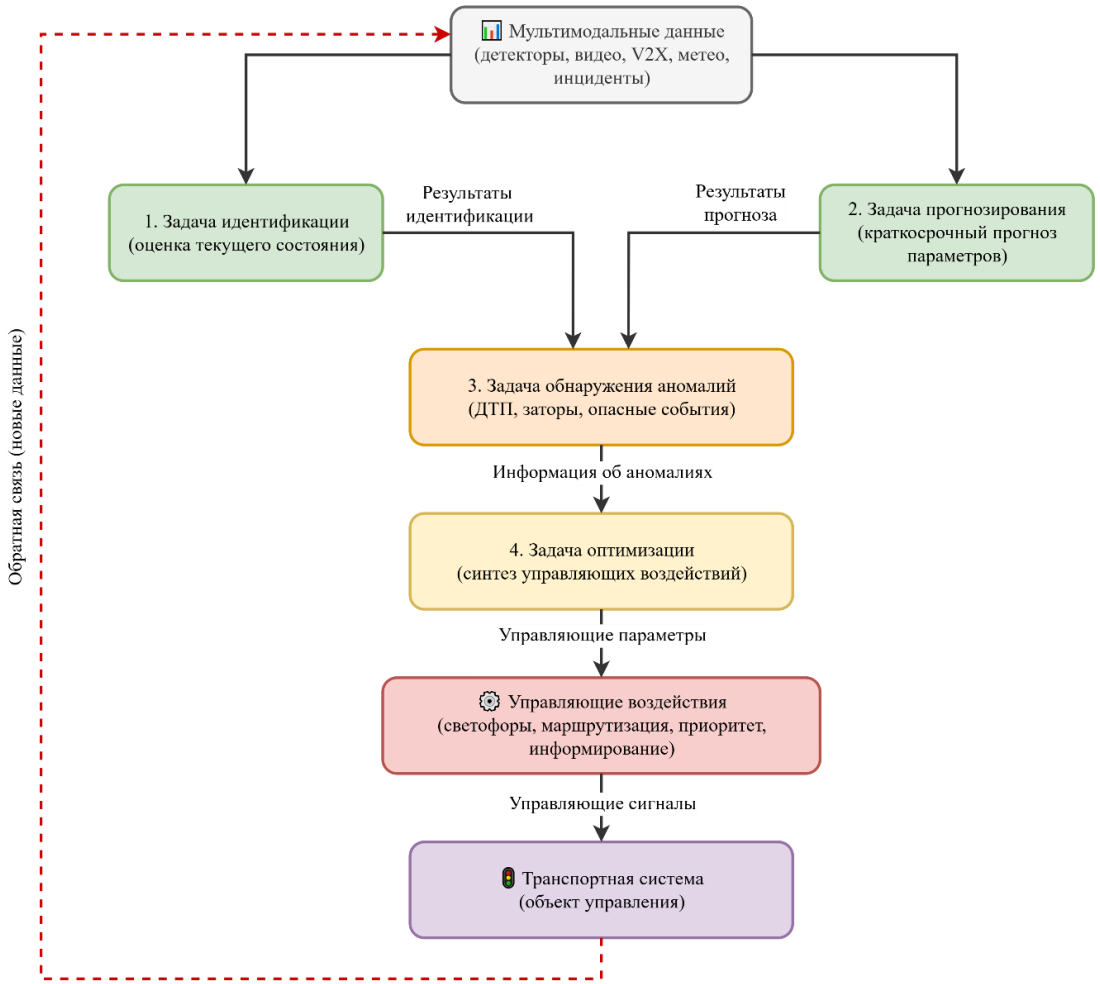


Рис. 7. Взаимосвязь задач системного анализа в управлении транспортной системой (разработано автором)

Задача обнаружения аномалий заключается в определении моментов времени, в которые поведение системы отклоняется от нормального:

$$a(t) = \mathcal{A}(\mathbf{z}(t), \mathbf{z}(t-1), \ldots, \mathbf{z}(t-L+1), \mathbf{I}(t), \mathbf{I}(t-1), \ldots, \mathbf{I}(t-K+1), \boldsymbol{\theta}_\alpha) \quad (9)$$

где $a(t) \in \{0,1\}$ – индикатор аномалии (1 – аномалия обнаружена, 0 – норма);

L и K – длины ретроспективных окон для числовых и визуальных данных соответственно;

$\boldsymbol{\theta}_\alpha$ – параметры модели обнаружения;

$\mathcal{A}$ – оператор обнаружения.

Предлагается гибридный подход, сочетающий статистические методы обнаружения выбросов, изолирующий лес и суррогатные показатели безопасности (TTC, PET, DRAC).

Задача оптимизации управляющих воздействий является центральной в процессе управления. На основе результатов идентификации, прогнозирования и обнаружения аномалий формируются управляющие воздействия. Цель управления состоит в минимизации функционала качества J на горизонте управления H:

$$J = \sum_{k=0}^{H-1} \mathbb{E}_w \left[c\left(\mathbf{x}(t+k), \mathbf{u}(t+k)\right) \right] + \phi\left(\mathbb{E}\left[\mathbf{x}(t+H)\right]\right), \quad (10)$$

где c(x,u) – мгновенная функция затрат (задержки, выбросы, риск и др.);

ϕ – терминальная функция затрат (характеризует состояние системы в конце горизонта);

E_w – математическое ожидание по распределению возмущений w,

при ограничениях на управляющие воздействия и ограничениях безопасности. Оптимизация осуществляется с использованием гибридного критерия (5).

6. Синтез и практическая реализация методологии

Для практического применения разработанной методологии необходимо определить последовательность её реализации в контуре управления дорожным движением. Предлагается следующий алгоритм, интегрирующий все разработанные компоненты.

Разработанные в предыдущих разделах теоретические основы образуют целостную методологию системного анализа дорожного движения в условиях информационной неопределённости. Методология интегрирует четыре взаимосвязанных компонента, каждый из которых является необходимым для практической реализации:

1) Многомерная классификация неопределённости определяет структуру множества Δ в формальной модели и обосновывает выбор методов компенсации для каждого типа неопределённости.

2) Формальная модель включает интегральный показатель $\Upsilon(t)$, который вычисляется в реальном времени и служит основой для адаптивной настройки управления.

3) Гибридный интегральный критерий использует $\Upsilon(t)$ для адаптивной настройки весов $w_i(\Upsilon(t))$ и определения баланса между оптимальностью и робастностью.

4) Методология количественной оценки предоставляет инструментарий для верификации модели и обоснования выбора пороговых значений $\Upsilon(t)$.

Архитектурное единство этих компонентов обеспечивает сквозной учёт неопределённости на всех этапах управления – от сбора данных до реализации управляющих воздействий.

Практическая реализация в контуре управления осуществляется по следующей последовательности шагов:

1) Сбор мультимодальных данных от видеокамер, детекторов и V2X-устройств.

2) Идентификация текущего состояния системы с использованием калмановской фильтрации.

3) Вычисление интегрального показателя неопределённости $\Upsilon(t)$ на основе ковариационной матрицы оценок, метрик качества трекинга и показателей качества сигнала.

4) Адаптивная настройка весов частных критериев $w_i(\Upsilon(t))$: при $\Upsilon(t)\to 0$ веса приближаются к номинальным значениям; при $\Upsilon(t)\to 1$ увеличивается вес критерия безопасности.

5) Краткосрочное прогнозирование параметров потока с построением доверительных интервалов.

6) Обнаружение аномалий с использованием гибридного подхода.

7) Оптимизация управляющих воздействий с использованием гибридного критерия.

8) Реализация управляющих воздействий и мониторинг их исполнения.

Ожидаемые результаты внедрения разработанной методологии (по данным имитационного моделирования и литературных источников):

- снижение средней задержки транспортного средства на перекрёстке на 44–51% по сравнению с фиксированными режимами и на 24–34% по сравнению с адаптивными системами типа SCATS;

- уменьшение выбросов CO_2 на 20%, NO_x на 33%, CO на 30% (прогнозная оценка);
- прогнозное снижение аварийности на 22–39% (экспертная оценка).

Приведённые количественные оценки являются прогнозными и носят оценочный характер.

Предложенная методология создаёт теоретическую основу для построения интеллектуальных систем управления дорожным движением нового поколения, способных эффективно функционировать в условиях комплексной неопределённости, характерной для реальных городских транспортных систем.

Выводы

1. Разработана многомерная классификация источников информационной неопределённости в транспортных системах по природе возникновения (алеаторная, эпистемическая, онтологическая, лингвистическая), месту проявления (входные данные, модель, управление, реализация), уровню управления (стратегический, тактический, оперативный) и степени формализуемости (вероятностная, интервальная, нечёткая, комбинированная). Установлена прямая связь между типом неопределённости и методом её компенсации, что позволяет на этапе проектирования обоснованно выбирать математический аппарат для каждого функционального модуля.

2. Разработана формальная модель интеллектуальной системы управления дорожным движением, учитывающая интегральный показатель уровня неопределённости $\Upsilon(t)$ и адаптивные веса частных критериев $w_i(\Upsilon(t))$. Введено определение ε_{max}-робастности системы, позволяющее количественно оценивать устойчивость управления к информационной неопределённости.

3. Предложен гибридный интегральный критерий эффективности, обобщающий вероятностный и робастный подходы. Критерий позволяет гибко настраивать баланс между оптимальностью и робастностью для каждого частного критерия через коэффициенты $\lambda_i \in [0,1]$.

4. Разработана трехуровневая методология количественной оценки влияния неопределённости на ключевые показатели эффективности, включающая анализ чувствительности (выявление наиболее критичных параметров), метод Монте-Карло (получение распределений выходных показателей) и построение доверительных интервалов. Установлено, что наибольшее влияние на среднюю задержку оказывает неопределённость насыщенного потока (коэффициент чувствительности 1,80) и интенсивности потока (1,35).

5. Выполнена формальная постановка четырёх взаимосвязанных задач системного анализа (идентификация состояния, краткосрочное прогнозирование параметров потока, обнаружение аномалий, оптимизация управляющих воздействий). Предложено рассматривать их как единый замкнутый цикл управления с обратной связью.

6. Разработанная методология создаёт теоретическую основу для построения интеллектуальных систем управления дорожным движением нового поколения, обеспечивающих, по предварительным оценкам, снижение задержек на 44–51%, выбросов на 20–33% и аварийности на 22–39% по сравнению с существующими аналогами.

Результаты работы соответствуют приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации, определённым Указом Президента РФ № 529.

Список литературы

1. Adaptive System Architecture for Intelligent Multimodal Transport: Challenges and Fundamental Design Aspects // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 1298–1324. – DOI: 10.1109/ACCESS.2025.11160689.

2. Almadani, B., Hashem, E., Attar, R. R., et al. Publish/Subscribe-Middleware-Based Intelligent Transportation Systems: Applications and Challenges // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 12. – P. 6449. – DOI: 10.3390/app15126449.

3. Zhou, W., Yang, L., Zhao, L., et al. Vision Technologies with Applications in Traffic Surveillance Systems: A Holistic Survey // ACM Computing Surveys. – 2025. – DOI: 10.1145/3760525.

4. Володарец Н.В., Шевченко С.В. Проактивная диагностика рисков на нерегулируемых пешеходных переходах на основе интеллектуального анализа видеоданных // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2026. – № 1. – С. 8–18.

5. Khan, M. R. K., Mahara, A., Deng, L., Rishe, N. Advances in Smart Traffic Signal Control: A Comprehensive Survey // Preprints. – 2025. – DOI: 10.20944/preprints202510.2199.v1.

6. Michailidis, P., Michailidis, I., Lazaridis, C. R., Kosmatopoulos, E. Traffic Signal Control via Reinforcement Learning: A Review on Applications and Innovations // Infrastructures. – 2025. – Vol. 10, No. 5. – P. 114. – DOI: 10.3390/infrastructures10050114.

7. Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., et al. Review of road traffic control strategies // Proceedings of the IEEE. – 2003. – Vol. 91, No. 12. – P. 2043–2067.

8. Kotsialos A., Papageorgiou M. Motorway network traffic control systems // European Journal of Operational Research. – 2004. – Vol. 152, No. 2. – P. 321–333.

9. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. – Berlin: Springer, 2009. – 265 p.

10. Власов В.М., Приходько В.М., Жанказиев С.В., Иванов А.М. Интеллектуальные транспортные системы в автомобильно-дорожном комплексе. – М.: МАДИ, 2011. – 280 с.

11. Ларин О.Н. Системный анализ и бизнес-планирование в транспортной логистике. – М.: РУТ (МИИТ), 2023. – 240 с.

12. Трофименко Ю.В. Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность в автотранспортном комплексе. – М.: МАДИ, 2020. – 312 с.

13. Xiao, F., Lu, J., Li, L., et al. Advances in reinforcement learning for traffic signal control: a review of recent progress // Intelligent Transportation Infrastructure. – 2025.

14. Xiao, H., Li, H., Wang, Z., et al. Intelligent traffic signal control based on reinforcement learning: a survey // Artificial Intelligence Review. – 2026. – Vol. 59, No. 5. – Article 128.

15. 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.

16. Володарец Н.В., Сацюк А.В. Адаптивная мультимодальная система трекинга БПЛА с динамической оптимизацией на основе стохастического параметрического управления // Информационно-управляющие системы. – 2026. – № 2(141). – С. 72–79. – DOI: 10.31799/1684-8853-2026-2-72-79.

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.

18. Маренич К.Н., Володарец Н.В., Ткачёв С.А., Маренич А.С. Контекстно-семантический траекторный алгоритм выявления аномальных ситуаций в транспортном

потоке по данным видеонаблюдения // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2026. – № 2. – С. 34–51.

References

1. Adaptive System Architecture for Intelligent Multimodal Transport: Challenges and Fundamental Design Aspects // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 1298–1324. – DOI: 10.1109/ACCESS.2025.11160689.

2. Almadani, B., Hashem, E., Attar, R. R., et al. Publish/Subscribe-Middleware-Based Intelligent Transportation Systems: Applications and Challenges // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 12. – P. 6449. – DOI: 10.3390/app15126449.

3. Zhou, W., Yang, L., Zhao, L., et al. Vision Technologies with Applications in Traffic Surveillance Systems: A Holistic Survey // ACM Computing Surveys. – 2025. – DOI: 10.1145/3760525.

4. Volodarets, N.V. and Shevchenko, S.V. (2026), "Proaktivnaya diagnostika riskov na nereguliruemykh peshekhodnykh perekhodakh na osnove intellektual'nogo analiza videodannykh" [Proactive risk diagnostics at uncontrolled pedestrian crossings based on intelligent video data analysis], *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, no. 1, pp. 8–18. (in Russian)

5. Khan, M. R. K., Mahara, A., Deng, L., Rishe, N. Advances in Smart Traffic Signal Control: A Comprehensive Survey // Preprints. – 2025. – DOI: 10.20944/preprints202510.2199.v1.

6. Michailidis, P., Michailidis, I., Lazaridis, C. R., Kosmatopoulos, E. Traffic Signal Control via Reinforcement Learning: A Review on Applications and Innovations // Infrastructures. – 2025. – Vol. 10, No. 5. – P. 114. – DOI: 10.3390/infrastructures10050114.

7. Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., et al. Review of road traffic control strategies // Proceedings of the IEEE. – 2003. – Vol. 91, No. 12. – P. 2043–2067.

8. Kotsialos A., Papageorgiou M. Motorway network traffic control systems // European Journal of Operational Research. – 2004. – Vol. 152, No. 2. – P. 321–333.

9. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. – Berlin: Springer, 2009. – 265 p.

10. Vlasov, V.M., Prikhodko, V.M., Zhankaziev, S.V. and Ivanov, A.M. (2011), *Intellektual'nye transportnye sistemy v avtomobil'no-dorozhnom komplekse* [Intelligent transport systems in the road transport complex], MADI, Moscow, 280 p. (in Russian)

11. Larin, O.N. (2023), *Sistemnyy analiz i biznes-planirovanie v transportnoy logistike* [System analysis and business planning in transport logistics], RUT (MIIT), Moscow, 240 p. (in Russian)

12. Trofimenko, Yu.V. (2020), *Inzhenerno-ekologicheskie innovatsii i kompleksnaya bezopasnost' v avtotransportnom komplekse* [Engineering and environmental innovations and comprehensive safety in the motor transport complex], MADI, Moscow, 312 p. (in Russian)

13. Xiao, F., Lu, J., Li, L., et al. Advances in reinforcement learning for traffic signal control: a review of recent progress // Intelligent Transportation Infrastructure. – 2025.

14. Xiao, H., Li, H., Wang, Z., et al. Intelligent traffic signal control based on reinforcement learning: a survey // Artificial Intelligence Review. – 2026. – Vol. 59, No. 5. – Article 128.

15. 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. (in Russian)

16. Volodarets, N.V. and Satsyuk, A.V. (2026), "Adaptivnaya mul'timodal'naya sistema trekinga BPLA s dinamicheskoy optimizatsiey na osnove stokhasticheskogo parametricheskogo upravleniya" [Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, no. 2(141), pp. 72–79. DOI: 10.31799/1684-8853-2026-2-72-79. (in Russian)

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. (in Russian)

18. Marenich, K.N., Volodarets, N.V., Tkachov, S.A. and Marenich, A.S. (2026), "Kontekstno-semanticheskiy traektornyy algoritm vyyavleniya anomal'nykh situatsiy v transportnom potoke po dannym videonablyudeniya" [Context-semantic trajectory algorithm for detecting anomalous situations in traffic flow using video surveillance data], *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, no. 2, pp. 34–51. (in Russian).

Volodarets N. V.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF TRAFFIC MANAGEMENT UNDER UNCERTAINTY

Abstract. *The article proposes a multidimensional classification of information uncertainty sources in transport systems by the nature of occurrence, location of manifestation, management level and degree of formalizability, distinguished by establishing a direct link between the type of uncertainty and the method of its compensation. Based on the classification, a formal model of an intelligent traffic management system is developed, taking into account the integral uncertainty indicator $\Upsilon(t)$ and adaptive weights of particular criteria. The definition of ε_{max}-robustness of the system is introduced. A hybrid integral efficiency criterion is proposed, generalizing probabilistic and robust approaches. A methodology for quantitative assessment of the uncertainty impact on key performance indicators is developed. A formal statement of four interrelated tasks of system analysis is performed.*

Keywords*: system analysis, information uncertainty, classification, formal model, robustness, hybrid criterion, identification, forecasting.*

Сведения об авторе:	Information about the author:
Володарец Никита Витальевич Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, проректор по научной работе и инновационному развитию, кандидат технических наук, доцент, e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru	**Volodarets Nikita Vitalevich** Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport," Donetsk, Vice-Rector for Research and Innovative Development, PhD in Engineering, Associate Professor, e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru

УДК 629.7 : 681.5 + 06

Пеньков А. С., Костоглотов А. А., Тавунов В. П.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА НА ОСНОВЕ КВАТЕРНИОННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. *В статье рассматривается проблема оценки пространственной ориентации автономных транспортных средств. Существующий расширенный фильтр Калмана с кинематической моделью в углах Эйлера – Крылова имеет ограничения, связанные с возникновением сингулярности при угле тангажа 90°, что приводит к потере устойчивости алгоритма оценки ориентации.*

В качестве решения предлагается использование кватернионной динамической модели вращения, которая устраняет разрывы и сингулярности. Уравнение вращения в кватернионах является билинейным, что обеспечивает вычислительную устойчивость. В работе синтезирован алгоритм расширенного фильтра Калмана на основе кватернионной динамической модели, что позволяет учитывать моменты инерции транспортного средства в уравнениях состояния, обеспечивая тем самым физическую адекватность алгоритма оценки ориентации.

Для реализации алгоритма с использованием устройств цифровой обработки информации выполнена дискретизация уравнений. Проведено математическое моделирование движения цифрового двойника мультироторного беспилотного летательного аппарата, управляемого Pixhawk, с использованием симулятора GAZEBO. Сравнительный анализ показывает, что предложенный алгоритм обеспечивает снижение ошибки оценки крена на 22% и ошибки оценки тангажа на 9% по сравнению с расширенным фильтром Калмана в углах Эйлера – Крылова. Результаты подтверждают эффективность предложенного подхода для оценки ориентации автономных транспортных средств.

Ключевые слова*: расширенный фильтр Калмана, ориентация, кватернион, автономный транспорт, вращение, динамическая модель.*

Постановка задачи

Проблема оценки ориентации объекта в пространстве является фундаментальной для задач высокоточного управления движением. Необходимость непрерывного определения углового положения бортовой платформы возникает в широком классе технических систем: беспилотных летательных аппаратов (обеспечение устойчивости полета) [1,2], морских судов [3,4] (контроль положения при динамическом позиционировании), волномерных буев [5,6] (измерение характеристик морского волнения), автономных подводных транспортных средств [7,8] (навигация в условиях ограниченного доступа к сигналам глобальных спутниковых систем).

Пространственная модель, описывающая эволюцию углового положения, является существенно нелинейной, что обусловлено некоммутативностью конечных поворотов и кинематическими связями между угловыми скоростями и производными углов Эйлера – Крылова. Вследствие этого, вращения по различным осям не могут рассматриваться независимо: изменение одного угла влечет перераспределение влияния угловых скоростей на остальные степени свободы.

Поскольку взаимовлияние степеней свободы в кинематических уравнениях носит перекрестный характер, задача оценки ориентации сводится к проблеме совместного управления тремя угловыми координатами в условиях нелинейных связей. Игнорирование указанных взаимовлияний либо их приближенная линеаризация приводят к накоплению систематических ошибок, что особенно критично при высокодинамичных маневрах объекта и длительных интервалах автономной работы. Именно необходимость строгого учета нелинейной взаимосвязи степеней свободы и определяет актуальность разработки специализированных вычислительных схем.

Анализ последних исследований

Традиционные подходы синтеза фильтров на основе кинематической модели вращения в углах Эйлера – Крылова обладают фундаментальным ограничением, связанным с сингулярностью тангажа ±90°, что приводит к неограниченному росту ошибок и потере устойчивости алгоритма [9].

В последние годы опубликовано большое количество работ, посвященных преодолению указанных ограничений путем использования кватернионного представления ориентации. Основными подходами являются

1. Синтез мультипликативных алгоритмов оценки на базе РФК [10], позволяющих минимизировать ошибку, вызванную нарушением нормы кватерниона на этапе коррекции.

2. Развитие инвариантных фильтров [3], реализующих автоматизированный процесс адаптации ковариационной матрицы шума состояния.

3. Разработка сигма-точечного фильтра Калмана [11] с использованием детерминированной выборки сигма-точек для распространения нелинейностей и частичным ограничением нормы кватерниона, обеспечивающего повышение точности оценки ориентации в условиях зашумленных измерений.

4. Использование альтернативных вычислительно эффективных алгоритмов [12, 13], которые выгодно отличаются сниженным объемом вычислительных затрат для применения в системах с ограниченными ресурсами.

При этом вопрос объективного сравнительного анализа эффективности алгоритмов оценки ориентации в составе систем управления автономными транспортными средствами остается открытым. Большинство обзорных работ [14–17] систематизируют существующие методы оценки ориентации, включая комплементарные фильтры, однако сравнительный анализ эффективности фильтров в идентичных условиях ограничен, что затрудняет обоснованный выбор алгоритма под конкретную прикладную задачу.

Цель работы

Целью работы является анализ эффективности алгоритма оценки пространственной ориентации автономных транспортных средств на основе расширенного фильтра Калмана с кватернионной динамической моделью вращения.

Для достижения цели необходимо решить следующий перечень взаимосвязанных задач:

1. Синтез непрерывного расширенного фильтра Калмана, обеспечивающего корректное разрешение нелинейной взаимосвязи степеней свободы пространственного вращательного движения.

2. Разработка дискретного алгоритма оценки ориентации на основе синтезированного фильтра.

3. Математическое моделирование и анализ эффективности предложенного алгоритма с использованием данных, полученных в среде симуляции выполнения полетного задания цифровым двойником мультироторного автономного транспортного средства.

Основная часть

1 Синтез непрерывного расширенного фильтра Калмана

В основе классической формулировки фильтра Калмана лежит предположение о том, что эволюция вектора состояния может быть описана линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Однако данное допущение справедливо лишь в узком диапазоне режимов движения, в которых угловые скорости отсутствуют или пренебрежимо малы, что приводит к расхождению оценок при возникновении маневра [18].

Применение расширенного фильтра Калмана (РФК) [19] позволяет использовать нелинейные модели вращения путем линеаризации на каждом шаге относительно текущей оценки для учета перекрестных связей между степенями свободы [20–22].

В общем виде нелинейная система описывается уравнением состояния:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}\left[\mathbf{x}(t), t\right] + \mathbf{G}\left[\mathbf{x}(t), t\right]\mathbf{w}(t). \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния,

$\mathbf{f}\left[\mathbf{x}(t), t\right]$ – переходная вектор-функция состояния,

$\mathbf{G}\left[\mathbf{x}(t), t\right]$ – матрица возмущения,

$\mathbf{w}(t)$ – вектор шума возмущения.

Связь измеряемых величин с вектором состояния задаётся уравнением наблюдений:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{h}\left[\mathbf{x}(t), t\right] + \mathbf{v}(t).$$

где $\mathbf{z}(t)$ – вектор наблюдения,

$\mathbf{h}\left[\mathbf{x}(t), t\right]$ – вектор-функция наблюдения,

$\mathbf{v}(t)$ – вектор ошибок наблюдения.

Вектор состояния в начальный момент времени распределён по гауссовскому закону с параметрами

$$\mathbf{M}\left\{\mathbf{x}(t_0)\right\} = \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{x}_0}, \mathbf{D}\left\{\mathbf{x}(t_0)\right\} = \mathbf{V}_{\mathbf{x}_0}.$$

Шумы состояния и наблюдения принимаются некоррелированными во времени с нулевыми математическими ожиданиями:

$$\mathbf{M}\left\{\mathbf{w}(t)\right\} = \mathbf{M}\left\{\mathbf{v}(t)\right\} = 0,$$

а их интенсивности задаются ковариационными матрицами

$$\mathrm{R}\left\{\mathbf{w}(t), \mathbf{w}(\boldsymbol{\tau})\right\} = \boldsymbol{\Psi}_{\mathbf{W}}(t)\delta_{\mathbf{D}}(t - \boldsymbol{\tau}),$$

$$\mathrm{R}\left\{\mathbf{v}(t), \mathbf{v}(\boldsymbol{\tau})\right\} = \boldsymbol{\Psi}_{\mathbf{V}}(t)\delta_{\mathbf{D}}(t - \boldsymbol{\tau}).$$

где $\mathbf{\Psi_w}$ – ковариационная матрица шума состояния,

$\mathbf{\Psi_v}$ – ковариационная матрица шума наблюдения,

$\delta_D(t-\boldsymbol{\tau})$ – дельта-функция.

Дифференциальное уравнение для оценки состояния записывается в форме

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t)=\mathbf{f}\left[\hat{x}(t),t\right]+\mathbf{P}(t)\frac{\partial\mathbf{h}^{\mathrm{T}}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]}{\partial\hat{\mathbf{x}}(t)}\mathbf{\Psi}_{\mathbf{v}}^{-1}(t)\left\{\mathbf{z}(t)-\mathbf{h}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]\right\},$$

где $\mathbf{P}(t)$ – ковариационная матрица ошибок оценки.

Эволюция ковариационной матрицы ошибок оценивания описывается уравнением Риккати:

$$\dot{\mathbf{P}}(t)=\mathbf{G}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]\mathbf{\Psi}_{\mathbf{w}}(t)\mathbf{G}^{\mathrm{T}}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]+\mathbf{P}(t)\frac{\partial\mathbf{f}^{\mathrm{T}}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]}{\partial\hat{\mathbf{x}}(t)}+\frac{\partial\mathbf{f}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]}{\partial\hat{\mathbf{x}}(t)}\mathbf{P}(t)-$$

$$-\mathbf{P}(t)\frac{\partial}{\partial\hat{\mathbf{x}}(t)}\left[\frac{\partial\mathbf{h}^{\mathrm{T}}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]}{\partial\hat{\mathbf{x}}(t)}\mathbf{\Psi}_{\mathbf{v}}^{-1}(t)\left\{\mathbf{z}(t)-\mathbf{h}\left[\hat{\mathbf{x}}(t),t\right]\right\}\right]\mathbf{P}(t).$$

В качестве одной из возможных реализаций РФК рассмотрим постановку задачи оценки, в которой ориентация описывается углами Эйлера–Крылова [23, 24]. В таком случае кинематические соотношения

$$\begin{cases}\dot{\psi}=\dfrac{1}{\cos\theta}\left[\omega_Y^{отн}\cos\gamma-\omega_Z^{отн}\sin\gamma\right],\\ \dot{\theta}=\omega_Y^{отн}\sin\gamma+\omega_Z^{отн}\cos\gamma,\\ \dot{\gamma}=\omega_X^{отн}-tg\theta\left[\omega_Y^{отн}\cos\gamma-\omega_Z^{отн}\sin\gamma\right],\end{cases}\qquad(2)$$

дополняются динамическими уравнениями Эйлера для твёрдого тела:

$$\begin{cases}\dot{\omega}_X^{отн}=I_X^{-1}\left(I_Y-I_Z\right)\omega_Y^{отн}\omega_Z^{отн},\\ \dot{\omega}_Y^{отн}=I_Y^{-1}\left(I_Z-I_X\right)\omega_Z^{отн}\omega_X^{отн},\\ \dot{\omega}_Z^{отн}=I_Z^{-1}\left(I_X-I_Y\right)\omega_X^{отн}\omega_Y^{отн},\end{cases}\qquad(3)$$

где ψ,θ,γ – тангаж, крен, курс соответственно в инерциальной (Земной) системе координат,

$\omega_X^{отн},\omega_Y^{отн},\omega_Z^{отн}$ – проекции абсолютной угловой скорости на оси связанной системы координат,

I_X, I_Y, I_Z – моменты инерции.

На основе (2)–(3) формируются вектор-функция перехода состояний

$$\mathbf{f}\left(\mathbf{x}(t),t\right)=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{\cos x_2}\left[x_5\cos x_3-x_6\sin x_3\right]\\ x_5\sin x_3+x_6\cos x_3\\ x_4-tgx_2\left[x_5\cos x_3-x_6\sin x_3\right]\\ I_X^{-1}\left(I_Y-I_Z\right)x_5x_6\\ I_Y^{-1}\left(I_Z-I_X\right)x_4x_6\\ I_Z^{-1}\left(I_X-I_Y\right)x_4x_5\end{bmatrix},$$

и матрица возмущений

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix}\gamma_{w\psi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \gamma_{w\theta} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \gamma_{w\gamma} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_X^{отн}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Y^{отн}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Z^{отн}}\end{bmatrix},$$

где $\mathbf{x}(t)=\left[x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6,\right]^T=\left[\psi,\theta,\gamma,\omega_X^{отн},\omega_Y^{отн},\omega_Z^{отн}\right]^T$ – вектор состояния.

В качестве измерительной системы рассматривается трёхосный гироскоп, формирующий наблюдения угловой скорости в связанной системе координат. Уравнение измерений в этом случае

$$\mathbf{z}(t)=\mathbf{H}\mathbf{x}(t)+\mathbf{v}(t), \tag{4}$$

где $\mathbf{H}=\begin{bmatrix}0&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0&1\end{bmatrix}$ – матрица наблюдения,

$\mathbf{v}(t)=\begin{bmatrix}v_{\omega_X^{отн}} & v_{\omega_Y^{отн}} & v_{\omega_Z^{отн}}\end{bmatrix}^T$ – вектор погрешностей гироскопов с ковариационной матрицей $\mathbf{\Psi_v}$ размерности 3×3.

Однако применение РФК с моделью в углах Эйлера–Крылова накладывает ограничения, связанные с динамикой объекта [25]. Поскольку линеаризация справедлива лишь при малых отклонениях между истинным и оцениваемым состояниями. В высокоманевренных объектах (беспилотные летательные аппараты, совершающие пилотажные маневры; подводные транспортные средства с интенсивными поворотами; волномерные буи в штормовом море) применение такого подхода приводит к возникновению существенных ошибок. Кроме того, кинематическая модель в углах Эйлера–Крылова обладает сингулярностью: вырождение матрицы пересчета при тангаже, равном 90°, приводит к неограниченному росту компонент ковариационной матрицы и потере устойчивости алгоритма оценивания.

Универсальным вариантом является применение модели в кватернионах [26, 27]. Кватернионное представление ориентации позволяет описывать вращательное движение без разрывов и сингулярностей, присущих углам Эйлера–Крылова. Кинематическое уравнение в кватернионах является билинейным, что обеспечивает его вычислительную устойчивость во всем диапазоне возможных угловых положений объекта

$$2\dot{\mathbf{\Lambda}}=\mathbf{\Omega}(\omega)\circ\mathbf{\Lambda}, \tag{5}$$

где $\mathbf{\Lambda}=\left(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4\right)$ – нормированный кватернион ориентации, удовлетворяющий условию $\|\mathbf{\Lambda}\|=1$,

$\mathbf{\Omega}=\left(0,\omega_X^{отн},\omega_Y^{отн},\omega_Z^{отн}\right)$ – кватернион абсолютной угловой скорости, заданный в проекциях на оси связанной системы координат.

Компоненты кватерниона $\mathbf{\Lambda}$ выражаются через углы Эйлера–Крылова ψ,θ,γ:

$$\lambda_1 = \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) - \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right),$$

$$\lambda_2 = \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right),$$

$$\lambda_3 = \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right),$$

$$\lambda_4 = \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) - \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right).,$$

Обозначив вектор состояния

$$\mathbf{x}(t) = \left[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\right] = \left[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \omega_X^{отн}, \omega_Y^{отн}, \omega_Z^{отн}\right]^T,$$

и, раскрывая (5) покомпонентно, с учетом (1) получаем систему

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} -0.5x_2x_5 - 0.5x_3x_6 - 0.5x_4x_7 \\ 0.5x_1x_5 - 0.5x_4x_6 + 0.5x_3x_7 \\ 0.5x_4x_5 + 0.5x_1x_6 - 0.5x_2x_7 \\ 0.5x_2x_6 - 0.5x_3x_5 + 0.5x_1x_7 \\ I_X^{-1}\left(I_Y - I_Z\right)x_6x_7 \\ I_Y^{-1}\left(I_Z - I_X\right)x_5x_7 \\ I_Z^{-1}\left(I_X - I_Y\right)x_5x_6 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \gamma_{w\lambda_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{w\lambda_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{w\lambda_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\lambda_4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_X^{отн}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Y^{отн}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Z^{отн}} \end{bmatrix} \mathbf{w}(t). \qquad (6)$$

Уравнение наблюдения (4) в кватернионной постановке остаётся неизменным с учетом $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

2. Разработка дискретного алгоритма оценки ориентации

Рассмотрим простейший вариант реализации алгоритма оценки ориентации на основе аддитивного РФК с применением цифровой ЭВМ. Переход от непрерывной модели (6) к дискретной производится стандартным методом при фиксированном шаге $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Тогда уравнение состояния принимает вид

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{\Phi}\left(\mathbf{x}_i\right) + \mathbf{\Gamma}_i\mathbf{w}_i, \qquad (7)$$

где $\mathbf{w}_i$ – дискретный белый гауссовский шум состояния с ковариационной матрицей $\mathbf{Q}$.

Аппроксимируя производную конечно-разностным методом, получаем следующие выражения для дискретной переходной функции $\mathbf{\Phi}$ и матрицы возмущения $\mathbf{\Gamma}$ определяются как

$$\mathbf{\Phi}\left(\mathbf{x}_i\right)=\mathbf{x}_i+\Delta t\cdot\mathbf{f}\left[\mathbf{x}\left(t\right),t\right] \tag{8}$$

$$\mathbf{\Phi}_{\mathbf{Q}}(\mathbf{x}_i)=\begin{bmatrix} x_{1,i}+\left(-0.5x_{2,i}x_{5,i}-0.5x_{3,i}x_{6,i}-0.5x_{4,i}x_{7,i}\right)\Delta t \\ x_{2,i}+\left(0.5x_{1,i}x_{5,i}-0.5x_{4,i}x_{6,i}+0.5x_{3,i}x_{7,i}\right)\Delta t \\ x_{3,i}+\left(0.5x_{4,i}x_{5,i}+0.5x_{1,i}x_{6,i}-0.5x_{2,i}x_{7,i}\right)\Delta t \\ x_{4,i}+\left(0.5x_{2,i}x_{6,i}-0.5x_{3,i}x_{5,i}+0.5x_{1,i}x_{7,i}\right)\Delta t \\ x_{5,i}+I_X^{-1}\left(I_Y-I_Z\right)x_6x_7\Delta t \\ x_{6,i}+I_Y^{-1}\left(I_Z-I_X\right)x_5x_7\Delta t \\ x_{7,i}+I_Z^{-1}\left(I_X-I_Y\right)x_5x_6\Delta t \end{bmatrix}, \tag{9}$$

$$\mathbf{\Gamma}=\Delta t\cdot\begin{bmatrix} \gamma_{w\lambda_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{w\lambda_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{w\lambda_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\lambda_4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_X^{отн}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Y^{отн}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Z^{отн}} \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Используя ту же процедуру дискретизации для модели (2) – (3), получаем следующие выражения

$$\mathbf{\Phi}_{\psi\theta\gamma}(\mathbf{x}_i)=\begin{bmatrix} x_{1,i}+\dfrac{x_{5,i}\cos x_{3,i}-x_{6,i}\sin x_{3,i}}{\cos x_{2,i}}\Delta t \\ x_{2,i}+\left(x_{5,i}\sin x_{3,i}+x_{6,i}\cos x_{3,i}\right)\Delta t \\ x_{3,i}+\left(x_{1,i}-tgx_{2,i}\left(x_{5,i}\cos x_{3,i}-x_{6,i}\sin x_{3,i}\right)\right)\Delta t \\ x_{4,i}+I_X^{-1}\left(I_Y-I_Z\right)x_5x_6\Delta t \\ x_{5,i}+I_Y^{-1}\left(I_Z-I_X\right)x_4x_6\Delta t \\ x_{6,i}+I_Z^{-1}\left(I_X-I_Y\right)x_4x_5\Delta t \end{bmatrix}, \tag{11}$$

$$\mathbf{\Gamma}=\Delta t\cdot\begin{bmatrix} \gamma_{w\psi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{w\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{w\gamma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_X^{отн}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Y^{отн}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{w\omega_Z^{отн}} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

где $\mathbf{x}_i=\left[\psi_i \quad \theta_i \quad \gamma_i \quad \omega_{X,i}^{отн} \quad \omega_{Y,i}^{отн} \quad \omega_{Z,i}^{отн}\right]^T$ –дискретный вектор состояния,

Дискретное уравнение наблюдений записывается аналогично непрерывному случаю:

$$\mathbf{z}_i=\mathbf{H}\mathbf{x}_i+\mathbf{v}_i,$$

где $\mathbf{z}_i = \begin{bmatrix} z_{\omega_{X,i}^{отн}} & z_{\omega_{Y,i}^{отн}} & z_{\omega_{Z,i}^{отн}} \end{bmatrix}$ – дискретный вектор наблюдения.

$\mathbf{v}_i$ – дискретный вектор шума наблюдения с ковариационной матрицей $\mathbf{R} = \mathrm{diag}\left[\sigma^2_{v\omega_X}, \sigma^2_{v\omega_Y}, \sigma^2_{v\omega_Z}\right]$,

$$\mathbf{H_Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$ – для модели в кватернионах,

$$\mathbf{H}_{\psi\theta\gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$ – для модели в углах Эйлера-Крылова.

На каждом шаге алгоритма сначала вычисляется экстраполированная оценка:

$$\hat{\mathbf{x}}_{i+1|i} = \mathbf{\Phi}(\mathbf{x}_i).$$

Затем выполняется коррекция прогноза по результатам текущего измерения:

$$\hat{\mathbf{x}}_{i+1} = \hat{\mathbf{x}}_{i+1|i} + \mathbf{P}_{i+1}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\left\{\mathbf{z}_{i+1} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{i+1|i}\right\},$$

где $\mathbf{P}_{i+1} = \mathbf{P}_{i+1|i} - \mathbf{P}_{i+1|i}\mathbf{H}^T\left(\mathbf{H}\mathbf{P}_{i+1|i}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}\right)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{P}_{i+1|i}$, – ковариационная матрица ошибок оценки, вычисляемая на основе априорной ковариационной матрицы экстраполяции

$$\mathbf{P}_{i+1|i} = \mathbf{\Gamma}\mathbf{Q}\mathbf{\Gamma}^T + \frac{\partial\mathbf{\Phi}(\mathbf{x}_i)}{\partial\mathbf{x}_i}\mathbf{P}_i\frac{\partial\mathbf{\Phi}(\mathbf{x}_i)}{\partial\mathbf{x}_i}^T.$$

3 Математическое моделирование и анализ эффективности

В рамках работы проведено математическое моделирование полученного алгоритма расширенного фильтра Калмана при оценке угловой ориентации цифрового двойника автономного транспортного средства мультироторного типа (UAV), оборудованного трехосевым гироскопом под управлением открытого программного обеспечения Pixhawk (основные характеристики приведены в таблице 1).

Таблица 1

Характеристики цифрового двойника UAV

Масса	1.35 кг
Момент инерции по оси крена	$4.2\cdot10^{-3}$ кг·м²
Момент инерции по оси тангажа	$4.2\cdot10^{-3}$ кг·м²
Момент инерции по оси рыскания	$7.9\cdot10^{-3}$ кг·м²
Период поступления измерительных данных	0.01 с
Модель гироскопа	L3G4200D
Спектральная плотность шума гироскопа	$0.03\ °/с/\sqrt{Гц}$

UAV осуществлял движение по траектории, приведенной на рисунке 1.

Для проведения сравнительного анализа рассмотрены два варианта РФК, определяемые матрицами (11), (12) и (9), (10) с коррекцией нормы кватерниона на каждой итерации в соответствии с выражением

$$\begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_{1,i+1} \\ \tilde{\lambda}_{2,i+1} \\ \tilde{\lambda}_{3,i+1} \\ \tilde{\lambda}_{4,i+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{1,i+1}^2 + \lambda_{2,i+1}^2 + \lambda_{3,i+1}^2 + \lambda_{4,i+1}^2}} \begin{bmatrix} \lambda_{1,i+1} \\ \lambda_{2,i+1} \\ \lambda_{3,i+1} \\ \lambda_{4,i+1} \end{bmatrix},$$

где $\tilde{\lambda}_{1...4}$ – компоненты нормированного кватерниона $\mathbf{\Lambda}$.

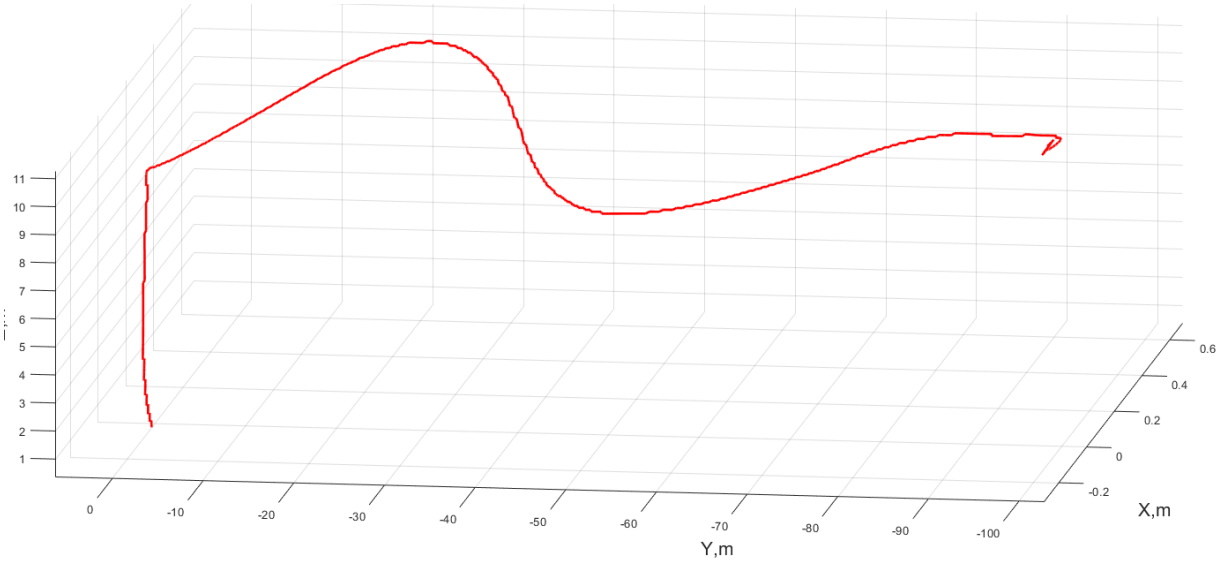


Рис. 1. Траектория движения цифрового двойника UAV

Значения компонент ковариационной матрицы **Q** определялись итерационно по результатам предварительного моделирования путем минимизации СКО оценок на тестовых траекториях:

- для модели в кватернионах

$$\mathbf{Q}_{\Lambda} = \mathrm{diag}\left[Q_{11},\, Q_{22},\, Q_{33},\, Q_{44},\, Q_{55},\, Q_{66},\, Q_{77}\right],$$

где $Q_{11} = Q_{22} = Q_{33} = Q_{44} = 1 \cdot 10^{-6}$,

$Q_{55} = Q_{66} = Q_{77} = 0.1$;

- для модели в углах Эйлера-Крылова

$$\mathbf{Q}_{E} = \mathrm{diag}\left[Q_{11},\, Q_{22},\, Q_{33},\, Q_{44},\, Q_{55},\, Q_{66}\right],$$

где $Q_{11} = Q_{22} = Q_{33} = 1 \cdot 10^{-3}$,

$Q_{44} = Q_{55} = Q_{66} = 0.1$.

Ковариационная матрица **R** определяется точностными характеристиками используемого на цифровом двойнике гироскопа (L3G4200D) и в обоих случаях имеет вид

$$\mathbf{R} = \mathrm{diag}\left[3 \cdot 10^{-5},\, 3 \cdot 10^{-5},\, 3 \cdot 10^{-5}\right].$$

Критерием эффективности принято СКО отклонения оценок от эталона, полученного в среде симулятора GAZEBO.

Пример одного прогона моделирования на отрезке траектории в виде абсолютных отклонений оценок от эталона, представлены на рисунках 2 – 3.

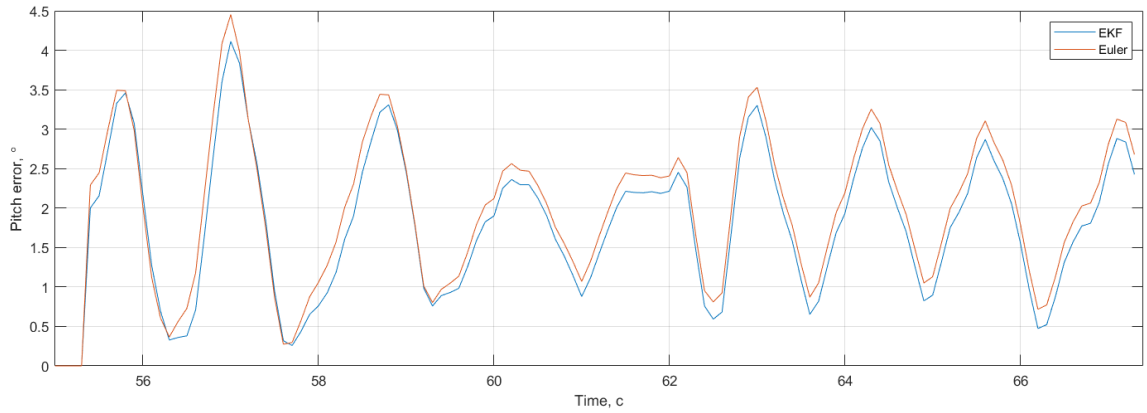


Рис. 2. Отклонения оценок фильтров по тангажу

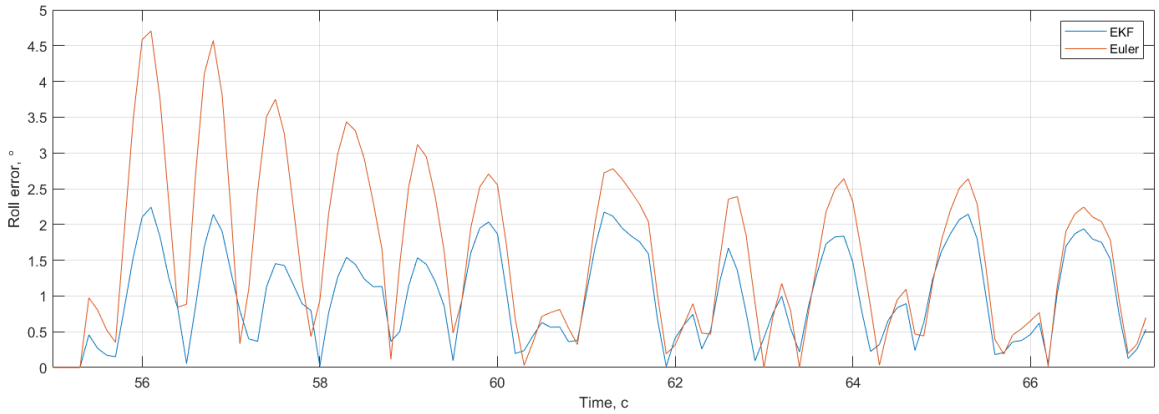


Рис. 3. Отклонения оценок фильтров по крену

На рассмотренном интервале усредненные значения СКО сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Усредненные результаты статистического моделирования

	РФК в углах Эйлера-Крылова	РФК в кватернионах	Повышение точности оценки
СКО оценки крена	1.51º	1.13º	22%
СКО оценки тангажа	2.05º	1.85º	9%

Анализ вычислительной сложности без дополнительной вычислительной оптимизации показал, что реализация одного такта работы алгоритма на базе динамической модели в кватернионах требует выполнения около 1700 операций с плавающей точкой, что на 26% выше, чем вычислительные затраты на один такт работы алгоритма в углах Эйлера-Крылова (около 1350 операций). Однако, с учетом производительности контроллеров Pixhawk, время вычисления любого из приведенных алгоритмов составит не более 110 мкс, что при периоде дискретизации в 10 мс обеспечивает практическую реализуемость в системах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Выводы

1. Алгоритм расширенного фильтра Калмана на основе кватернионной динамической модели обеспечивает повышение точности оценки угловой ориентации в условиях пространственного движения UAV при значительном отклонении углов тангажа/крена, достигающих 28º.

2. Полученные результаты подтверждаются проведенным компьютерным моделированием с применением симулятора GAZEBO.

Список литературы

1. OERI: An Orientation Estimation-based Rotation-Invariant Matching Method for UAV Navigation / L. Jianli, X. Feng, J. Liu, J. Chen. – DOI 10.1109/LGRS.2025.3530411. – Текст : непосредственный // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2025. – 99 с.

2. UAV Flight Orientation and Height Influence on Tree Crown Segmentation in Agroforestry Systems / J.R. Baselly Villanueva, A. Moraes, A.O. de Almeida [и др.]. – DOI 10.3390/f17010087. – Текст : непосредственный // Forests. – 2026. – Т. 17. – № 1. – С. 87.

3. Benham, D. Invariant Extended Kalman Filter for Autonomous Surface Vessels with Partial Orientation Measurements / D. Benham, E. Potokar, J. Mangelson. – DOI 10.48550/arXiv.2506.10850. – Текст : электронный ; arXiv:2506.10850, 2025. – URL: https://arxiv.org/pdf/2506.10850 (дата обращения: 30.06.2026).

4. Field measurements of angular motions of a vessel at berth: Inertial device application / A. Figuero, M. Candeloro, A.J. Sorensen [и др.]. – Текст : непосредственный // Control Engineering and Applied Informatics. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 79–88.

5. Estimating waves via measured ship responses / U.D. Nielsen, A.H. Brodtkorb, K.T. Borup [и др.]. – DOI 10.1038/s41598-023-44552-2. – Текст : непосредственный // Scientific Reports. – 2023. – Т. 13. – № 1. – С. 17342.

6. Yurovsky, Y.Y. Methods and Errors of Wave Measurements Using Conventional Inertial Motion Units / Y.Y. Yurovsky, O.B. Kudinov. – Текст : непосредственный // Physical Oceanography. – Севастополь : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН». – 2025. – Т. 32. – № 1. – С. 63–83.

7. State estimation of an underwater robot using visual and inertial information / F. Shkurti, I. Rekleitis, G. Dudek [и др.]. – DOI 10.1109/IROS.2011.6048793. – Текст : непосредственный // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2011. – С. 5054–5060.

8. Choi, J. Study on the Development of the Maneuvering Mathematical Model Considering the Large Angle Motion of Submarine / J. Choi, S. Lee, J. Ahn. – DOI 10.26748/KSOE.2023.008. – Текст : непосредственный // Journal of Ocean Engineering and Technology. – 2023. – Т. 37. – С. 81–88.

9. A novel adaptive Kalman filter for Euler angle based MEMS IMU/magnetometer attitude estimation / Q. Zhou, Y. Wang, H. Zhang [и др.]. – DOI 10.1088/1361-6501/abcefa. – Текст : непосредственный // Measurement Science and Technology. – 2021. – Т. 32. – № 4.

10. Li, F. MEKF With Navigation Frame Attitude Error Parameterization for INS/GPS / F. Li, L. Chang. – DOI 10.1109/JSEN.2019.2947456. – Текст : непосредственный // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 1536–1549.

11. Robust Unscented Kalman Filtering via Recurrent Meta-Adaptation of Sigma-Point Weights / K. Majewski, Z. Li, X. Wang [и др.]. – DOI 10.48550/arXiv.2603.04360. – Текст : электронный : arXiv:2603.04360, 2026. – URL: https://arxiv.org/abs/2603.04360v1 (дата обращения: 30.06.2026).

12. Madgwick S.O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays / S.O.H. Madgwick. – 2010. – 32 с.

13. Mahony, R. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group / R. Mahony, T. Hamel, J.-M. Pflimlin. – DOI 10.1109/TAC.2008.923738. – Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2008. – Т. 53. – № 5. – С. 1203–1218.

14. Пономарева, М.А. Сравнение алгоритмов определения ориентации космического аппарата на основе одномоментных измерений / М.А. Пономарева, А.В.

Крамлих. – DOI 10.17586/0021-3454-2025-68-1-89-97. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2025. – Т. 68. – № 1. – С. 89–97.

15. Ву, Ю. Определение угловой ориентации в БИНС: сравнение традиционных подходов и метода функционального итеративного интегрирования / Ю. Ву, Ю.А. Литманович. – DOI 10.17285/0869-7035.0047. – Текст : непосредственный // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28. – № 4 (111). – С. 16–36.

16. Исса, М. Оценка ориентации с помощью слияния инерциальных данных на основе нелинейных фильтров (Махони и Мэджвик) / М. Исса, А. Ахмад. – Текст : непосредственный // Вестник науки. – 2024. – Т. 1. – № 11 (80). – С. 871–883.

17. Контарев, И. В. Интеллектуализация фильтров Калмана для повышения автономности и точности навигационных систем беспилотных летательных аппаратов / И.В. Контарев, В.В. Белик. – DOI 10.23947/2541-9129-2026-10-2-152-165. – Текст : непосредственный // Безопасность техногенных и природных систем. – 2026. – Т. 10. – № 2. – С. 152–165.

18. Сейдж, Э. П. Идентификация систем управления / Э.П. Сейдж, Дж.Л. Мелса. — М.: Наука, 1974. – 248 с.

19. Post-Processing Kalman Filter Application for Improving Cooperative Awareness Messages' Position Data Accuracy / M. Bauden, M. Mäkitalo, R. Ghabcheloo [и др.]. – DOI 10.3390/s24247892. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2024. – Т. 24. – № 24. – С. 78–92.

20. An integrated deep ensemble-unscented Kalman filter for sideslip angle estimation with sensor filtering network / D. Kim, S. Lee, J. Park [и др.]. – DOI 10.1109/ACCESS.2021.3125351 // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 149681–149689.

21. Sabatini, A. M. Kalman-Filter-Based Orientation Determination Using Inertial/Magnetic Sensors: Observability Analysis and Performance Evaluation / A.M. Sabatini. – DOI 10.3390/s111009182 // Sensors. – 2011. – Т. 11, № 10. – С. 9182–9206.

22. Челноков, Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные методы и регулярные модели аналитической механики (обзор). – DOI 10.31857/S0032823523040033 / Ю. Н. Челноков // Прикладная математика и механика. – 2023. – Т. 87. – №4. – С. 519–556.

23. Conway, R. Introduction to Rotations in Three Dimensions for Engineers and Scientists / R. Conway. – DOI 10.1007/978-3-032-05014-4. – Cham : Springer, 2026. – 347 с. – ISBN 978-3-032-05013-7. – Текст : непосредственный.

24. Are Euler angles a useful rotation parameterisation for pose estimation with Normalizing Flows? / G. Sfikas, G. Kordopatis-Zilos, I. Kompatsiaris [и др.]. – DOI 10.48550/arXiv.2511.02277. – Текст : непосредственный : arXiv:2511.02277, 2025. – URL: https://arxiv.org/pdf/2511.02277 (дата обращения: 30.06.2026).

25. Lee, C.J. Analytical Formulation of Relationship Between Sensors and Euler Angle Errors for Arbitrary Stationary Alignment Based on Accelerometer and Magnetometer / C.J. Lee, J. Lee. – DOI 10.3390/s25082593. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2025. – Т. 25. – №8. – С. 2593.

26. Valenti, R.G. A linear Kalman filter for MARG orientation estimation using the algebraic quaternion algorithm / R.G. Valenti, I. Dryanovski, J. Xiao. – DOI 10.1109/TIM.2015.2498998. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2016. – Т. 65. – № 2. – С. 467–481.

27. Generalized linear quaternion complementary filter for attitude estimation from multisensor observations: An optimization approach / J.-K. Wu, H.-B. Li, Z.-X. Li [и др.]. – DOI 10.1109/TASE.2018.2888908. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 1330–1343.

References

1. Jianli L., Feng X., Liu J., Chen J. OERI: An Orientation Estimation-based Rotation-Invariant Matching Method for UAV Navigation. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2025, vol. 22, pp. 1–5.

2. Baselly Villanueva J.R., Moraes A., de Almeida A.O., et al. UAV Flight Orientation and Height Influence on Tree Crown Segmentation in Agroforestry Systems. Forests, 2026, vol. 17, no. 1, p. 87.

3. Benham D., Potokar E., Mangelson J. Invariant Extended Kalman Filter for Autonomous Surface Vessels with Partial Orientation Measurements. arXiv:2506.10850, 2025. Available at: https://arxiv.org/pdf/2506.10850 (accessed 30 June 2026).

4. Figuero A., Candeloro M., Sorensen A.J., et al. Field measurements of angular motions of a vessel at berth: Inertial device application. Control Engineering and Applied Informatics, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 79–88.

5. Nielsen U.D., Brodtkorb A.H., Borup K.T., et al. Estimating waves via measured ship responses. Scientific Reports, 2023, vol. 13, no. 1, p. 17342.

6. Yurovsky Y.Y., Kudinov O.B. Methods and Errors of Wave Measurements Using Conventional Inertial Motion Units. Physical Oceanography, 2025, vol. 32, no. 1, pp. 63–83.

7. Shkurti F., Rekleitis I., Dudek G., et al. State estimation of an underwater robot using visual and inertial information. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011, pp. 5054–5060.

8. Choi J., Lee S., Ahn J. Study on the Development of the Maneuvering Mathematical Model Considering the Large Angle Motion of Submarine. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2023, vol. 37, pp. 81–88.

9. Zhou Q., Wang Y., Zhang H., et al. A novel adaptive Kalman filter for Euler angle based MEMS IMU/magnetometer attitude estimation. Measurement Science and Technology, 2021, vol. 32, no. 4.

10. Li F., Chang L. MEKF With Navigation Frame Attitude Error Parameterization for INS/GPS. IEEE Sensors Journal, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 1536–1549.

11. Majewski K., Li Z., Wang X., et al. Robust Unscented Kalman Filtering via Recurrent Meta-Adaptation of Sigma-Point Weights. arXiv:2603.04360, 2026. Available at: https://arxiv.org/abs/2603.04360v1 (accessed 30 June 2026).

12. Madgwick S.O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, 2010, 32 p.

13. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, vol. 53, no. 5, pp. 1203–1218.

14. Ponomareva M.A., Kramlikh A.V. Comparison of algorithms for spacecraft orientation determination based on single-measurement observations. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie [Journal of Instrument Engineering], 2025, vol. 68, no. 1, pp. 89–97 (in Russian).

15. Vu Yu., Litmanovich Yu.A. Determination of angular orientation in SINS: comparison of traditional approaches and the functional iterative integration method. Giroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation], 2020, vol. 28, no. 4 (111), pp. 16–36 (in Russian).

16. Issa M., Ahmad A. Orientation estimation using inertial data fusion based on nonlinear filters (Mahony and Madgwick). Vestnik nauki [Bulletin of Science], 2024, vol. 1, no. 11 (80), pp. 871–883 (in Russian).

17. Kontarev I.V., Belik V.V. Intellectualization of Kalman filters to improve the autonomy and accuracy of unmanned aerial vehicle navigation systems. Bezopasnost'

tekhnogennykh i prirodnykh sistem [Safety of Technogenic and Natural Systems], 2026, vol. 10, no. 2, pp. 152–165 (in Russian).

18. Sage A.P., Melsa J.L. Identification of Systems Control. Moscow: Nauka, 1974, 248 p. (in Russian).

19. Bauden M., Mäkitalo M., Ghabcheloo R., et al. Post-Processing Kalman Filter Application for Improving Cooperative Awareness Messages' Position Data Accuracy. Sensors, 2024, vol. 24, no. 24, pp. 78–92.

20. Kim D., Lee S., Park J., et al. An integrated deep ensemble-unscented Kalman filter for sideslip angle estimation with sensor filtering network. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 149681–149689.

21. Sabatini A.M. Kalman-Filter-Based Orientation Determination Using Inertial/Magnetic Sensors: Observability Analysis and Performance Evaluation. Sensors, 2011, vol. 11, no. 10, pp. 9182–9206.

22. Chelnokov Yu.N. Quaternion and Biquaternion Methods and Regular Models of Analytical Mechanics (Review). Prikladnaya matematika i mekhanika [Applied Mathematics and Mechanics], 2023, vol. 87, no. 4, pp. 519–556 (in Russian).

23. Conway R. Introduction to Rotations in Three Dimensions for Engineers and Scientists. Cham: Springer, 2026, 347 p.

24. Sfikas G., Kordopatis-Zilos G., Kompatsiaris I., et al. Are Euler angles a useful rotation parameterisation for pose estimation with Normalizing Flows? arXiv:2511.02277, 2025. Available at: https://arxiv.org/pdf/2511.02277 (accessed 30 June 2026).

25. Lee C.J., Lee J. Analytical Formulation of Relationship Between Sensors and Euler Angle Errors for Arbitrary Stationary Alignment Based on Accelerometer and Magnetometer. Sensors, 2025, vol. 25, no. 8, p. 2593.

26. Valenti R.G., Dryanovski I., Xiao J. A linear Kalman filter for MARG orientation estimation using the algebraic quaternion algorithm. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 467–481.

27. Wu J.-K., Li H.-B., Li Z.-X., et al. Generalized linear quaternion complementary filter for attitude estimation from multisensor observations: An optimization approach. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 1330–1343.

Penkov A.S., Kostoglotov A. A., Tavunov V.P.

EFFICIENCY ANALYSIS OF THE EXTENDED KALMAN FILTER BASED ON A QUATERNION DYNAMIC MODEL FOR ESTIMATING THE SPATIAL ORIENTATION OF AUTONOMOUS VEHICLES

Abstract*. The paper addresses the problem of spatial orientation estimation for autonomous vehicles. The existing extended Kalman filter with a kinematic model in Euler–Krylov angles has limitations associated with the occurrence of a singularity at a pitch angle of 90°, which leads to loss of algorithm stability.*

As a solution, the use of a quaternion orientation model is proposed, which eliminates discontinuities and singularities. The kinematic equation in quaternions is bilinear, which ensures computational stability. In this work, an EKF algorithm is synthesized based on a quaternion dynamic model. This approach makes it possible to account for the vehicle's moments of inertia in the state equations, thereby ensuring the physical adequacy of the orientation estimation algorithm.

Discretization of the equations is performed to implement the algorithm using digital information processing devices. Mathematical modeling of the motion of a multirotor UAV's digital twin, controlled by Pixhawk, is carried out using the GAZEBO simulator. A comparative

analysis shows that the proposed algorithm provides a reduction in the roll estimation error by 22% and the pitch estimation error by 9% compared to the extended Kalman filter in Euler–Krylov angles. The results confirm the effectiveness of the proposed approach for high-precision orientation control of autonomous vehicles.

***Keywords**: extended Kalman filter, orientation, quaternions, autonomous vehicles, rotation, dynamics model.*

Сведения об авторах:	**Information about the authors:**
Пеньков Антон Сергеевич Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), г. Ростов-на-Дону, Россия, доцент, кандидат технических наук, e-mail: pencha_@mail.ru	**Penkov Anton Sergeevich** Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Rostov State Transport University» (RSTU), Rostov-on-Don, Russia, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, e-mail: pencha_@mail.ru
Костоглотов Андрей Александрович Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), г. Ростов-на-Дону, Россия, Заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор, e-mail: kostoglotov@me.com	**Kostoglotov Andrey Alexandrovich** Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Rostov State Transport University» (RSTU), Rostov-on-Don, Russia, Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: kostoglotov@me.com
Тавунов Владимир Петрович Федеральное государственное унитарное предприятие «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (ФГУП РНИИРС), г. Ростов-на-Дону, Россия, начальник отдела, e-mail: tavunov@mail.ru	**Tavunov Vladimir Petrovich** Federal State Unitary Enterprise «Rostov-on-Don Scientific Research Institute of Radio Communications», Rostov-on-Don, Russia, Head of Department, e-mail: tavunov@mail.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 656.1

Богумил В.Н., Власов В.М., Гусейналиев Ю.В.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАБОТ ПО ИХ СОДЕРЖАНИЮ

Аннотация. *В статье рассматривается подход к повышению безопасности дорожного движения за счет совершенствования качества содержания автомобильных дорог. Предлагаемое решение основано на использовании специализированных бортовых аппаратно-программных средств, обеспечивающих непрерывную оценку функционального состояния рабочих органов дорожно-эксплуатационной техники. Метод базируется на обработке акустического следа, формируемого приводными механизмами оборудования, что позволяет автоматизировать функции контроля качества технологических операций, ранее выполнявшиеся оператором. В работе представлена практическая реализация метода, а также приведены результаты экспериментальных исследований. Актуальность темы обусловлена необходимостью внедрения объективных методов оценки выполненных объемов работ для минимизации рисков и обеспечения устойчивого функционирования транспортных систем.*

Ключевые слова: *автомобильный транспорт, безопасность дорожного движения, спектральный анализ мощности акустического сигнала, оценка фундаментальной частоты гармонической составляющей акустического сигнала*.

Постановка задачи

Федеральные автомобильные дороги играют ключевую роль в социальной и экономической жизни страны, объединяя транспортные артерии регионов в единый национальный комплекс. Именно от качества и надежности этих магистралей напрямую зависят динамика экономического роста, условия для развития бизнеса и общее благополучие граждан [1, 2].

Высокая транспортная значимость таких трасс сопряжена с повышенной опасностью. Согласно данным профильной стратегии безопасности, на автомобильные дороги федерального значения приходится порядка трети всех гибелей в результате дорожно-транспортных происшествий. Уровень риска здесь в шесть раз превышает аналогичные показатели для региональных и межмуниципальных маршрутов и в шестнадцать раз - для дорог местного значения [3].

Безопасность движения в значительной степени определяется эксплуатационным состоянием транспортной сети, связывающей между собой отдельные районы и сопредельные территории. Состояние дорожного полотна выступает фундаментальным фактором риска: гладкость и целостность покрытия напрямую влияют на управляемость

автомобиля. Появление выбоин, колейности и прочих дефектов создаёт прямую угрозу потери контроля над машиной, что особенно критично на высоких скоростях, характерных для междугороднего трафика. Результаты изысканий белорусских ученых подтверждают, что около тридцати процентов всех аварий так или иначе спровоцированы несовершенством инфраструктуры [4]. Серьезное влияние на частоту и тяжесть происшествий оказывает и геометрия проезжей части. Ширина полос движения, параметры обочин, а также коэффициент сцепления шин с поверхностью напрямую формируют уровень аварийности. По этой причине систематическая оценка и последующий аудит дорожной инфраструктуры должны проводиться с одной главной целью — максимальной минимизацией рисков для жизни и здоровья участников движения [5].

В настоящее время навигационный контроль дорожных машин, выполняющих работы по содержанию автомобильных дорог федерального значения общего пользования, осуществляется на основе применения аппаратно-программного комплекса «Дортранснавигация», который позволяет контролировать местоположение дорожных машин на объектах, в соответствии с выданным оперативным заданием [6]. Однако, в системе «Дортранснавигация» контролировать параметры, оценивающие функциональное состояние рабочих органов в реальном масштабе времени, затруднительно, поскольку для этого необходимы не только данные о времени работы рабочих органов или пробеге дорожных машин на объекте содержания, но и данные параметров, касающихся применения рабочих органов в заданных технологических операциях.

В настоящее время отдельные образцы отечественной дорожной техники оборудуются контрольными блоками для управления рабочими органами. Разработан стандарт передачи информации о работе рабочих органов в диспетчерский центр [6]. Однако вопрос контроля за действиями оператора в процессе выполнения работ не решен. От оператора дорожной машины зависит установление режимов работы соответствующих рабочих органов при выполнении операции. То же самое касается скорости движения машины при выполнении работы.

Функция управления режимами рабочих органов в настоящее время полностью находится под контролем исполнителя – оператора дорожной машины, что отличает данную ситуацию от ситуации в машиностроении, как показано на рисунке 1.

Данная ситуация является возможной причиной невыполнения заданной операции в соответствии с указанными технологическими режимами и, соответственно, снижения качества работы, оставления проезжей части в ненормативном состоянии.

Подход к решению указанной проблемной ситуации основан на предположении, в соответствии с которым повышение безопасности дорожного движения на основе повышения качества содержания автомобильных дорог может быть достигнуто путем внедрения методов инструментального контроля выполняемых работ, проводимых дорожными машинами, разработанных на основе акустических методов контроля параметров выполняемых технологических операций, выполняемых в соответствии с установленными нормативами [7]. Акустический метод контроля основан на регистрации параметров упругих звуковых волн, возбуждаемых в соответствующих рабочих органах или их приводах.

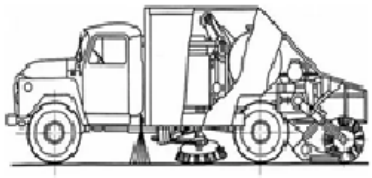
Этапы жизненного цикла	Машиностроение	Дорожное хозяйство
Производство работ		
Контроль качества работ	 Контроль качества работ выполняет контролер ОТК	 Контроль технологических параметров выполняет исполнитель

Рис. 1. Отличие организации производства продукции в дорожном хозяйстве при содержании дорог и в промышленности

Анализ последних исследований

В современных системах обработки звуковых сигналов различают три различные по характеру составляющие звукового сигнала [8]:

1) нерегулярный сигнал без четкой локализации спектра, который на слух воспринимается как шум;

2) гармонический сигнал, который может быть представлен суммой тригонометрических функций синуса и косинуса;

3) непериодические (часто непродолжительные) фрагменты с резким изменением энергии и формы.

Проведенный нами анализ показал, что шум дорожных машин содержит все указанные компоненты, как показано на рисунке 2.

В проводимом исследовании ставилась задача оценить, как параметры акустического сигнала, измеренные в определенной точке, изменяются при различных режимах функционирования и соотнести полученные результаты с требованиями к качеству выполнения заданной технологии. Таким образом, принципиальным является доказательство возможности по результатам анализа шумового сигнала, принимаемого датчиком, определить функциональное состояние агрегата:

- работает в соответствии с заданным технологическим режимом;
- работает с нарушением заданного технологического режима;
- не работает.

Необходимо учесть, что нахождение агрегата в нерабочем состоянии не означает отсутствие звуковых сигналов, воспринимаемых датчиком (микрофоном) из-за фонового шума. Поэтому ставится задача по остаточному фоновому шуму определить, что агрегат находится в нерабочем состоянии.

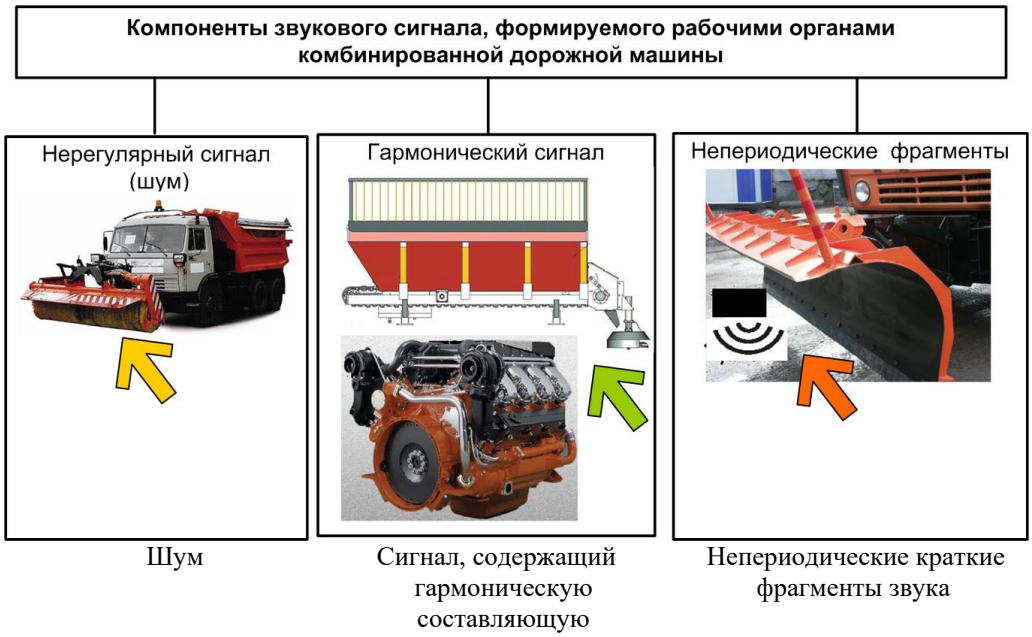


Рис. 2. Составляющие звукового сигнала, формируемого рабочими органами дорожных машин

Цель работы

Повышение безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах возможно за счет повышения качества работ по содержанию дорог на основе использования современных инструментальных методов контроля заданных технологических режимов работ.

Основная часть

В соответствии с проведенным анализом, основными источниками акустических сигналов являются отвал, щетка, которые формируют шум, двигатель внутреннего сгорания, гидравлические двигатели приводов рабочих органов, насос, прокачивающий рабочую жидкость, формируют акустические сигналы, содержащие гармонические составляющие.

Одним из главных инструментов оценки параметров шума является анализ спектральной плотности мощности шума. Спектральная плотность мощности (СПМ) описывает изменение мощности сигнала в зависимости от частоты [9]. Другими словами, она показывает, какие частотные компоненты содержат большую мощность, а какие — меньшую. Изменение мощности отображается в виде графика, где по оси X отложена частота, а по оси Y — мощность (дБ/Гц или Вт/Гц).

В качестве рабочей гипотезы принимаем предположение, что характер спектральной плотности мощности может служить косвенным признаком, по которому можно судить о функциональном состоянии рабочего органа, формирующего звуковой сигнал (например, щетки) и сделать заключение о соответствии ее функционирования заданному технологическому режиму.

Рассмотрим вычисление СПМ с помощью построения периодограммы [9].

Расчёт СПМ выполняется после оцифровки звукового сигнала, когда исходный сигнал представляется в виде последовательности отсчетов уровней сигнала, выполненных с заданной частотой дискретизации.

После этапа дискретизации непрерывный на входе сигнал на выходе представляется последовательностью отсчетов x(n). Числовое значение отсчёта представляет амплитуду непрерывного во времени сигнала, измеренное в момент времени выполнения операции дискретизации. Мы предполагаем, что эта амплитуда напряжения.

Мгновенная мощность дискретизированного сигнала (P_{ins}) определяется в виде [9]:

$$P_{ins} = x^2[n] \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что мгновенная мощность дискретизированного сигнала оценивается по величине значения отсчёта и представляется квадратом значения этого отсчёта.

Поскольку единицами измерения отсчёта являются вольты, единицами измерения мощности являются ватты.

Мы предполагаем измерять среднюю мощность сигнала за определенный период времени, которая рассчитывается как среднее значение мгновенной мощности каждого отсчёта сигнала. Пусть за некоторый период времени сигнал x(n) представляется совокупностью N отсчётов, тогда:

$$P_{ave} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x^2[n] \quad (2)$$

Рассчитанная величина мощности поступает на вход квантователя, где округляется до одного из ближайших заранее заданных возможных значений, зависящих от разрядности квантователя, после чего шифруется в виде двоичного числа. Схема преобразования входного сигнала в процессе выделения и обработки шумовой составляющей звукового сигнала показана на рисунке 3.

Шум агрегата дорожной машины, в котором используется вращательное движение некоторого узла или детали, всегда содержит первую гармонику, соответствующую частоте вращения данного узла.

В теоретических работах частота первой гармоники сигнала получила название фундаментальной частоты [10].

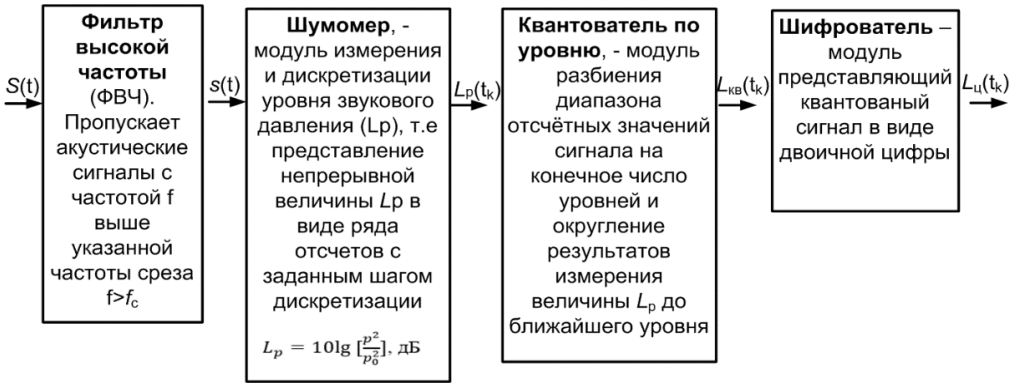


Рис. 3. Схема преобразования входного сигнала в процессе выделения и обработки шумовой составляющей звукового сигнала

Анализ акустического сигнала агрегата, совершающего рабочие колебательные движения, позволит выявить первую гармонику колебания и содержательно ее трактовать с целью оценки функционального содержания данного агрегата.

Подход и выделение гармонической составляющей исходного звукового сигнала, формируемого рабочим органом дорожной машины, содержащим гармонические компоненты, основаны на использовании метода автокорреляции [10].

Количественно автокорреляцию можно измерить с помощью линейного коэффициента корреляции между уровнями исходного временного ряда и уровнями этого ряда, сдвинутыми на несколько шагов во времени.

Формула линейного коэффициента корреляции (r_τ) имеет вид:

$$r_\tau = \frac{\sum_{t=\tau+1}^{n}(y_t-\bar{y}_{1\tau})(y_{t-\tau}-\bar{y}_{2\tau})}{\sqrt{\sum_{t=\tau+1}^{n}(y_t-\bar{y}_{1\tau})^2(y_{t-\tau}-\bar{y}_{2\tau})^2}} \quad (3)$$

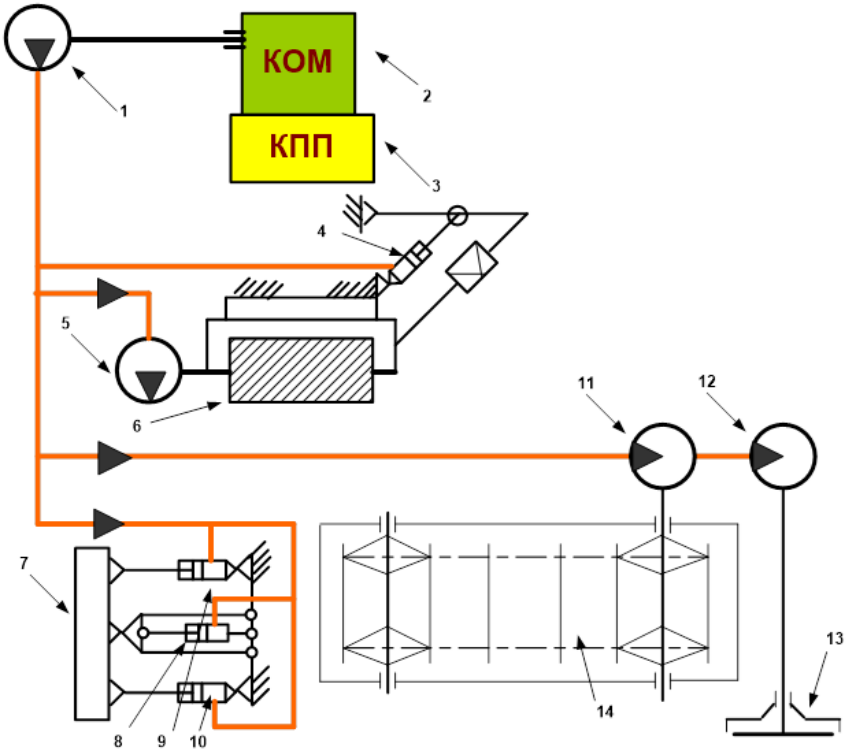
где n –количество членов анализируемой совокупности отсчетов;

τ–:сдвинутое на τ позиций значение отсчета с номером t-τ;

$\bar{y}_{1\tau} = \frac{\sum_{t=\tau+1}^{n} y_t}{n-\tau}$ – среднее значение $(n-\tau)$ членов исходного ряда;

$\bar{y}_{1\tau} = \frac{\sum_{t=\tau+1}^{n} y_t}{n-\tau}$ – среднее значение $(n-\tau)$ членов исходного ряда, сдвинутых на τ позиций.

С целью проверки эффективности описанных научных методов анализа акустических сигналов, формируемых узлами и агрегатами дорожной машины в реальной обстановке, был проведен ряд экспериментальных исследований. В качестве объекта экспериментальных исследований была выбрана комбинированная дорожная машина ЭД-405А на базе Камаз-65115 с оборудованием компании Bucher. Для выбора источников акустических сигналов была проанализирована кинематическая схема данной машины, показанная на рисунке 4.



1 - насос гидросистемы; 2 – коробка отбора мощности; 3 – коробка перемены передач; 4 - гидроцилиндр подъёма-опускания отвала; 5 - гидромотор привода вращения щётки; 6 – щетка средняя; 7 - поворотный отвал; 8, 10 - гидроцилиндры поворота отвала; 11 - гидромотор привода транспортёра; 12 - гидромотор разбрасывателя; 13 - разбрасывающий диск; 14 - транспортёр

Рис.4. Кинематическая схема приводов рабочих органов дорожной машины ЭД-405А на базе автомобиля КамАЗ-65115с пескоразбрасывающим оборудованием и передним поворотным отвалом

Выбор данного объекта объясняется тем, что данная машина предназначена для круглогодичного содержания дорог. В период весенне-летне-осенней эксплуатации машина используется для поливки и мойки дорожного полотна, дорожных ограждений, дорожных знаков, а также для вспомогательных операций по очистке дорожного покрытия. В зимний период эксплуатации машина используется для очистки проезжей части от снега, распределения на проезжей части противогололедных материалов [11]. Данная машина широко используется на предприятиях г. Москвы.

Для обработки исходных аудиофайлов были выбраны инструменты пакета МАТЛАБ. В составе инструментов МАТЛАБ имеется специализированный набор инструментов Audio Toolbox, который можно использовать для различных действий с записанными акустическими файлами [12]. На основе возможностей данного инструмента были разработаны программы обработки записей аудиофайлов с целью проведения сравнительного анализа эффективности использования шумовых сигналов и сигналов, содержащих гармоническую составляющую, для оценки функционального состояния агрегатов. Были проанализированы результаты оценки спектральной плотности мощности акустических сигналов двигателя автомобиля, гидромоторов, работающих в различных режимах и опущенного отвала. Примеры графиков спектральной плотности мощности акустических сигналов гидромотора щетки (настроенного на 600 об/мин) и гидромотора распределителя противогололедных материалов (ПГМ) (настроенного на 2000 об/мин), полученные по результатам обработки акустических файлов, показаны на рисунке 5.

а) б)

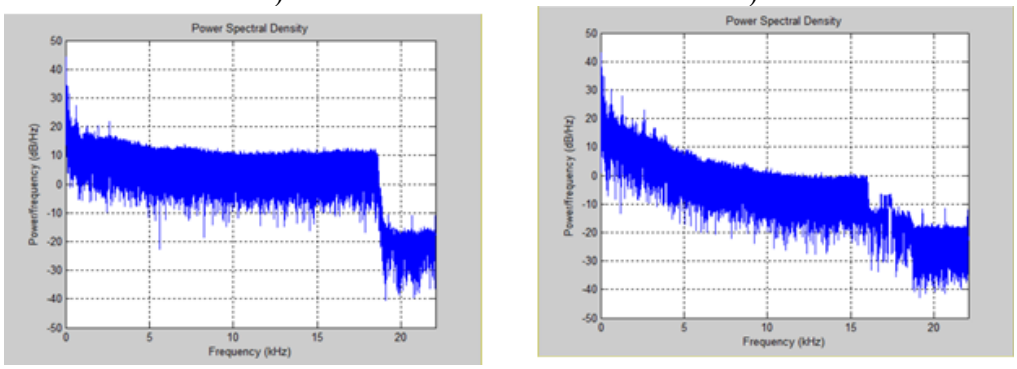


Рис. 5. Графики спектральной плотности мощности акустических сигналов гидромоторов средней щетки и распределителя противогололедных материалов: а) центральная щетка (600 об/мин); б) распределитель ПГМ (2000 об/мин)

Был сделан вывод о слабой различимости спектральной плотности мощности акустических сигналов гидромоторов, работающих в различных, значительно отличающихся режимах.

Были также получены с использованием программы, написанной на языке МАТЛАБ, и проанализированы результаты оценки фундаментальной частоты для двигателя при частоте вращения коленчатого вала 1500 оборотов/мин по тахографу (25 Гц), гидромотора центральной щетки, отрегулированного на частоту вращения 600 оборотов/мин (10 Гц) и гидромотора распределителя ПГМ, отрегулированного на частоту вращения 2000 оборотов/мин (33,33 Гц). Каждое измерение проводилось циклически 50 раз, и полученные результаты были обработаны статистически. В таблице 1 показаны результаты оценки фундаментальной частоты (оборотов вращения коленчатого вала двигателя).

Таблица 1

Результаты оценки оборотов вращения коленчатого вала двигателя (настроенного на частоту 25 Гц)

23,88	23,70	21,83	24,63	21,70	24,39	25,83	24,46	24,11	24,32
24,73	26,48	25,95	26,45	26,67	26,94	25,81	24,32	26,90	25,12
25,65	24,78	24,12	25,35	23,36	24,01	25,40	26,04	25,62	26,03
24,78	25,69	25,41	24,80	25,81	24,32	26,04	26,11	25,09	25,87
26,04	27,81	25,44	24,81	25,04	26,04	24,84	26,07	26,01	26,06

По результатам обработки получены следующие данные: оценка математического ожидания $\overline{x}$=25,15 Гц; оценка дисперсии s^2 =1,64; оценка среднего отклонения $s = 1{,}45$.

Таблица 2

Результаты оценки оборотов гидромотора центральной щетки (настроенного на частоту 10 Гц)

10,00	11,02	12,01	10,85	12,45	10,85	12,30	12,49	11,60	11,75
12,37	10,04	12,93	12,80	11,17	10,19	10,90	12,18	10	11,34
11,21	10	10,71	11,15	10,04	12,30	12,46	12,79	12,34	12,41
11,40	11,94	11,15	10,81	11,32	11,54	12,39	10,04	11,03	10,91
11,23	11,45	12,18	10,61	12,86	11,04	10,56	11,87	10,27	10,11

По результатам обработки получены следующие данные: оценка математического ожидания $\overline{x}$=11,39 Гц; оценка дисперсии s^2 =0,80; оценка среднего отклонения $s = 0{,}89$.

Таблица 3

Результаты оценки оборотов гидромотора распределителя ПГМ (настроенного на частоту 33,33 Гц)

34,53	35,11	34,29	33,35	34,42	35,36	37,05	35,56	34,21	35,28
33,81	35,70	33,97	35,33	35,33	34,48	35,53	34,34	35,85	35,91
34,84	36,83	36,08	34,50	36,17	35,82	36,00	35,47	36,00	35,25
35,48	35,31	34,45	35,88	35,82	34,77	36,29	34,80	35,25	35,42
36,48	35,89	35,28	35,33	35,28	36,38	38,34	34,34	36,44	35,39

По результатам обработки получены следующие данные: оценка математического ожидания $\overline{x}$=35,39 Гц; оценка дисперсии s^2 =0,82; оценка среднего отклонения $s = 0{,}90$.

Проверка статистических данных по критерию Пирсона x^2 показала, что данные распределены по нормальному закону. Отсюда следует, что отклонение статистических данных от математического ожидания с вероятностью 0,95 не превысит 2 Гц. Отклонение оценки математического ожидания от фактического значения оборотов вращения находится в пределах 2 Гц. В заключение можно сказать, что точность метода позволяет оценить режим работы контролируемого рабочего органа методом автокорреляции.

Выводы

1) Повышение безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах возможно за счет повышения качества работ по содержанию дорог на основе использования современных инструментальных методов контроля заданных технологических режимов работ путем оценки функционального состояния рабочих органов по результатам обработки формируемых акустических сигналов.

2) Оценка значения фундаментальной частоты двигателя и гидромоторов приводов

рабочих органов на основе статистического метода автокорреляции получается с точностью, достаточной для использования данного подхода для оценки режима работы рабочего органа дорожной машины.

3) Оценка спектральной плотности мощности позволяет оценить состояние рабочего органа по принципу «включен-выключен».

Список литературы

1. Колесникова Ю. А. «Транспортно-эксплуатационные характеристики городских автомобильных дорог» // Молодой учёный. — 2022. — № 52 (447). — С. 32–34.

2. Шамоян, Э. Д. Проблемы реализации национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» / Э. Д. Шамоян, Е. В. Масленникова // Общество, экономика, управление. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 27–32. – DOI: 10.47475/2618-9852-2021-16304 – EDN: SFBDBR

3. Стратегии повышения безопасности дорожного движения в Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». Утверждена Указом Президента РФ от 14 ноября 2025 года № 841 // Официальный интернет-портал правовой информации. Номер опубликования — 0001202511140022, дата — 14 ноября 2025 года.

4. Капский Д. В., Богданович С. В., Бурова М. Г. Влияние дорожной и интеллектуальной транспортной инфраструктуры на безопасность движения: новые подходы к классификации рисков // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. - 2025. - №1. - С. 39-48.

5. Коновалова Т.В., Надирян С.Л., Изюмский А.А., Коцурба С.В. Элементы дорожной инфраструктуры и влияние их на безопасность дорожного движения // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies,. - 2022. - №2. - С. 49-68. DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-2-49-68

6. Цифровая инфраструктура и телематические системы контроля работ по содержанию автомобильных дорог/В.М. Власов, А.М. Байтулаев, В.Н. Богумил. – Москва: Инфра-М, 2021. – 229 с.

7. Рудаков М.Л., Дука Н.Е. Моделирование акустического воздействия горного оборудования на персонал при добыче угля подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - №10. - С. 165-179. с. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_165

8. Вашкевич, М. И. Теория и применение цифровой обработки сигналов / М. И. Вашкевич, М. И. Порхун. — Минск: БГУИР, 2022. — 84 с. — Текст: непосредственный.

9. Щепетов, А. Г. Преобразование измерительных сигналов: учебник и практикум для вузов / А. Г. Щепетов, Ю. Н. Дьяченко; под редакцией А. Г. Щепетова. — Москва: Издательство Юрайт, 2026. — 270 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-01177-7.

10. Подкорытова, О. А. Анализ временных рядов : учебное пособие для вузов / О. А. Подкорытова, М. В. Соколов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2026. — 225 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-19441-8.

11. КамАЗ Маркет. Электронный ресурс. URL: https://kamaz.market/catalog/kommunalnaya-tekhnika/kombinirovannaya-dorozhnaya-mashina-mk-4534-01-318440/

12. Рудаков П.И. Обработка сигналов и изображений MATLAB 5.x / П. И. Рудаков, И. В. Сафонов; Под общ. ред. В. Г. Потемкина. — М. : Диалог-МИФИ, 2000. — 413 с. ил.; 20. — (Пакеты прикладных программ); ISBN 5-86404-144-0.

.

References

1. Kolesnikova, Yu. A., "Transport and Operational Characteristics of Urban Highways." // Young Scientist. — 2022. — No. 52 (447). — Pp. 32–34. (in Russian).

2. Shamoyan, E. D., Problems of Implementing the National Project "Safe and High-Quality Highways." / E. D. Shamoyan, E. V. Maslennikova // Society, Economy, Management. — 2021. — Vol. 6, No. 3. — Pp. 27–32. — DOI: 10.47475/2618-9852-2021-16304 (in Russian).

3. Strategies for Improving Road Safety in the Russian Federation through 2030 and into 2036. Approved by Decree of the President of the Russian Federation dated November 14, 2025, No. 841 // Official Internet Portal of Legal Information. Publication number - 0001202511140022, date - November 14, 2025. (in Russian).

4. Kapskiy D. V., Bogdanovich S. V., Burova M. G. The Impact of Road and Intelligent Transport Infrastructure on Traffic Safety: New Approaches to Risk Classification // Bulletin of Polotsk State University. Series B. - 2025. - No. 1. - P. 39-48. (in Russian).

5. Konovalova T. V., Nadiryan S. L., Izyumskiy A. A., Kotsurba S. V. Elements of Road Infrastructure and Their Impact on Road Safety // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies,. - 2022. - No. 2. - P. 49-68. DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-2-49-68 (in Russian).

6. Digital infrastructure and telematic systems for monitoring road maintenance work / V. M. Vlasov, A. M. Baitulaev, V. N. Bogumil. - Moscow: Infra-M, 2021. - 229 p. (in Russian).

7. Rudakov M. L., Duka N. E. Modeling the acoustic impact of mining equipment on personnel during underground coal mining // Mining Information and Analytical Bulletin. - 2021. - No. 10. - pp. 165-179.

DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_165 (in Russian).

8. Vashkevich, M. I. Theory and Application of Digital Signal Processing / M. I. Vashkevich, M. I. Porkhun. - Minsk: BSUIR, 2022. - 84 p. - Text: direct. (in Russian).

9. Shchepetov, A. G. Conversion of Measuring Signals: Textbook and Workshop for Universities / A. G. Shchepetov, Yu. N. Dyachenko; edited by A. G. Shchepetov. - Moscow: Yurait Publishing House, 2026. - 270 p. - (Higher Education). - ISBN 978-5-534-01177-7. (in Russian).

10. Podkorytova, O. A. Time Series Analysis: A Textbook for Universities / O. A. Podkorytova, M. V. Sokolov. — 2nd ed., revised and enlarged. — Moscow: Yurait Publishing House, 2026. — 225 p. — (Higher Education). — ISBN 978-5-534-19441-8. (in Russian).

11. KamAZ Market. Electronic resource. URL: https://kamaz.market/catalog/kommunalnaya-tekhnika/kombinirovannaya-dorozhnaya-mashina-mk-4534-01-318440/ (in Russian).

12. Rudakov P., Safonov I. Signal and Image Processing Matlab 5.x. Dialog-MIFI. 2000. (in Russian).

Bogumil V.N., Vlasov V.M., Guseinaliev Yu.V.

IMPROVING ROAD SAFETY ON MOTORWAYS BY IMPLEMENTING INSTRUMENTAL METHODS FOR QUALITY CONTROL IN MAINTENANCE

Abstract. *This article examines an approach to improving road safety in existing transport systems. This approach is based on improving the quality of road maintenance work performed by road maintenance vehicles through the use of specialized onboard hardware and software. These tools assess the functional state of road maintenance vehicles' operating parts and, based on this, monitor the quality of the technological operations performed, thereby fulfilling the control system function currently performed by the road maintenance vehicle*

operator. This article discusses the implementation of this approach, based on processing the acoustic trace generated by the drive mechanisms and operating parts of road maintenance vehicles, and presents the results of experimental studies. The relevance of this topic is justified by the fact that the lack of objective methods for assessing the quality of completed work creates conditions for a decrease in the safety level of national and regional transport systems.

***Keywords**: road transport, road safety, spectral analysis of acoustic signal power, assessment of the fundamental frequency of the harmonic component of an acoustic signal.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Богумил Вениамин Николаевич Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) Адрес: 125319, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, 64 К.т.н., доцент кафедры “Транспортная телематика” E-mail: v_bogumil@mail.ru	**Veniamin Nikolaevich Bogumil** Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Address: 125319, Russia, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64 Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Transport Telematics Email: v_bogumil@mail.ru
Власов Владимир Михайлович Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) Адрес: 125319, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, 64 доктор технических науки, профессор, заведующий кафедрой “Транспортная телематика” E-mail: vmv@transnavi.ru	**Vladimir Mikhailovich Vlasov** Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Address: 125319, Russia, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64 Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Telematics Email: vmv@transnavi.ru
Гусейналиев Юсуф Вагифович Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) Адрес: 125319, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, 64 аспирант E-mail: guseinaliev99@mail.ru	**Yusuf Vagifovich Guseinaliev** Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Address: 125319, Russia, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64 Graduate student E-mail: guseinaliev99@mail.ru

УДК 629.113

Ван Чжэньюй, Зузов В.Н.

МЕТОДИКА ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КУЗОВА И СВАРНЫХ ТОЧЕК В НЁМ ГРУЗОПАССАЖИРСКОГО АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ ПРИ ФРОНТАЛЬНОМ УДАРЕ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГРУЗА НА КАБИНУ

Аннотация. *В нашей предыдущей работе был обоснован нагрузочный режим фронтального удара для грузопассажирского автомобиля, при котором груз срывается с креплений, смещается вперед, сминает передний борт грузовой платформы и заднюю стенку кабины (возможно пробитие их), создавая прямую угрозу для водителя и пассажиров. На основе этого режима предложена методика совершенствования конструкции кузова грузопассажирского автомобиля, обеспечивающая пассивную безопасность при минимальной массе. Методика включает пять основных этапов, реализуемых в соответствии с разработанной блок-схемой: 1) создание и верификацию упрощенной конечно-элементной модели (ускорение расчета примерно в 70 раз при погрешности ≤8 %); 2) предварительное усиление сварных соединений; 3) совместную топологическую оптимизацию панелей и зон сварных соединений, позволяющую определить зоны высокой плотности материала и допустимую область расположения сварных точек; 4) параметрическую оптимизацию толщин ребер жесткости и параметрическую оптимизацию количества и координат сварных точек; 5) проверочные расчеты. В результате применения методики к пикапу Chevrolet Silverado устранены разрушения сварных соединений, максимальное проникновение снижено в 4 раза до 392 мм (ниже допустимого 510 мм), количество сварных точек сокращено на 62 %, масса панелей и усилителей уменьшена на 5 %.*

Ключевые слова: *конечно-элементная модель, методика оптимизации, пикап, пассивная безопасность, фронтальный удар, грузопассажирский автомобиль, LS-DYNA.*

Постановка задачи

Обеспечение пассивной безопасности является приоритетной задачей при проектировании кузова автомобиля. Особая специфика у пикапов — это автомобили с открытой грузовой платформой. При фронтальном столкновении груз, сорвавшийся с креплений, под действием инерционных сил смещается вперед, сминает передний борт грузовой платформы и заднюю стенку кабины (возможно пробитие их), создавая прямую угрозу для водителя и пассажиров [1]. Традиционное решение — увеличение толщин панелей и добавление силовых элементов — может повысить пассивную безопасность, но ведет к неоправданному росту массы автомобиля.

В то же время снижение массы является одним из ключевых требований современного автомобилестроения, обусловленных ужесточением норм топливной экономичности, ограничениями на выбросы CO_2 и требованиями к динамическим

характеристикам [2]. Таким образом, возникает противоречие между необходимостью обеспечения безопасности и снижением массы конструкции.

Решение данной проблемы требует комплексного подхода, охватывающего выбор силовой схемы, оптимизацию толщин панелей и рациональное размещение сварных точек [3]. Применение методов оптимизации на этапе проектирования перспективно с позиции поиска конструктивных решений, обеспечивающих пассивную безопасность при минимальной массе без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

Анализ последних исследований

Вопросы обеспечения пассивной безопасности и снижения массы кузовов автомобилей широко освещены в научной литературе. Основные направления исследований можно разделить на три группы: применение легких материалов, структурная оптимизация и совершенствование технологий соединения.

Применение легких материалов. В работах [4, 5] рассматривается использование высокопрочных сталей, алюминиевых и магниевых сплавов, а также композиционных материалов для снижения массы кузовных панелей. Однако замена материала без пересмотра силовой схемы часто не дает ожидаемого эффекта из-за снижения жесткости и изменения характера деформирования. Гончаров и др. [4] исследовали поведение тонкостенных труб с различными наполнителями (пенометалл, соты и др.) при предельном нагружении, показав эффективность комбинированных конструкций для поглощения энергии удара. Из анализа следует, что легкие материалы помогают снизить массу, но часто ухудшают жёсткость и меняют характер деформации. Наполнители хорошо гасят энергию удара, но их применение ограничено технологией и стоимостью.

Разработка модели сварных точек для многовариантных расчетов. В одной из наших работ [6] была представлена разработанная нами усовершенствованная модель точечного сварного соединения на основе балочных элементов, учитывающая влияние скорости деформации на процесс разрушения. Предложенная модель обеспечивает высокую точность при существенном сокращении времени расчета, что позволяет эффективно использовать ее в многовариантных расчетах.

Структурная оптимизация. Методы оптимизации, применяемые для решения задач прочности и жесткости, в настоящее время достаточно хорошо развиты. В последние годы активно развиваются методы гибридного клеточного автомата (HCA), адаптированные для нелинейных задач. Данный алгоритм интегрирован в программный пакет LS-TaSC. В работе Raeisi [7] предложен адаптивный алгоритм HCA, управляющий перераспределением материала при ударных нагрузках, что позволяет выявлять рациональные силовые схемы. В работе Zhang [8] применена комбинация топологической оптимизации по методу SIMP с параметрической оптимизацией, что позволило эффективно снизить массу рамы автомобиля при сохранении ее прочности. Однако в условиях ударного нагружения, характеризующихся высокой степенью нелинейности, проведение оптимизации сопряжено с существенными трудностями.

Оптимизация сварных соединений. Точечное сварное соединение является основным способом соединения кузовных панелей. В работе Вдовина [9] разработана методика оптимизации распределения сварных точек на этапе проектирования, направленная на сокращение их количества при сохранении статической и усталостной характеристики кузова. Лю и Зузов [11] моделировали клеевые соединения при динамическом нагружении, модифицируя свойства материала для повышения точности расчета. Однако большинство исследований по оптимизации расположения сварных точек ориентированы на статическую прочность и NVH-характеристики (шум, вибрация, жесткость), а не на ударные режимы. В работах [12, 13] предприняты попытки одновременного учета нескольких критериев (прочность, удар, NVH) с использованием

методов многокритериальной оптимизации, но они касаются в основном легковых автомобилей классической компоновки.

Многокритериальная оптимизация. Duddeck [14] обобщил подходы к многодисциплинарной оптимизации кузовов, выделив необходимость компромисса между противоречивыми требованиями (масса и пассивная безопасность, жесткость и удар). Roux и др. [5] применили ограниченную многокритериальную топологическую оптимизацию к автомобильным компонентам. Wang и др. [15] использовали «кооперативную» оптимизацию и многокритериальный генетический алгоритм для кузова. Craig и др. [16] интегрировали краш- и NVH-анализы в среде LS-OPT.

Вместе с тем, специальных исследований, посвященных оптимизации панелей и сварных соединений пикапов для защиты от проникновения груза при фронтальном ударе, в доступной литературе крайне мало. Существующие стандарты пассивной безопасности (например, FMVSS 208, ECE R94, ГОСТ Р 41.94-99) регламентируют испытания на фронтальный удар, но не учитывают сценарий с перемещением груза из платформы в кабину. Этот опасный режим был обоснован нами в предыдущей работе [1]. Таким образом, научная новизна данной работы заключается в разработке специализированной методики для такого режима, предполагающей создание оптимальной силовой схемы и оптимальное размещение сварных точек и обеспечивающей снижение массы при сохранении пассивной безопасности. Следует отметить, что для выполнения многовариантных оптимизационных расчетов необходима специальная модель сварного соединения, которая была разработана именно для решения этих задач [6].

Цель работы

Цель статьи – изложение разработанной методики совершенствования конструкции кузова грузопассажирского автомобиля, обеспечивающей пассивную безопасность при минимальной массе в условиях фронтального удара с воздействием груза на кабину.

Методика включает пять этапов: упрощение и верификацию конечно-элементной модели, предварительное усиление сварных соединений, совместную топологическую оптимизацию (определение зон концентрации материала и допустимых областей размещения сварных точек), параметрическую оптимизацию толщин усилителей и координат сварных точек, а также проверочные расчеты. Работоспособность методики демонстрируется на примере пикапа Chevrolet Silverado.

Основная часть

Методика оптимизации кузова и точечных сварных соединений пикапа для снижения массы при ударном нагружении грузом сзади

Основные положения методики совершенствования конструкции кабины и грузовой платформы пикапа на стадии проектирования показаны на схеме, приведенной на рис. 1. Методика построена так, чтобы на каждом этапе можно было вносить изменения без значительных материальных затрат, а также гибко выбирать способы усиления в зависимости от конструктивных, технологических и экономических ограничений.

На первом этапе методики на основе конструкторской документации создается высокоточная конечно-элементная модель автомобиля. Поскольку прямое использование детальной модели в оптимизационных расчетах требует чрезмерного машинного времени, выполняется ее обоснованное упрощение.

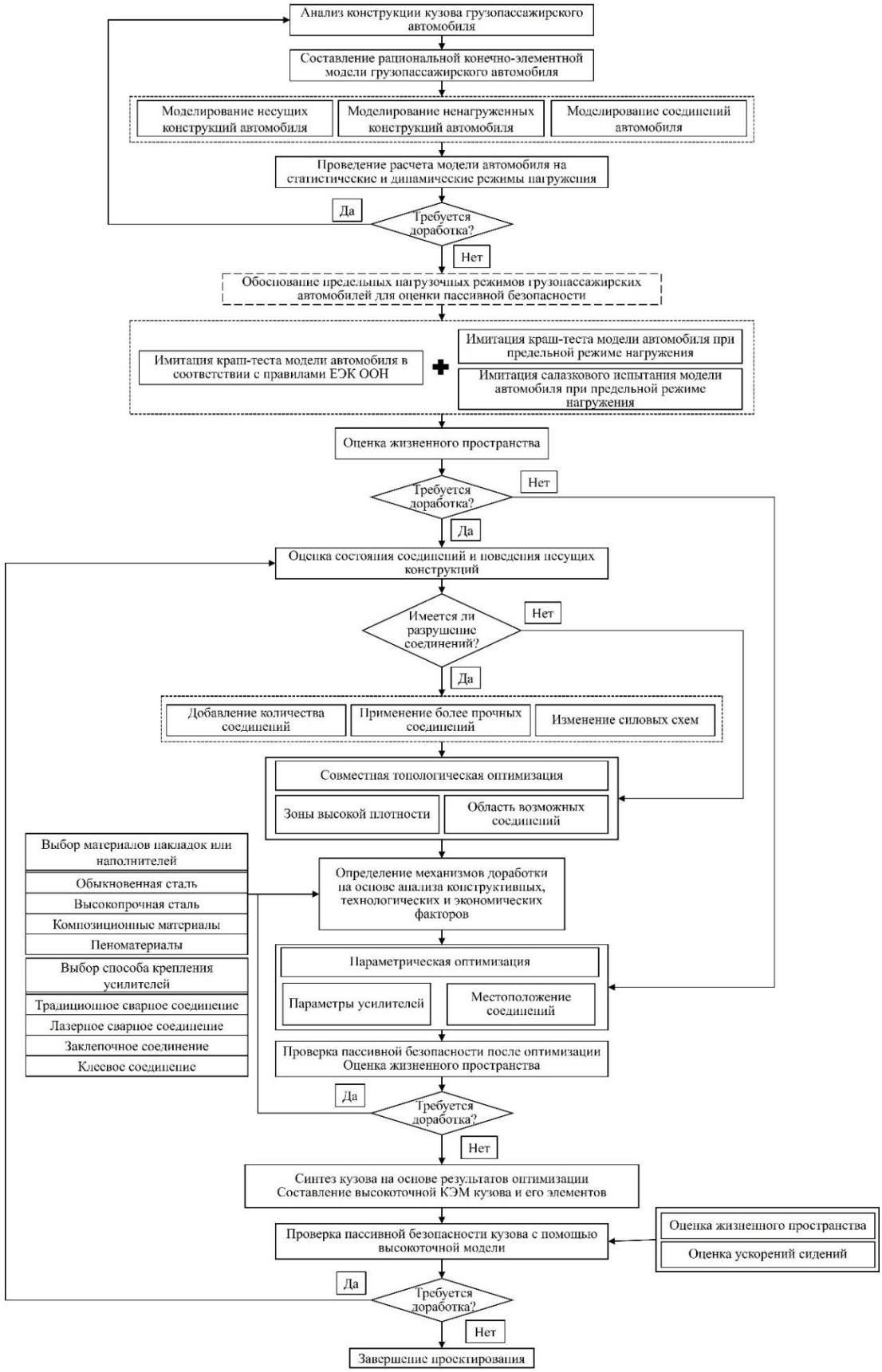


Рис. 1. Блок-схема методики совершенствования конструкций кузовов пикапов для удовлетворения требований по пассивной безопасности при минимальной массе

Переходим к модели салазкового испытания, удаляем второстепенные элементы (остекление, двери, панель приборов, сиденья), укрупняем сетку, а также заменяем большинство сварных соединений жесткими связями, оставляя детальное моделирование только в области проектируемых панелей. Упрощенную модель верифицируем сравнением с исходной; допустимая погрешность по интегральным динамическим характеристикам (максимальное проникновение, ускорение, скорость груза) и по энергопоглощению основных силовых элементов не должна превышать 10 %.

Для оценки пассивной безопасности используется обоснованный ранее режим фронтального удара, при котором груз воздействует на конструкцию переднего борта грузовой платформы и кабины (масса груза 200 кг, скорость в момент удара 13,9 м/с) [1]. Если в базовой конструкции наблюдаются разрушения точечных сварных соединений, их количество увеличиваем до тех пор, пока отказы не исчезнут. При необходимости применяем более прочные соединения (например, лазерную сварку) или изменяем силовую схему. Этот шаг обеспечивает начальную целостность соединений перед проведением оптимизации.

Затем методом гибридных клеточных автоматов (HCA) в программе LS-TaSC решается задача минимизации массы конструкции при ограничении по максимальному проникновению. Все непрерывные зоны, в которых расположены сварные соединения, выделяются в отдельный Design Part. Для панелей используется стандартный коэффициент штрафа SIMP, а для зон сварки – повышенный, что обеспечивает бинарное распределение плотности (0 – сварная точка удаляется, 1 – сохраняется). Результатами топологической оптимизации являются зоны высокой плотности материала (силовые пути, которые впоследствии могут быть реализованы в виде ребер жесткости, каркасных элементов и др.) и допустимая область расположения сварных точек.

После того как топологическая оптимизация указала зоны, требующие материала, можно выбрать один или несколько способов усиления из широкого набора:

- геометрические усилители – штампованные ребра жесткости различных конфигураций (продольные, поперечные, V-образные), межпанельные закрытые профили (омега-образные, прямоугольные трубы и др.), локальные изменения толщины;
- наполнители – пеноматериалы, пеноалюминий разной плотности (400–800 кг/м³), алюминиевые или арамидные соты, композиты [4];
- замена материала самих панелей на высокопрочную сталь, алюминиевые или магниевые сплавы, углепластик, стеклопластик или многослойные материалы;
- дополнительные соединительные элементы – накладки, подкосы, демпфирующие слои;
- способы крепления усилителей: традиционная точечная сварка, лазерная сварка, клеевые соединения, гибридные (сварка + клей), самопробивающие заклепки (SPR), клинч-соединения [11].

На основе результатов предварительных расчетов (DOE) в программе LS-OPT строится RBF-метамодель откликов (масса, максимальное проникновение). Для поиска глобального минимума массы при ограничениях по проникновению используется стратегия последовательного сокращения области поиска (SRSM), глобальная оптимизация выполняется адаптивным алгоритмом имитации отжига (ASA) или генетическим алгоритмом (GA), а локальная настройка параметров оптимизации – градиентным методом LFOP. В результате определяются оптимальные толщины выбранных ребер (или других усилителей) и, при необходимости, параметры наполнителя (например, плотность пеноалюминия).

Из топологической оптимизации уже известна допустимая область расположения сварных точек. Для каждой точки в этой области вводятся две переменные: непрерывная координата (одна или две, в зависимости от геометрии) и бинарный флаг (сохранить/удалить). Генетический алгоритм минимизирует штрафную целевую функцию, которая предлагается в виде:

$$F = n_{points} + \alpha \cdot \max(0, Intrusion - p_0) + \beta \cdot \sum \max\left(0, d_{min} - d_{ij}\right) \quad (1)$$

где $n_{points} = \sum b_i$ – количество сохраненных сварных точек ($b_i = 1$ – сварная точка сохранена, $b_i = 0$ – удалена); α, β – весовые коэффициенты; $Intrusion$ – максимальное проникновение среди всех контрольных точек, p_0 – допустимое проникновение; d_{ij} – расстояние между сварными точками i и j; d_{min} – минимально допустимое расстояние между сварными точками. Первое слагаемое ориентировано на уменьшение количества сварных точек, второе – на ограничение глубины вторжения в кабину, не допускающее превышения исходного значения (или предельного), третье – на соблюдение технологического ограничения по расстоянию между сварными точками.

После оптимизации полученные параметры (толщины рёбер, координаты сварных точек, а также возможные наполнители или материалы) проверяются прямым расчётом в LS-DYNA на той же упрощённой модели, которая использовалась на всех предыдущих этапах. Оцениваются максимальное проникновение, наличие разрушений соединений, энергопоглощение и характер деформирования. Если результаты не удовлетворяют требованиям, выполняется возврат к одному из предыдущих этапов (например, к выбору другого способа усиления или повторной топологической оптимизации). Если проверка на упрощённой модели прошла успешно, то те же оптимальные параметры проверяются на исходной высокоточной модели кузова. В ней проводится окончательная проверка пассивной безопасности — оцениваются проникновение, ускорения на сиденьях и анализируются возможности появления пластических шарниров. Если нет нарушений, конструкция считается приемлемой.

Предложенная методика универсальна: она может быть адаптирована под разные типы пикапов и коммерческих автомобилей, а перечисленные средства усиления (ребра, наполнители, материалы, способы соединения) могут комбинироваться в зависимости от требуемого уровня безопасности и ограничений по массе. Кроме того, методика допускает совместную оптимизацию с учетом других требований пассивной безопасности (например, фронтальный и боковой удары), а также вибрационных нагрузок (NVH), изгибных и крутильных жесткостных характеристик. Для этого необходимо на этапе постановки задачи добавить соответствующие ограничения или модифицировать целевую функцию, а при DOE и построении метамодели учитывать несколько нагрузочных режимов одновременно. Покажем эффективность работы методики на конкретном автомобиле – пикапе Chevrolet Silverado 1500. Исходные данные: масса автомобиля 2432 кг, грузоподъемность 888 кг.

Исходная модель, упрощение и верификация

Исходная высокоточная КЭМ (рис. 2а) содержала 2 961 444 элемента, 156 материалов, время одного расчета ≈186 ч. После упрощения (удаление остекления, дверей, отделки, укрупнение сетки до 10 мм в зоне проектирования и 15 мм на остальных деталях, замена части сварных соединений жесткими связями) получена модель средней точности с 396 396 элементами (рис. 2б). Время расчета сократилось до 2,5 ч – ускорение решения более чем в 70 раз.

Верификация упрощенной модели проводилась путем сравнения с исходной (высокоточной) по следующим характеристикам:

- ускорение автомобиля (рис. 3) – расхождение не более 5 %;

- скорость груза (рис. 4) – практически полное совпадение;
- максимальное проникновение (рис. 5) – расхождение ≤5 %;
- энергопоглощение основных элементов (табл. 1) – суммарная погрешность 6 %.



Рис. 2. Исходная (а) и упрощенная (б) конечно-элементные модели для салазкового испытания [1]

Таким образом, упрощенную модель признаем пригодной для последующих оптимизационных расчетов.

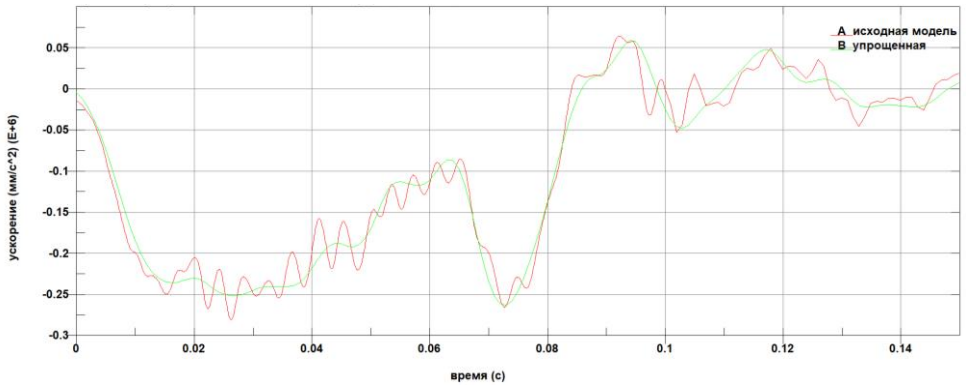


Рис. 3. Графики ускорений автомобиля

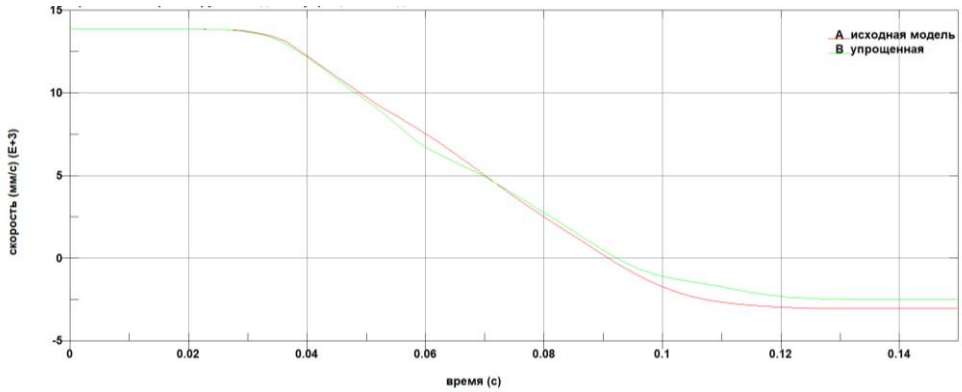


Рис. 4. Графики скоростей груза

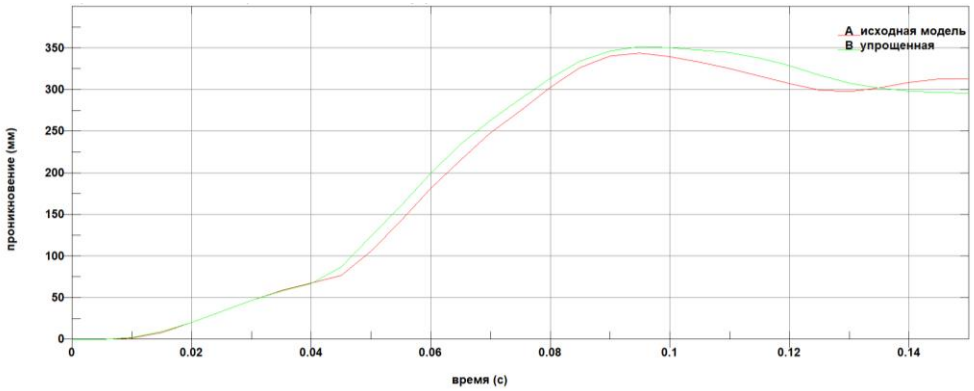


Рис. 5. Графики максимальных проникновений

Таблица 1

Энергопоглощение основных элементов

Поглощаемая энергия (кДж)	Исходная модель	Упрощенная модель	Погрешность
Передняя панель грузовой платформы	2,29	2,41	5%
Задняя стенка кабины	1,61	1,5	7%
Левая и правая стойки проема кабины	1,95 / 1,91	2,18 / 2,14	12% / 12%
Сумма	7,76	8,22	6%

Устранение разрушений сварных соединений

В базовой конфигурации (37 сварных точек, из которых 23 располагались вдоль нижней границы передней панели грузовой платформы) при срыве груза с креплений в процессе фронтального удара наблюдались массовые разрушения соединений, а проникновение груза в кабину значительно превышало допустимый уровень, делая конструкцию небезопасной (рис. 6.а). Чтобы исключить отказы, количество точек было увеличено до максимально возможного значения, определяемого технологическим ограничением – минимальным расстоянием между сварными точками 35 мм. С учетом размеров панели это число составило 52, из которых 34 расположились на нижней границе. Это обеспечило целостность сварки и снизило проникновение до 378 мм (ниже допустимого 510 мм, рис. 6.б). Данное значение принято в качестве исходной точки отсчета для последующих этапов оптимизации.

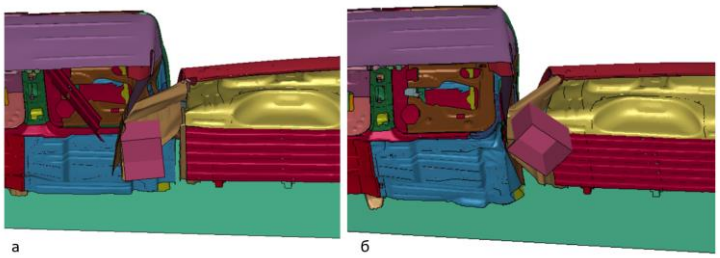


Рис. 6. Результаты моделирования (а - исходная конструкция; б - после усиления сварных соединений)

Совместная топологическая оптимизация панелей и зон сварки

Оптимизация выполнена методом HCA в LS-TaSC. На рис. 7 показана сходимость процесса – глобальная мера перераспределения масс (Mass Redistribution) падает ниже 0,02 после 28 итераций; оптимизация автоматически остановилась на 31-й итерации. На

рис. 8 – изменение массовой доли панелей, стабилизировавшееся на 0,30 (заданное ограничение).

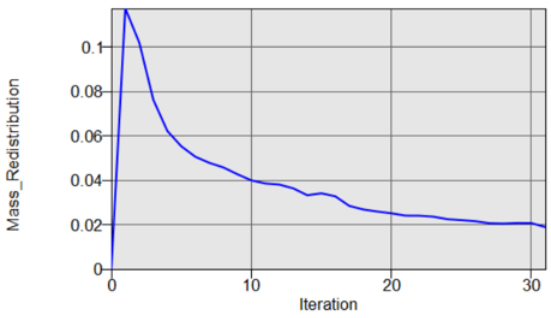


Рис. 7. История перераспределения масс по итерациям

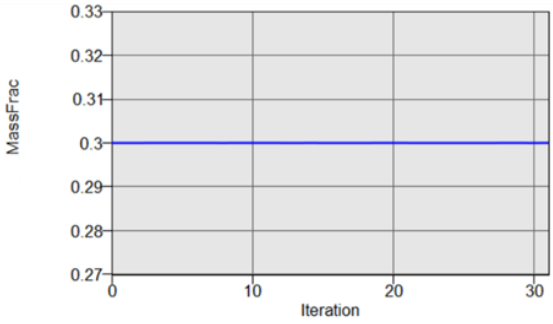


Рис. 8. График значения массовой доли панелей при итерациях

Результаты топологической оптимизации:

- зоны высокой плотности материала (рис. 9) совпали с существующими штампованными ребрами жесткости (добавление новых не требуется);
- допустимая область расположения сварных точек – только нижняя граница передней панели (рис. 10);
- количество сварных точек сокращено с 52 до 15 (на 71 %), при этом на нижней границе с 34 до 11 (сокращение на 68 %);
- масса панелей снижена с 5,83 до 1,75 кг (это промежуточный, не окончательный результат);
- максимальное проникновение – 382 мм.

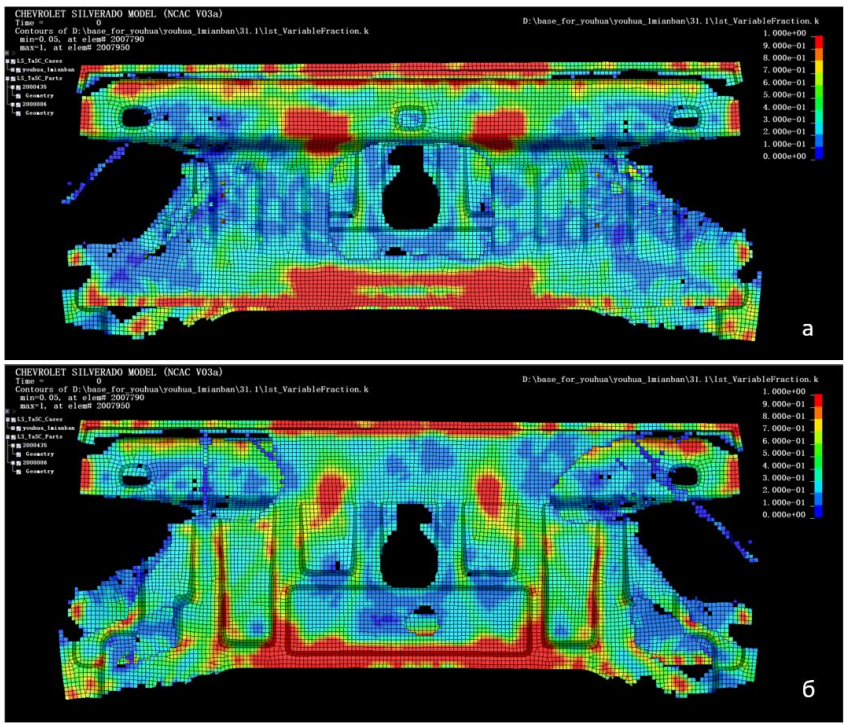


Рис. 9. Распределение относительной плотности в панелях после топологической оптимизации (а – вид сзади; б - вид спереди)

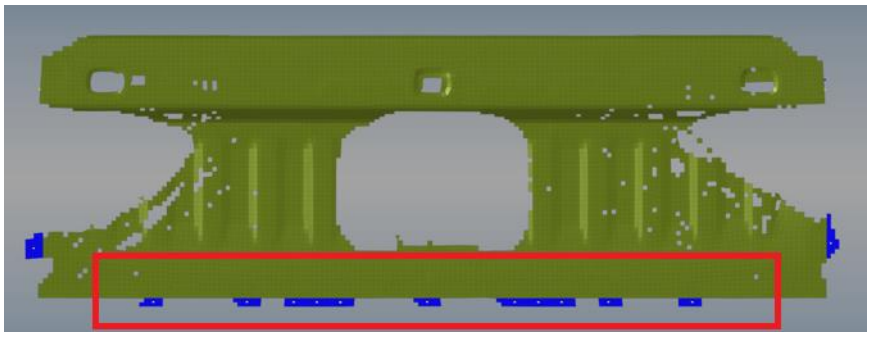


Рис. 10. Распределение сварных точек после топологической оптимизации – все точки сосредоточены на нижней границе (выделено красной рамкой)

Параметрическая оптимизация толщин ребер жесткости

На первом этапе параметрической оптимизации рассматривались 10 кузовных элементов (панели и штампованные усилители). Их обозначения приведены на рис. 11.

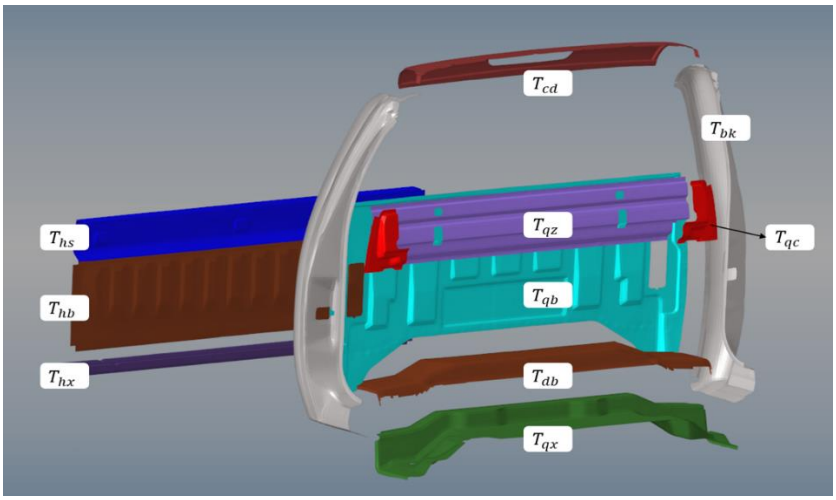


Рис. 11. Обозначения кузовных элементов (панелей и усилителей), использованные в DOE-анализе и параметрической оптимизации

Для выявления наиболее влияющих факторов были проведены DOE (80 точек, метод Space Filling) и анализ чувствительности (ANOVA). На рис. 12 представлены стандартизованные эффекты переменных для отклика «общая масса», на рис. 13 – влияние переменных на максимальное проникновение (боксплоты с 95% доверительным интервалом).

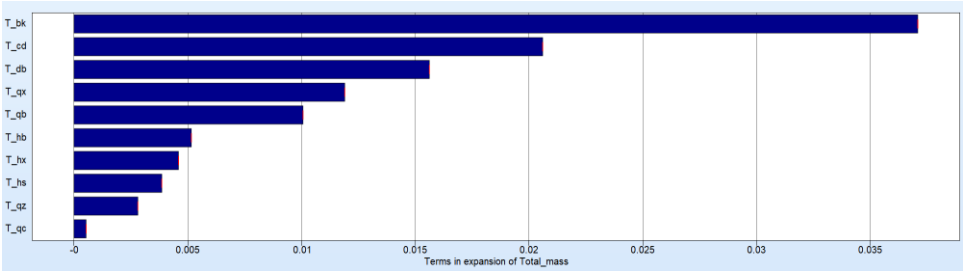


Рис. 12. Стандартизованные эффекты переменных для отклика «общая масса»

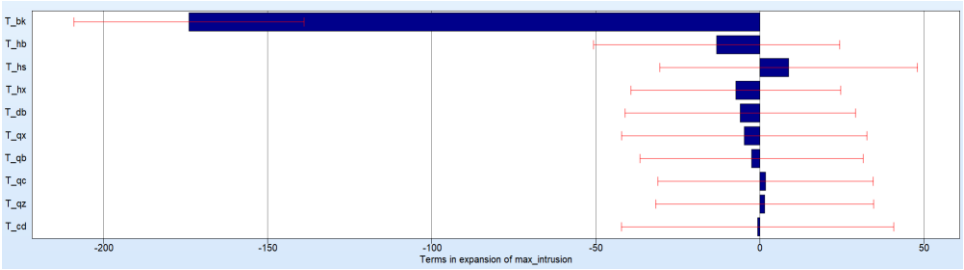


Рис. 13. Влияние переменных на максимальное проникновение (боксплоты)

Анализ показал, что три детали – T_{bk} (стойка С), T_{cd} (крыша) и T_{db} (пол) – являются основными элементами бокового силового пути и вносят определяющий вклад в обеспечение пассивной безопасности при боковом ударе. Хотя их влияние на отклик при фронтальном ударе статистически значимо, любое изменение их толщины в сторону уменьшения недопустимо по требованиям боковой защиты, а увеличение толщины нецелесообразно, поскольку приводит к росту массы без существенного улучшения показателей фронтальной безопасности. Поэтому данные детали были исключены из параметрической оптимизации и зафиксированы на номинальных значениях. Из оставшихся семи переменных для параметрической оптимизации выбраны T_{hb}, T_{hs}, T_{hx} и T_{qz}. Данный выбор обусловлен необходимостью ограничения числа проектных переменных (с учетом вычислительных затрат на построение метамодели) и их прямым участием в силовом пути передачи нагрузки от груза. Остальные три переменные имеют менее выраженное влияние на исследуемые отклики и зафиксированы на номинальных значениях.

Корреляционная матрица (рис. 14) подтверждает слабую связь между выбранными четырьмя переменными ($|r| < 0{,}3$), что позволяет их независимое варьирование.

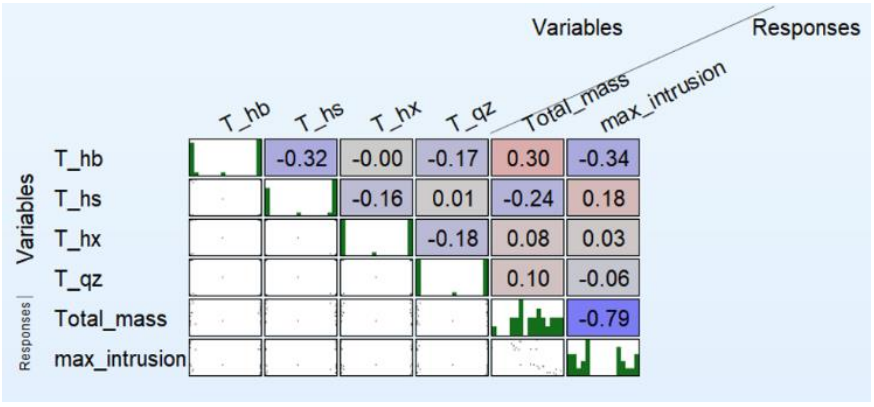


Рис. 14. Корреляционная матрица проектных переменных и откликов

Таким образом, для параметрической оптимизации приняты четыре переменные: T_{hb} (передний борт грузовой платформы), T_{hs} (верхний усилитель переднего борта), T_{hx} (нижний усилитель переднего борта) и T_{qz} (центральный усилитель задней панели).

Для аппроксимации откликов в пространстве четырех переменных построена RBF-метамодель на основе 80 точек Space Filling. Коэффициент детерминации $R^2 = 1{,}0$ для массы и $R^2 = 0{,}91$ для проникновения. Стратегия оптимизации – SRSM (максимум 8 итераций, фактически 3) с глобальным поиском ASA и локальной настройкой LFOP в LS-OPT.

Найденные оптимальные толщины приведены в табл. 2. Чтобы убедиться в точности метамодели, оптимальные толщины были проверены прямым расчётом в

LS-DYNA. Сравнение предсказания метамодели и реального расчета LS-DYNA (табл. 3) подтвердило погрешность 0 % по массе и 1,5 % по проникновению. Масса снижена с 20,40 до 19,38 кг (на 5 %), проникновение – 392 мм (запас 118 мм).

Таблица 2

Оптимальные толщины ребер

Переменная	Оптимальная толщина, мм	Отклонение от номинала, мм
T_{hb}	0,74	-0,32
T_{hs}	0,82	-0,24
T_{hx}	1,55	-0,04
T_{qz}	1,28	0,475

Таблица 3

Сравнение предсказания метамодели и прямого расчета

Параметр	Предсказание метамодели	Прямой расчет	Погрешность, %
Общая масса, кг	19,38	19,38	0
Макс. проникновение, мм	386	392	1,5

Параметрическая оптимизация количества и координат сварных точек

На этапе топологической оптимизации было установлено, что допустимая область расположения сварных соединений ограничивается исключительно нижней границей передней панели. В этой зоне после удаления избыточных точек осталось 11 соединений (из исходных 34 на нижней границе), с координатами X: –581, –386, –289, –240, –191, –11, 172, 221, 269, 367, 542 мм. Для дальнейшего снижения технологической сложности и массы (масса самих точек пренебрежимо мала, но их количество влияет на трудоемкость) была поставлена задача сократить число точек и одновременно уточнить их координаты при сохранении максимального проникновения на уровне 392 мм, достигнутом после параметрической оптимизации толщин.

Для каждой из 11 точек введены две группы проектных переменных: непрерывная координата (в пределах допустимой области, от –800 до 800 мм) и бинарная переменная, определяющая, сохраняется ли точка (1) или удаляется (0). Таким образом, общее число переменных составило 22. Оптимизация выполнялась генетическим алгоритмом (GA) в среде LS-OPT, поскольку такой подход эффективен для задач со смешанным типом переменных. Для снижения вычислительных затрат построена RBF-метамодель отклика «максимальное проникновение» на основе 150 точек латинского гиперкуба (погрешность метамодели не превышала 10 %). Целевая функция (1) является штрафной и подлежит минимизации. Она включает в себя следующие три компонента: количество сохраненных сварных точек; штраф за превышение допустимой глубины проникновения (392 мм); штраф за нарушение минимального технологического расстояния между сварными точками (35 мм). Окончательно она приобретает вид:

$$F = n_{points} + 10 \cdot \max(0, Intrusion - 392) + 5 \cdot \sum \max(0{,}35 - d_{ij}) \qquad (2)$$

В результате оптимизации была удалена одна точка сварки. Координаты всех сварных точек после оптимизации приведены в табл. 4. Была уделена точка сварки с координатой –11 мм, расположенная близко к центру панели, где распределение грузовой нагрузки равномерно, и после незначительного смещения её функции могут быть взяты на себя соседними точками. После оптимизации расположение сварных точек приобрело в целом симметричный характер, что соответствует симметричной геометрии кузова и условиям столкновения в области центра нагрузки. Расстояние между соседними сварными точками составляет от 38 до 52 мм, что соответствует

требованию ≥35 мм. Прямые расчеты в программе LS-DYNA подтвердили, что максимальная глубина пробива не превышает 392 мм.

Таблица 4

Координаты точечных сварных соединений до и после оптимизации

Номер точки	Исходная координата, мм	Оптимальная координата, мм	Бинарная переменная
1	-581	-540	1
2	-386	-364	1
3	-289	-245	1
4	-240	-192	1
5	-191	-86	1
6	-11	-	0
7	172	83	1
8	221	189	1
9	269	247	1
10	367	363	1
11	542	541	1

Таким образом, благодаря параметрической оптимизации координат сварных точек при выполнении требований пассивной безопасности количество сварных точек на нижнем крае передней перегородки грузового отсека удалось дополнительно сократить с 11 до 10 (сокращение на 9 %).

Общий результат применения методики

Применение данной методики к пикапу Chevrolet Silverado позволило решить проблему недопустимого проникновения груза в кабину и снизить массу кузова. На этапе предварительного усиления сварных соединений удалось устранить разрушения, увеличив общее число точек с 37 до 52 (на нижней границе – с 23 до 34). После этого максимальное проникновение снизилось до 378 мм, что ниже допустимого значения 510 мм. Далее топологическая оптимизация (HCA) позволила сократить общее количество сварных точек на 71 % (с 52 до 15, в том числе на нижней границе – с 34 до 11) при незначительном изменении проникновения до 382 мм. Зоны высокой плотности материала, выявленные на этом этапе, совпали с существующими штампованными ребрами жесткости, что исключило необходимость добавления новых силовых элементов.

На этапе параметрической оптимизации толщин ребер из десяти исходных элементов выделены четыре наиболее влияющих (T_{hb}, T_{hs}, T_{hx} и T_{qz}). Оптимальные толщины (0,74; 0,82; 1,55; 1,28 мм) позволили снизить массу панелей на 5 % (с 20,40 до 19,38 кг) при сохранении проникновения на уровне 392 мм. Заключительная параметрическая оптимизация координат сварных точек дала дополнительное сокращение на нижней границе стенки с 11 до 10 точек (на 9 %) без изменения величины проникновения. В итоге общее количество сварных точек сократилось с 37 до 14 (снижение на 62 %), а на нижней границе – с 23 до 10.

Деформированное состояние итоговой конструкции в момент максимального проникновения показано на рис. 15. Там видно отсутствие локальных складок и разрушений, жизненное пространство сохранено. Раздельная оптимизация толщин и координат сварных точек (декомпозиция задачи) позволила сократить вычислительные затраты в 1,8 раза по сравнению с полной совместной оптимизацией (40 переменных) при расхождении по массе менее 5 %.



Рис. 15. Деформированное состояние кабины после всех этапов оптимизации (максимальное проникновение 392 мм)

Таким образом, работоспособность предложенной методики подтверждена на реальной модели автомобиля. Достигнутые количественные результаты могут служить ориентиром для инженерных разработок аналогичных конструкций.

Выводы

В работе разработана и апробирована методика оптимизации силовых элементов и точечных сварных соединений кузова пикапа, направленная на обеспечение пассивной безопасности при минимальной массе. Методика включает упрощение конечно-элементной модели с верификацией, предварительное усиление сварных соединений для устранения разрушений, совместную топологическую оптимизацию, последующую параметрическую оптимизацию толщин ребер жесткости и координат сварных точек и проверочные расчеты. При этом использовалась специально разработанная для многовариантных расчетов модель сварного соединения. Все этапы реализованы в единой блок-схеме, что обеспечивает системность подхода.

На примере сценария фронтального столкновения пикапа Chevrolet Silverado при применении методики поиска оптимальных параметров кузова и сварных точек в нем были получены следующие результаты:

1) устранены разрушения точечных сварных соединений и максимальное проникновение снижено в 4 раза (с более чем 1500 мм до 392 мм при допустимом 510 мм, запас 118 мм);

2) общее количество сварных точек сокращено на 62%, в том числе на нижней границе (между стенкой и полом) передней стенки грузового отсека сокращено на 57%;

3) за счет параметрической оптимизации толщин ребер жесткости масса панелей и силовых элементов снижена на 5% (с 20,40 кг до 19,38 кг);

Однако следует отметить, что в данной работе не учитывались боковые столкновения, изгибные и крутильные нагрузки, а также вибрационные режимы (NVH). Поэтому полученные результаты справедливы только для режима удара грузом по передней панели при фронтальном ударе автомобиля. При учете других эксплуатационных нагрузок (боковой удар, изгиб, кручение, NVH) сокращение числа сварных точек будет существенно меньшим или невозможным. Для практического применения требуется дополнительная проверка при всех нормативных режимах.

Фактически данная методика сохраняет возможность многоцелевой оптимизации, то есть, путем добавления соответствующих ограничительных условий, позволяет одновременно учитывать различные условия эксплуатации (боковые столкновения, NVH, жесткость) [17]. Таким образом, данная методика оптимизации применима в более

широкой постановке, что весьма полезно в работе по проектированию кузовов автомобилей.

Список литературы

1. Ван Ч., Зузов В. Н., Солопов Д. Ю. Обоснование нагрузочных режимов испытаний на пассивную безопасность грузопассажирских автомобилей //Труды НГТУ им. РЕ Алексеева. – 2024. – №. 1 (144). – С. 70-82.

2. Luk J. M. et al. Review of the fuel saving, life cycle GHG emission, and ownership cost impacts of lightweighting vehicles with different powertrains //Environmental science & technology. – 2017. – Т. 51. – №. 15. – С. 8215-8228.

3. Lian F. et al. Multi-objective optimization of lightweight and crashworthiness of automotive front-end structures based on stacked regression surrogate //Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2025. – Т. 155. – С. 111138.

4. Гончаров Р. Б., Зузов В. Н., Чайко Д. Н. Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – №. 3 (87). – С. 3. – DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1856.

5. Roux W., Gandikota I., Yi G. Constrained multidisciplinary topology optimization //16th Int. LS-DYNA® Users Conf. – 2020.

6. Ван Ч., Зузов В.Н. Усовершенствованная модель сварного (заклепочного) соединения в кузовах легковых автомобилей для оптимизационных расчетов при ударных нагрузках // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2026. №. 5(173).

7. Raeisi S., Arcos-Legarda J., Tovar A. Control-based structural optimization for crashworthiness using adaptive hybrid cellular automata //Engineering Optimization. – 2026. – С. 1-28.

8. Zhuang J., Zeng F. Research and experimental verification of an efficient subframe lightweighting method integrating SIMP topology and size optimization //Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – №. 15. – С. 8192.

9. Вдовин Д.С. Разработка методики проектирования несущих систем колесных машин, выполненных с использованием сварных точечных и клеесварных соединений: дис… канд. техн. наук. Москва, 2007.

10. Zhuang J., Zeng F. Research and experimental verification of an efficient subframe lightweighting method integrating SIMP topology and size optimization //Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – №. 15. – С. 8192.

11. Лю И., Зузов В. Н. Моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при динамическом и ударном нагружении с использованием модифицирования свойств материала //Будущее машиностроения России. – 2022. – С. 117-127.

12. Wada N. et al. Topology Optimization Method for Vehicle Body Structure to Meet Multiple Performance Requirements for Body Stiffness, Crashworthiness and NVH at the Same Time //Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan. – 2024. – Т. 55. – №. 1.

13. Kim H. et al. Multi-Physics Topology Optimization and Neural Network–Based Design of Experiments for Lightweight Automotive Cast Components. – 2026. – №. 2026-01-0510.

14. Duddeck F. Multidisciplinary optimization of car bodies // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2008. – Т. 35. – № 4. – С. 375-389.

15. Wang P., Zheng S., Wu G. Multidisciplinary design optimization of vehicle body structure based on collaborative optimization and multi-objective genetic algorithm //Journal of Mechanical Engineering. – 2011. – Т. 47. – №. 2. – С. 102-108.

16. Craig K. J. et al. Multidisciplinary design optimization of automotive crashworthiness and NVH using LS-Opt //Proceedings from 7th International Ls-dyna User's Conference. – 2002.

17. Stander N. et al. Reliability-based Multi-Objective Optimization and Visualization using LS-OPT® Version 4. – 2009.

References

1. Wang, Ch., Zuzov, V.N., and Solopov, D.Yu. "Justification of load modes for passive safety tests of passenger-and-freight vehicles." Transactions of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev 144.1 (2024): 70-82 (in Russian).

2. Luk, Jason M., et al. "Review of the fuel saving, life cycle GHG emission, and ownership cost impacts of lightweighting vehicles with different powertrains." Environmental science & technology 51.15 (2017): 8215-8228.

3. Lian, F., et al. "Multi-objective optimization of lightweight and crashworthiness of automotive front-end structures based on stacked regression surrogate." Engineering Applications of Artificial Intelligence 155 (2025): 111138.

4. Goncharov, R.B., Zuzov, V.N., and Chaiko, D.N. "Modeling the behavior of thin-walled tubes with different fillers under ultimate loading with application to solving automotive passive safety problems." Engineering Journal: Science and Innovations 87.3 (2019): 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1856 (in Russian).

5. Roux, W., Gandikota, I., and Yi, G. "Constrained multidisciplinary topology optimization." 16th International LS-DYNA Users Conference, 2020.

6. Wang Z., Zuzov V.N. "Improved Model of Welded (Riveted) Joints in Passenger Car Bodies for Optimization Calculations under Impact Loads." Engineering Journal: Science and Innovation 173 (2026) (in Russian).

7. Raeisi, S., Arcos-Legarda, J., and Tovar, A. "Control-based structural optimization for crashworthiness using adaptive hybrid cellular automata." Engineering Optimization (2026): 1-28.

8. Zhuang, J., and Zeng, F. "Research and experimental verification of an efficient subframe lightweighting method integrating SIMP topology and size optimization." Applied Sciences 15.15 (2025): 8192.

9. Vdovin, D.S. "Development of a methodology for designing load-bearing systems of wheeled vehicles using spot and adhesive-welded joints." Ph.D. thesis, Moscow, 2007 (in Russian).

10. Zhuang, J., and Zeng, F. "Research and experimental verification of an efficient subframe lightweighting method integrating SIMP topology and size optimization." Applied Sciences 15.15 (2025): 8192.

11. Liu, Y., and Zuzov, V.N. "Modeling of adhesive joints in automotive structures under dynamic and impact loading using material property modification." Future of Mechanical Engineering in Russia, 2022, pp.117-127 (in Russian).

12. Wada, N., et al. "Topology optimization method for vehicle body structure to meet multiple performance requirements for body stiffness, crashworthiness and NVH at the same time." Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan 55.1 (2024).

13. Kim, H., et al. "Multi-physics topology optimization and neural network-based design of experiments for lightweight automotive cast components." SAE Technical Paper 2026-01-0510, 2026.

14. Duddeck, F. "Multidisciplinary optimization of car bodies." Structural and Multidisciplinary Optimization 35.4 (2008): 375-389.

15. Wang, P., Zheng, S., and Wu, G. "Multidisciplinary design optimization of vehicle body structure based on collaborative optimization and multi-objective genetic algorithm." Journal of Mechanical Engineering 47.2 (2011): 102-108.

16. Craig, K.J., et al. "Multidisciplinary design optimization of automotive crashworthiness and NVH using LS-Opt." Proceedings of the 7th International LS-DYNA User's Conference, 2002.

17. Stander, N., et al. "Reliability-based multi-objective optimization and visualization using LS-OPT® Version 4." Technical report, 2009.

Wang Zhenyu, Zuzov V. N.

METHODOLOGY FOR OPTIMIZATION OF THE BODY AND SPOT WELDS OF A CARGO-PASSENGER VEHICLE FOR PASSIVE SAFETY AND MINIMUM MASS UNDER FRONTAL IMPACT WITH CARGO IMPACT ON THE CAB

Abstract. *In our previous work, a frontal impact loading regime for a cargo-passenger vehicle was substantiated, in which the cargo breaks loose from its restraints, shifts forward, crumples the front panel of the loading platform and the rear wall of the cab (with possible penetration through them), creating a direct threat to the driver and passengers. Based on this regime, a methodology for improving the body structure of a cargo-passenger vehicle is proposed, ensuring passive safety at minimum mass. The methodology includes five main stages implemented in accordance with the developed flowchart: 1) creation and verification of a simplified finite element model (calculation acceleration by approximately 70 times with an error of ≤8 %); 2) preliminary reinforcement of welded joints; 3) combined topological optimization of panels and weld zones to identify high-density material regions and the allowable area for spot-weld placement; 4) parametric optimization of stiffener thicknesses and parametric optimization of the number and coordinates of spot welds; 5) verification calculations. As a result of applying the methodology to a Chevrolet Silverado pickup truck, weld failures are eliminated, maximum penetration is reduced by a factor of 4 to 392 mm (below the allowable 510 mm), the number of spot welds is reduced by 62 %, and the mass of panels and reinforcements is decreased by 5 %.*

Keywords: *finite element model, optimization methodology, pickup truck, passive safety, frontal impact, cargo-passenger vehicle, LS-DYNA*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Ван Чжэньюй Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ), г. Москва, Россия аспирант e-mail: wandercn@mail.ru	**Wang Zhengyu** Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia Postgraduate student e-mail: wandercn@mail.ru
Зузов Валерий Николаевич Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ), г. Москва, Россия доктор технических наук, профессор e-mail: valeryzuz@yandex.ru	**Zuzov Valery Nikolaevich** Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia Doctor of Technical Sciences, Professor e-mail: valeryzuz@yandex.ru

УДК 625.76.08:519.254

Корытов М.С., Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю., Кашапова И.Е.

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НЕРОВНОСТИ МИКРОРЕЛЬЕФА ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАЗЕМНОЙ МАШИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИАЛЬНЫХ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ

Аннотация. *Моделирование микрорельефа опорной поверхности актуально при исследовании рабочих процессов наземных транспортно-технологических машин, поскольку взаимодействие машины с неровностями микрорельефа оказывает влияние на безопасность и эффективность ее работы. Взаимодействие ходовых элементов с неровностями вызывает вибрации и динамические воздействия, влияет на устойчивость машины. Для математического описания сложных пространственных микрорельефов используют поле высот. В настоящей работе рассмотрена возможность интерполяции отдельной неровности микрорельефа опорной поверхности методом радиальных базисных функций, который обеспечивает жесткость и одновременно гладкость интерполированной поверхности. Исследуется влияние шага дискретизации равномерно расположенных опорных точек, их смещений в горизонтальном направлении относительно центра выступа и параметра аналитического выражения поверхности, на точность интерполяции. Эталонная поверхность в качестве примера была задана аналитическим выражением, описывающим радиально симметричный выступ. Для интерполяции формировалась матрица входов и вычислялись весовые коэффициенты всех опорных точек. Относительная погрешность интерполяции определялась на основе сравнения интерполированных и истинных значений, где последние получены по аналитическому выражению. Увеличение шага дискретизации и смещений точек на величины до половины шага точек ухудшает точность интерполяции. Напротив, центрирование сетки опорных точек относительно центра выступа минимизирует погрешность интерполяции. Метод интерполяции с использованием радиальных базисных функций показал эффективность как при мелком, так и при крупном шаге дискретизации опорных точек. Его использование перспективно при исследовании не только микрорельефа, но и рабочих процессов наземных машин.*

Ключевые слова*: микрорельеф, выступ, интерполяция радиальные базисные функции, трехмерный, наземная машина.*

Постановка задачи

Моделирование неровностей микрорельефа опорной поверхности под опорными ходовыми элементами наземных транспортно-технологических машин является актуальной задачей, поскольку позволяет исследовать целый ряд важных процессов, сопровождающих движение наземной машины, ее рабочий процесс и влияющих на безопасность, качество и эффективность ее работы.

Взаимодействие ходовых опорных элементов, в частности, пневмоколес или гусеничного движителя машины, с неровностями микрорельефа опорной поверхности при движении машины является одним из основных источников динамических воздействий и вибраций, которые передаются через базовое шасси машины на кабину и на сиденье оператора, а также влияют на неуправляемые перемещения рабочего органа [1, 2, 3].

Указанные динамические воздействия и вибрации вызывают повышенный износ ходового оборудования, подвески и других узлов, приводят к снижению внимания операторов и вызывают у них профессиональные заболевания [4, 5, 6].

Устойчивость наземной машины при движении также напрямую зависит от геометрических параметров неровностей микрорельефа под ее ходовыми опорными элементами [7, 8, 9].

Моделирование неровностей микрорельефа необходимо и при исследовании свойств гусеничного движителя, пневматических шин машины, ее подвески, а также других элементов ходовой части наземной машины [10, 11, 12].

При моделировании микрорельефа под опорными ходовыми элементами машины наиболее широкое распространение получил способ, когда высоты точек профиля и корреляционные функции задаются и рассчитываются отдельно по левой и правой колеям машины [13, 14].

Для сложных пространственных профилей опорной поверхности микрорельеф может быть описан с помощью поля или массива высот [15, 16]. Это более универсальный способ, т.к. он позволяет задавать и исследовать сравнительно более сложные, трехмерные поверхности микрорельефа [17, 18].

В случае, если значения высот трехмерной поверхности микрорельефа под опорными ходовыми элементами наземной транспортно-технологической машины заданы на виде в плане, т.е. сверху, в виде разбросанных данных неравномерно распределенных точек или на регулярной сетке, возникает задача интерполяции значений высот поверхности в промежуточных точках между заданными [19].

Интерполяция поверхности методом радиальных базисных функций [20, 21, 22] имеет преимущества в виде жесткости, когда поверхность проходит через все заданные точки, и одновременно гладкости получаемой интерполированной поверхности. Указанных преимуществ лишены другие широко распространенные методы интерполяции: при помощи глобального полинома и триангуляции. Глобальный полином, аппроксимирующий всю поверхность, в общем случае не проходит через все заданные опорные точки, т.е. этот метод не является жестким. Метод триангуляции построением треугольников по опорным точкам, хотя и обладает жесткостью, имеет сравнительно невысокую точность интерполяции, особенно при малом количестве заданных опорных точек и большом шаге дискретизации их координат [23].

Целесообразно провести исследование возможностей интерполяции методом радиальных базисных функций [23], в частности, возникающих при этом погрешностей, в зависимости от шага дискретизации заданных опорных точек на пространственной эталонной поверхности отдельного симметричного выступа микрорельефа.

В настоящей работе рассматривались опорные точки на регулярной сетке горизонтальных координат x и y. Задана, в качестве примера, эталонная поверхность отдельного, симметричного в горизонтальном плане выступа микрорельефа, описываемая некоторым аналитическим выражением $z = f(x, y)$.

В пределах рассматриваемой квадратной области, размеры которой ограничены вдоль горизонтальных координат x, y, на эталонной поверхности выступа, по описывающему ее аналитическому выражению $z = f(x, y)$, определены вертикальные

координаты множества заданных опорных точек, которые расположены на равномерной горизонтальной сетке с шагом дискретизации xy_{step} как вдоль координаты x, так и вдоль координаты y. Указанное множество опорных точек может при этом иметь как нулевое, так и положительное смещение вдоль горизонтальных осей x и y. При нулевом смещении вдоль обеих горизонтальных осей, расположенная в центре множества опорная точка будет иметь нулевые горизонтальные координаты x, y, т.е. совпадать с началом координат (рис. 1, а). При положительном смещении вдоль обеих осей – та же центральная точка будет иметь две положительные координаты Dx и Dy (рис. 1, б).

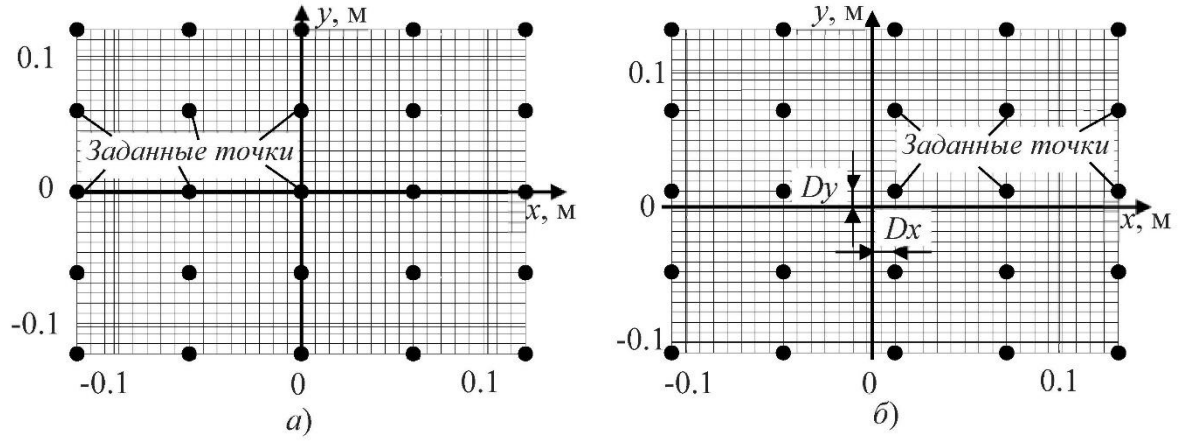


Рис. 1. Варианты смещений множества из 25 заданных опорных точек на поверхности выступа микрорельефа, относительно начала координат (примеры): а) нулевые смещения ($Dola_{Dx}$=0; $Dola_{Dy}$=0); б) положительные смещения ($Dola_{Dx}$=0.2; $Dola_{Dy}$=0.2)

Все полученные по аналитическому выражению $z = f(x, y)$ значения вертикальных координат поверхности выступа, в том числе в заданных опорных точках, приняты за истинные значения. Особенность исследуемого аналитического выражения $z = f(x, y)$ в том, что точка поверхности выступа, имеющая максимальную вертикальную координату z, всегда расположена в начале системы координат: x=0, y=0.

Область, в пределах которой рассматривается выступ, ограничивается размерами в горизонтальном плане $\left[2 \cdot XY_{\min\max} \times 2 \cdot XY_{\min\max}\right]$, где XY_{minmax} – параметр, который задает половину стороны квадрата рассматриваемой области в горизонтальной плоскости.

В качестве исходных параметров задачи, кроме XY_{minmax}, выступают: XY_{step} – сравнительно малый шаг дискретизации горизонтальных координат при вычислении значений функции высоты в интерполируемых промежуточных точках методом радиальных базисных функций; xy_{step} – сравнительно большой шаг дискретизации горизонтальных координат заданных опорных точек на эталонной поверхности; k, A_{true}, c_1 – параметры приведенного ниже аналитического выражения $z = f(x, y)$, описывающего истинную форму эталонной поверхности симметричного выступа микрорельефа; $Dola_{Dx}$, $Dola_{Dy}$ – смещения всего множества заданных опорных точек относительно начала системы координат, в направлениях горизонтальных осей системы координат x и y соответственно, заданные в долях от величины шага опорных точек xy_{step} (см. рис. 1).

Горизонтальные смещения множества опорных точек, заданные в долях от их шага, позволили исследовать несимметричность расположения множества опорных точек относительно центра выступа.

Необходимо исследовать влияние шага дискретизации горизонтальных координат опорных точек xy_{step}, двух смещений множества опорных точек вдоль осей x и y, параметров аналитического выражения выступа микрорельефа на точность интерполяции вертикальных координат поверхности выступа.

Основная часть

Функциональная зависимость значений вертикальной координаты z эталонной поверхности выступа от значений горизонтальных координат x и y была в качестве примера представлена следующим аналитическим выражением, представляющим собой сумму двух элементарных сигмоидальных функций [24]:

$$z(x,y) = A/(e^{k\left(c_1-\sqrt{x^2+y^2}\right)}+1) + A/(e^{-k\left(c_2-\sqrt{x^2+y^2}\right)}+1) - A, \quad (1)$$

где A – максимальное значение функции, м; k – постоянный коэффициент крутизны нарастания и спада значения вертикальной координаты z в радиальном направлении; c_1 и c_2 – постоянные коэффициенты, определяющие значения координат локальных центров нарастания и спада вертикальной координаты в радиальном направлении, м. При симметричной форме выступа c_1=–c_2.

Данная функциональная зависимость имеет графический вид радиально симметричной поверхности с максимумом в точке начала горизонтальных координат. Функция стремится к нулевым значениям в пределах на минус и плюс бесконечности обеих горизонтальных координат.

Для обеспечения равенства фактического максимума вертикальной координаты выступа поверхности z заданному значению максимума A_{true}, значение A в выражении (1) определялось по зависимости:

$$A = A_{true}(1+e^{(k\cdot(c_2-c_1))/2})/(e^{(k\cdot(c_2-c_1))/2}-1). \quad (2)$$

Абсолютные смещения опорных точек вдоль осей горизонтальных координат вычислялись по зависимостям:

$$Dx = Dola_{Dx}\cdot xy_{step};\ Dy = Dola_{Dy}\cdot xy_{step}. \quad (3)$$

Для коррекции размеров в плане рассматриваемой области с учетом смещений с использованием функции округления вниз до целого числа, рассчитывалось количество шагов дискретизации заданных опорных точек от начала координат вдоль координатных осей в положительном n_{x+}, n_{y+} и отрицательном n_{x-}, n_{y-} направлениях соответственно:

$$n_{x-} = \left\lfloor \frac{XY_{\min\max}+Dx}{xy_{step}} \right\rfloor;\ n_{x+} = \left\lfloor \frac{XY_{\min\max}-Dx}{xy_{step}} \right\rfloor; n_{y-} = \left\lfloor \frac{XY_{\min\max}+Dy}{xy_{step}} \right\rfloor;\ n_{y+} = \left\lfloor \frac{XY_{\min\max}-Dy}{xy_{step}} \right\rfloor \quad (4)$$

Формировались два вектора горизонтальных координат множества заданных опорных точек с шагом xy_{step}:

$$x = \begin{pmatrix} Dx-n_{x-}\cdot xy_{step}, Dx-n_{x-}\cdot xy_{step}+xy_{step}, Dx-n_{x-}\cdot xy_{step}+2\cdot xy_{step},..., \\ Dx, Dx+xy_{step}, Dx+2\cdot xy_{step},..., Dx+n_{x+}\cdot xy_{step} \end{pmatrix};\ .$$
$$y = \begin{pmatrix} Dy-n_{y-}\cdot xy_{step}, Dy-n_{y-}\cdot xy_{step}+xy_{step}, Dy-n_{y-}\cdot xy_{step}+2\cdot xy_{step},..., \\ Dy, Dy+xy_{step}, Dy+2\cdot xy_{step},..., Dy+n_{y+}\cdot xy_{step} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Также формировались два аналогичных вектора горизонтальных координат множества промежуточных интерполируемых точек с малым шагом XY_{step}, в которых выполнялось интерполирование с последующей проверкой точности:

$$X = \left(Dx-n_{x-}\cdot xy_{step}, Dx-n_{x-}\cdot xy_{step}+XY_{step}, Dx-n_{x-}\cdot xy_{step}+2\cdot XY_{step},..., Dx+n_{x+}\cdot xy_{step}\right)$$
$$Y = \left(Dy-n_{y-}\cdot xy_{step}, Dy-n_{y-}\cdot xy_{step}+XY_{step}, Dy-n_{y-}\cdot xy_{step}+2\cdot XY_{step},..., Dy+n_{y+}\cdot xy_{step}\right). \quad (6)$$

Векторы координат промежуточных точек по (6) формировались в тех же пределах, что и векторы координат опорных точек по (5), но с малым шагом XY_{step}.

На декартовой сетке двух аргументов горизонтальных координат x и y опорных точек (5), по формуле (1) формировалась двухмерная таблица значений z опорных точек.

Аналогично, на декартовой сетке двух аргументов горизонтальных координат X и Y промежуточных интерполируемых точек (6), по формуле, аналогичной (1), формировалась двухмерная таблица их истинных значений Z_{true}:

$$Z_{true}(X,Y) = A/(e^{k\left(c_1-\sqrt{X^2+Y^2}\right)}+1)+A/(e^{-k\left(c_2-\sqrt{X^2+Y^2}\right)}+1)-A. \quad (7)$$

Матрица входа для интерполяции методом радиальных базисных функций имела вид [23]:

$$Matrix_{input} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z(1,1) \\ x_1 & y_2 & z(1,2) \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_j & z(i,j) \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{nx} & y_{ny} & z(nx,ny) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где целочисленные индексы $i \in [1; nx]$, $j \in [1; ny]$, соответствующие координатам x и y, изменялись в двух вложенных циклах; максимальные значения индексов принимали значения $nx = n_{x-} + n_{x+} + 1$; $ny = n_{y-} + n_{y+} + 1$.

Матрица входа $Matrix_{input}$ имеет $n_{rt} = nx \cdot ny$ строк. Каждая строка соответствует одной опорной точке.

Далее на основе значений элементов первых двух столбцов матрицы входов $Matrix_{input}$ вычисляются декартовы расстояния $r(i, j)$ в плане, то есть по горизонтали, между всеми опорными точками попарно. В обозначении расстояний $r(i,j)$ индексы i и j изменяются от 1 до n_{rt} каждый, и обозначают номера двух опорных точек.

На основе значений попарных декартовых расстояний между опорными точками $r(i,j)$, формируется квадратная матрица RBF_{korn}, элементы которой вычисляются по формуле полигармонического сплайна [23]:

$$RBF_{korn}(i,j) = \left(r(i,j)\right)^2 \cdot \ln\left(r(i,j)\right). \quad (9)$$

Вычисляются весовые коэффициенты каждой опорной точки в виде решения системы линейных алгебраических уравнений, в которой матрицей коэффициентов выступает RBF_{korn}.

Столбец правых частей, т.е. свободных членов системы линейных алгебраических уравнений обозначен символом *Right*. Это правый столбец матрицы исходных данных $Matrix_{input}$, в котором приведены вертикальные координаты опорных точек:

$$Right = Matrix_{input}(1{:}n_{rt}, 3). \quad (10)$$

В матричной форме система линейных алгебраических уравнений имеет вид:

$$RBF_{korn} \cdot w = Right, \quad (11)$$

где w – столбец искомых весовых коэффициентов, *Right* – столбец свободных членов.

Однократное решение системы линейных алгебраических уравнений (11) позволяет получить вектор w весовых коэффициентов опорных точек длиной n_{rt}.

Интерполированное значение функции вертикальной координаты Z_{in} в каждой интерполируемой точке *Point* из множества $\{X,Y\}$, сформированного по (6), вычисляется как сумма слагаемых, число которых равно числу опорных точек с индексом j. Каждое слагаемое суммы – это произведение весового коэффициента опорной точки $w(j)$ и

текущего значения $RBF_{tek}(j)$ радиальной базисной функции опорной точки с индексом j относительно интерполируемой точки *Point*:

$$Z_{in} = \sum_{j=1}^{n_{rt}} \left(w(j) \cdot RBF_{tek}(j) \right). \quad (12)$$

Текущее значение радиальной базисной функции опорной точки j $RBF_{tek}(j)$ относительно интерполируемой точки *Point* определяется по зависимости, аналогичной зависимости (9):

$$RBF_{tek} = \left(r(j) \right)^2 \cdot \ln\left(r(j) \right), \quad (13)$$

где $r(j)$ – декартово расстояние от интерполируемой точки *Point* до опорной точки с индексом j.

Для декартовой сетки двух аргументов горизонтальных координат X и Y с индексами i и j соответственно определяются значения абсолютной погрешности интерполяции для каждой интерполируемой точки из множества (6) путем сравнения интерполированного значения Z_{in} и истинного значения Z_{true} вертикальной координаты поверхности выступа:

$$\Delta(i, j) = \left| Z_{true}(i, j) - Z_{in}(i, j) \right|, \quad (14)$$

где индексы i и j изменяются в тех же пределах, что и в матрице входа (8).

Максимальная абсолютная погрешность интерполяции определялась как максимальный элемент множества $\Delta(X,Y)$, определенного по (11):

$$\Delta_{\max} = \max\left(\Delta(X, Y) \right). \quad (15)$$

При этом запоминались значения горизонтальных координат, при которых погрешность интерполяции максимальна.

В качестве окончательного выходного показателя оценки точности интерполяции выступала максимальная относительная погрешность интерполяции *PPM*, приведенная к наибольшей высоте выступа A_{true} и выраженная в процентах:

$$PPM = 100 \cdot \frac{\Delta_{\max}}{A_{true}}. \quad (16)$$

По формуле, аналогичной (16), определялись также значения приведенных относительных погрешностей интерполяции $\delta(X,Y)$ в каждой интерполируемой точке:

$$\delta(X, Y) = 100 \cdot \frac{\Delta(X, Y)}{A_{true}}. \quad (17)$$

В настоящей работе было исследовано также влияние перечисленных выше входных параметров модели: шага дискретизации опорных точек, смещений множества опорных точек, параметров аналитического выражения выступа микрорельефа на значение *KPM* – кривизны радиального сечения эталонной поверхности выступа в точке, где достигается максимальная относительная погрешность интерполяции *PPM*.

Для произвольной точки на эталонной поверхности выступа кривизна точки сечения определялась в сечении эталонной поверхности вертикальной плоскостью, проходящей через начало координат, где располагается центр выступа, и рассматриваемую точку. Учитывая симметричный характер формы эталонной поверхности выступа, кривизна любой точки на эталонной поверхности определялась только радиусом r текущей точки в горизонтальном направлении относительно начала координат:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (18)$$

Аналитическое выражение вертикальной координаты точки на линии радиального сечения эталонной поверхности выступа, в зависимости от горизонтального радиуса r, имеет вид:

$$z(r) = A/(e^{k(c_1-r)}+1) + A/(e^{-k(c_2-r)}+1) - A. \quad (19)$$

Значения кривизны K в точках на линии радиального сечения эталонной поверхности вычислялись по формуле [25]

$$K(r) = \frac{|z''|}{\left(\sqrt{1+(z')^2}\right)^3}, \quad (20)$$

где z', z'' – первая и вторая производные функции высоты z по радиусу r соответственно.

Для вычисления входящих в выражение (20) значений производных функции z по r в настоящей работе использовался метод численного дифференцирования:

$$(z')_i = \frac{(z_i - z_{i-1})}{\Delta r}; \ (z'')_i = \frac{((z')_i - (z')_{i-1})}{\Delta r}, \quad (21)$$

где Δr – постоянный малый шаг приращения радиуса r; i – индекс текущего шага перемещения по r.

При вычислении значения показателя *KPM* использовалось значение радиуса, вычисленное по значениям горизонтальных координат, при которых погрешность интерполяции максимальна.

На рис. 2, а, б приведены графики поверхности выступа z, полученной по аналитическому выражению (1), то есть эталонной, и графики двух поверхностей Z_{in}, полученные интерполяцией рассматриваемым методом радиальных базисных функций на основе равномерной сетки опорных точек. Также приведены опорные точки, которые расположены на эталонной поверхности, и одновременно принадлежат интерполированной поверхности. В качестве примера при получении результатов, приведенных на рис. 2, параметры аналитического выражения выступа микрорельефа принимали следующие фиксированные значения: k= 50 м; A_{true}= 0.1 м; c_1=c_2= 0.02 м. Исследовалась интерполяция поверхности выступа высотой 0.1 м. Эталонная поверхность на рис. 2, а и б, одна и та же.

Шаг опорных точек при этом принимался фиксированным и равным xy_{step}=0.06 м. Отличие интерполяции на рис. 2, а и б – в смещении множества эталонных точек относительно начала координат. На рис. 2 а – нулевые смещения: $Dola_{Dx}$=0; $Dola_{Dy}$=0. На рис. 2, б – положительные смещения на половину шага опорных точек: $Dola_{Dx}$=0.5; $Dola_{Dy}$=0.5. Прочие параметры принимали фиксированные значения: половина стороны рассматриваемой области XY_{minmax}= 0.15 м; шаг интерполируемых точек XY_{step}=XY_{minmax}/40 = 0.00375 м.

На рис. 2, в, г приведены два графика поверхностей относительной приведенной погрешности интерполяции $\delta(X,Y)$, соответствующие рис. 2 а, б, с указанием значений максимальной относительной погрешности интерполяции *PPM* в наиболее высоких точках графиков $\delta(X,Y)$. На рис. 2, д, е приведены графики кривизны радиального сечения эталонной поверхности выступа с указанием значения *KPM* – кривизны в точке, где достигается максимальная относительная погрешность интерполяции *PPM*. Соответствующие *KPM* и *PPM* значения радиуса r отмечены вертикальными прерывистыми линиями. Интерполяций, аналогичных приведенным на рис. 2, а и 2, б в настоящей работе было всего проведено 5×6×10×10=3000 для различных входных условий задачи. Варьировались следующие параметры исходных данных: c_1 в пределах от 0.02 до 0.04 м с шагом 0.005 м; xy_{step} в пределах от 0.01 до 0.06 м с шагом 0.01 м; $Dola_{Dx}$ и $Dola_{Dy}$ в пределах от 0 до 0.9 с шагом 0.1 каждый.

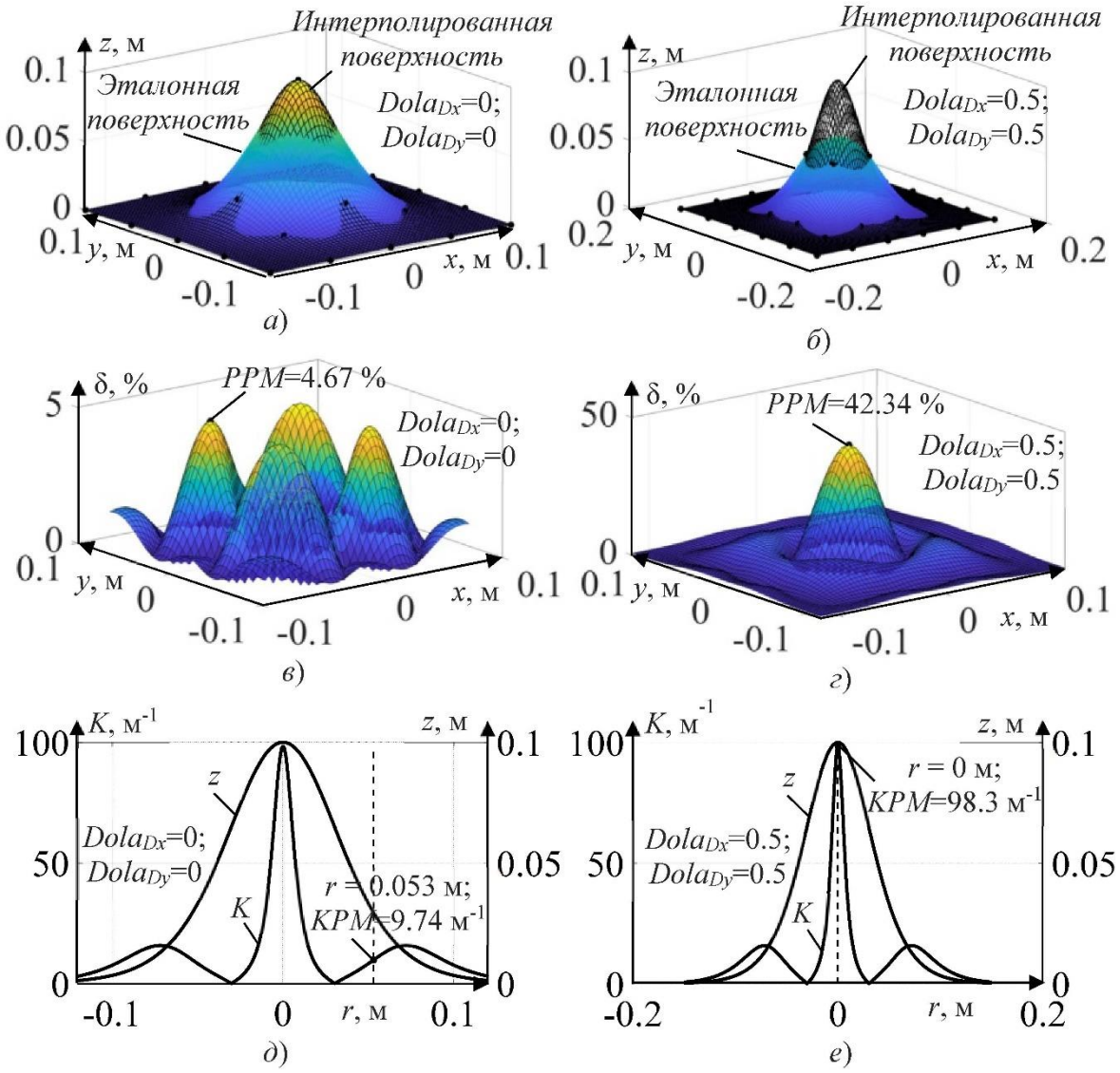


Рис. 2. Эталонная и интерполированные поверхности выступа при нулевых (а) и положительных (б) смещениях опорных точек, соответствующие им графики поверхностей приведенных относительных погрешностей интерполяции (в, г) и соответствующие им графики кривизны радиального сечения эталонной поверхности выступа (д, е)

Результатом серии запусков интерполяций являлись 4-мерные массивы максимальной относительной погрешности интерполяции *PPM* и аналогичные 4-мерные массивы кривизны *KPM* в точке, где достигается максимальная относительная погрешность интерполяции:

$$PPM(i_c; i_{st}, i_{Dx}, i_{Dy}); KPM(i_c; i_{st}, i_{Dx}, i_{Dy}), \quad (22)$$

где i_c; i_{st}, i_{Dx}, i_{Dy} – целочисленные положительные индексы варьируемых параметров c_1, xy_{step}, $Dola_{Dx}$, $Dola_{Dy}$ соответственно, принимающие значения от 1 до 5, от 1 до 6, от 1 до 10 и от 1 до10 соответственно.

Для оценки влияния каждого из 4-х варьируемых параметров на выходные показатели в массивах (22) определялись средние значения *PPM* и *KPM* при фиксированном значении одного из варьируемых параметров. Формулы для вычисления осредненных по всему массиву полученных данных значений *PPM* в индексном виде:

$$\overline{PPM}\left(i_c=\text{const}\right)=\frac{\sum_{i_{st}=1}^{6}\sum_{i_{Dx}=1}^{10}\sum_{i_{Dy}=1}^{10}PPM\left(i_c=\text{const},i_{st},i_{Dx},i_{Dy}\right)}{\left(1\cdot 6\cdot 10\cdot 10\right)};$$

$$\overline{PPM}\left(i_{st}=\text{const}\right)=\frac{\sum_{i_c=1}^{5}\sum_{i_{Dx}=1}^{10}\sum_{i_{Dy}=1}^{10}PPM\left(i_c,i_{st}=\text{const},i_{Dx},i_{Dy}\right)}{\left(5\cdot 1\cdot 10\cdot 10\right)};\qquad(23)$$

$$\overline{PPM}\left(i_{Dx}=\text{const}\right)=\frac{\sum_{i_c=1}^{5}\sum_{i_{st}=1}^{6}\sum_{i_{Dy}=1}^{10}PPM\left(i_c,i_{st},i_{Dx}=\text{const},i_{Dy}\right)}{\left(5\cdot 6\cdot 1\cdot 10\right)};$$

$$\overline{PPM}\left(i_{Dy}=\text{const}\right)=\frac{\sum_{i_c=1}^{5}\sum_{i_{st}=1}^{6}\sum_{i_{Dx}=1}^{10}PPM\left(i_c,i_{st},i_{Dx},i_{Dy}=\text{const}\right)}{\left(5\cdot 6\cdot 10\cdot 1\right)}.$$

Осредненные по всему массиву полученных данных значения *KPM* вычислялись по формулам, аналогичным (23), с заменой во всех формулах (23) массива *PPM* на массив *KPM*.

На рис. 3, а иллюстрируется геометрический смысл первого варьируемого параметра c_1, при увеличении которого меняется профиль радиального сечения эталонной поверхности выступа. Результаты серии запусков интерполяций в виде функциональных зависимостей осредненных по всему массиву данных показателей $\overline{PPM}$ и $\overline{KPM}$ от значений первых трех перечисленных выше варьируемых параметров c_1, xy_{step} и $Dola_{Dx}$ приведены на рис. 3, б, в, г соответственно. Графики зависимостей осредненных показателей от $Dola_{Dy}$ полностью идентичны графикам зависимостей от $Dola_{Dx}$ (см. рис. 3, г), поэтому в графическом виде они не приводятся.

Выводы

Анализ графиков осредненных показателей $\overline{PPM}$ и $\overline{KPM}$ от варьируемых параметров (см. рис. 3) показывает, что увеличение параметра c_1, при котором радиальное сечение эталонной поверхности выступа становится шире при сохранении той же максимальной высоты, приводит к уменьшению средней максимальной относительной погрешности интерполяции $\overline{PPM}$ приблизительно в 2 раза, с 10.59 до 5.19 %. Средняя кривизна в точке максимальной погрешности интерполяции $\overline{KPM}$ также существенно уменьшается более чем в 3 раза, с 54.14 до 16.79 $м^{-1}$ (см. рис. 3, б).

При увеличении шага дискретизации xy_{step} в 6 раз с 0.01 до 0.06 м, средняя максимальная относительная погрешность интерполяции увеличивается в геометрической прогрессии с 0.0276 до 22.71 %, т.е. в 822 раза. Данная оценка справедлива для рассмотренных в качестве примера конкретных значений исходных данных, в частности, значения параметра c_1. При других значениях c_1 зависимость менее выражена. При этом средняя кривизна в точке максимальной погрешности интерполяции $\overline{KPM}$ демонстрирует минимум в середине исследованного интервала xy_{step}.

Смещения множества опорных точек вдоль осей горизонтальных координат в относительных единицах на половину шага опорных точек $Dola_{Dx}$=0.5, $Dola_{Dy}$=0.5 максимизируют как среднюю максимальную относительную погрешность интерполяции $\overline{PPM}$, так и среднюю кривизну в точке максимальной погрешности

интерполяции $\overline{KPM}$. Средняя погрешность при этом увеличивается в 1.73 раза, с 5.57 до 9.64 %.

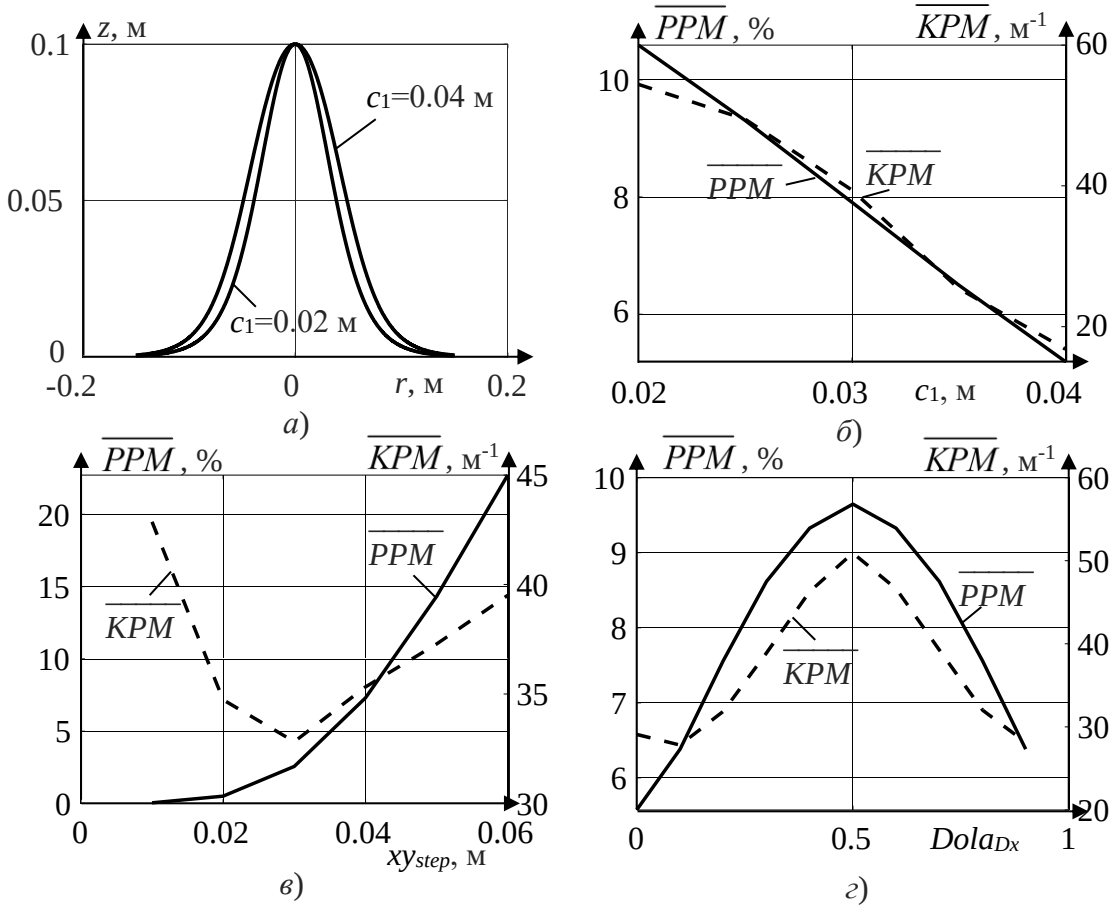


Рис. 3. Графики высоты профиля радиального сечения эталонной поверхности выступа $z(r)$ при двух граничных значениях параметра c_1 (*а*) и функциональные зависимости осредненных по всему массиву данных показателей $\overline{PPM}$ и $\overline{KPM}$ в зависимости от значений варьируемых параметров c_1 (*б*), xy_{step} (*в*), $Dola_{Dx}$ (*г*)

Наибольшая относительная погрешность интерполяции *PPM* при прочих равных условиях достигалась при сочетании смещений опорных точек на половину шага $Dola_{Dx}$=0.5, $Dola_{Dy}$=0.5.

Было установлено также, что минимальная погрешность интерполяции симметричного выступа при прочих равных условиях достигалась при нулевых смещениях опорных точек $Dola_{Dx}$=0, $Dola_{Dy}$=0, т.е. когда одна из опорных точек совпадает с центром выступа, в котором его высота достигает максимума (см. рис. 1, а, рис. 2, а). В частности, при максимальном значении шага дискретизации из рассматриваемого диапазона xy_{step}=0.06 м, смещения множества опорных точек вдоль осей горизонтальных координат в относительных единицах на половину шага опорных точек $Dola_{Dx}$=0.5, $Dola_{Dy}$=0.5 увеличивают максимальную относительную погрешность интерполяции *PPM* с 4.67 до 42.34 %. То есть в самом неблагоприятном расчетном случае из рассматриваемых, когда шаг дискретизации опорных точек наибольший, смещения множества опорных точек увеличивают погрешность в 9 раз (см. рис. 2, а).

При расположении одной из опорных точек в центре симметричного выступа погрешность интерполяции всегда минимальна при прочих равных условиях. Даже при

относительно крупном шаге дискретизации опорных точек их центрирование относительно центра выступа позволяет интерполировать поверхность с приемлемой точностью, когда наибольшая относительная погрешность интерполяции не превышает 5 %. То есть метод интерполяции пространственной поверхности микрорельефа под опорными элементами наземной транспортно-технологической машины с использованием радиальных базисных функций может быть использован с относительно малой погрешностью интерполяции при относительно крупном шаге дискретизации опорных точек.

Перспективным представляется также использование описанного метода с использованием радиальных базисных функций для интерполяции полученных в результате проведения натурных экспериментов значений параметров рабочего процесса наземных машин, а также их отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования. Метод позволяет проводить интерполяцию не только на регулярной сетке опорных точек данных, но и для разбросанных данных, т.е. для случайным образом расположенных точек данных, что может иметь место в реальных условиях, в том числе при проведении натурных экспериментов.

Список литературы

1. Kang M., Han H., Park Y. Optimization of Cabin Mounting System for Tractor using a Genetic Algorithm // Journal of Biosystems Engineering. 2024. Vol. 49. Pp. 61–76. doi: 10.1007/s42853-024-00217-0

2. Han G., Kim K.D., Ahn D.V. et al. Comparative Analysis of Tractor Ride Vibration According to Suspension System Configuration // Journal of Biosystems Engineering. 2023. Vol. 48. Pp. 69–78. doi: 10.1007/s42853-022-00165-7

3. Zhao Y., Zhang Y., Guo L. et al. Advances in machine learning-based active vibration control for automotive seat suspensions: A comprehensive review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2025. Vol. 231. Pp. 112645. doi: 10.1016/j.ymssp.2025.112645

4. Dhatrak S.V., Shah I.A., Prajapati S.S. Determinants of discomfort from combined exposure to noise and vibration in dumper operators of mining industry in India // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2024. Vol. 21. No. 6. Pp. 389–396. doi: 10.1080/15459624.2024.2328296

5. Santos W., Rojas C., Isidoro R. et al. Efficacy of Ergonomic Interventions on Work-Related Musculoskeletal Pain: A Systematic Review and Meta-Analysis // Journal of Clinical Medicine. 2025. Vol. 14. Pp. 3034. doi: 10.3390/jcm14093034

6. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopolsky A.B. Effect of tire dynamic characteristics on vibration load at the operator's workplace // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441. Pp. 012097. doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012097

7. Rybansky M., Dohnal F., Rada J. The Impact of Microrelief Forms on Mobility of Terrain Vehicles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 540. Pp. 012083. doi: 10.1088/1755-1315/540/1/012083.

8. Liu Z., Chen S., Hu L., Gao H. Dynamics modeling and stability analysis of lunar crew vehicles on uneven terrain // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. 2025. Vol. 240. No. 9. doi: 10.1177/14644193251374653.

9. Wang F., Pan N., Li H., Xu Y. et al. Multimodal Fusion Lateral Stability Control Strategy for Autonomous Vehicles // Frontiers in Computing and Intelligent Systems. 2026. Vol. 16. Pp. 22–27. doi: 10.54097/etbkya43.

10. Koutras E., Moretti Leila F., Ribaric A. et al. A new contact and road model for multi-body dynamic simulation of wheeled vehicles on soft-soil terrain // Multibody System Dynamics. 2025. Vol. 63. Pp. 39–62. doi: 10.1007/s11044-024-09980-6

11. Zhang K., Shi J., Wu J. et al. A mechanical model of elastic wheel-terrain interaction for real-time simulation // Nonlinear Dynamics. 2025. Vol. 113, Pp. 17661–17681. doi: 10.1007/s11071-025-11094-3

12. Yaghoubi S., Ghanbarzadeh A. Modeling and optimization of car suspension system in the presence of magnetorheological damper using Simulink-PSO hybrid technique // Results in Engineering. 2024. Vol. 22. Pp. 102065. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102065

13. Leanza A., Ugenti A., Galati R. et al. Predicting the impact of wheel passage on terrain unevenness // Journal of Terramechanics. 2025. Vol. 117. Pp. 101015. doi: 10.1016/j.jterra.2024.101015

14. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Mathematical modeling of functioning of a tillage machine-tractor unit // Tractors and Agricultural Machinery. 2018. Vol. 85. N. 4. Pp. 55–62. doi: 10.17816/0321-4443-66405

15. Karpman E., Kövecses J., Teichmann M. Semi-empirical terramechanics modelling of rough terrain represented by a height field // Journal of Terramechanics. 2024. Vol. 115. Pp. 100975. doi: 10.1016/j.jterra.2024.100975

16. Гайнанов В.В., Дьячук А.К. Разработка методики моделирования микрорельефа местности // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 5. doi: 10.60797/IRJ.2025.155.64

17. Сухарев Р.Ю. Моделирование трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожных и строительных машин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2014. № 6 (40). С. 108-111.

18. Катунов И.В., Бурлакова Г.Ю. Предиктивная аналитика дефектов дорожных покрытий и сооружений на основе методов неразрушающего контроля // Вестник Донецкой академии транспорта. 2025. № 3. С. 22-38.

19. Mishra P.K., Nath S.K., Sen M.K., Fasshauer G.E. Gaussian-cubic radial basis functions for scattered data interpolation //Computational geosciences. 2018. Vol. 22 No. 5. Pp. 1203–1218. doi: 10.1007/sl0596-018-9747-3

20. Zhiyong L. Local multilevel scattered data interpolation // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2018. Vol. 92. Pp. 101–107.

21. Ding Z., Mei G., Cuomo S., Xu N., Tian H. Performance evaluation of GPU-accelerated spatial interpolation using radial basis functions for building explicit surfaces // International journal of parallel programming. 2018. Vol. 46. No. 5 (SI). Pp. 963–991. doi: 10.1007/sl0766-017-0533-6

22. Yunxia H., Luo M., Hui Y., et al. Variability of Interpolation Errors and Mutual Enhancement of Different Interpolation Methods // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Pp. 11493. doi: 10.3390/app142411493

23. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V., Pochekuyeva I.E. Interpolation of experimental values for working parameters of a construction machine in the data space of an arbitrary dimensionality // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1546(1). Pp. 012086. doi: 10.1088/1742-6596/1546/1/012086

24. Grebenc A. Foundations for a general theory of sigmoid functions: modelling with 30 methods // Intelligent Systems and Applications. 2025. Vol. 1553. Pp. 481–511. doi: 10.1007/978-3-031-99958-1_31

25. Громов М. Знак и геометрический смысл кривизны. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 128 с.

References

1. Kang M., Han H., Park Y. Optimization of Cabin Mounting System for Tractor using a Genetic Algorithm. Journal of Biosystems Engineering. 2024, vol. 49. pp. 61–76. doi: 10.1007/s42853-024-00217-0

2. Han G., Kim K.D., Ahn D.V. et al. Comparative Analysis of Tractor Ride Vibration According to Suspension System Configuration. Journal of Biosystems Engineering. 2023, vol. 48. pp. 69–78. doi: 10.1007/s42853-022-00165-7

3. Zhao Y., Zhang Y., Guo L. et al. Advances in machine learning-based active vibration control for automotive seat suspensions: A comprehensive review. Mechanical Systems and Signal Processing. 2025, vol. 231. pp. 112645. doi: 10.1016/j.ymssp.2025.112645

4. Dhatrak S.V., Shah I.A., Prajapati S.S. Determinants of discomfort from combined exposure to noise and vibration in dumper operators of mining industry in India. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2024, vol. 21. no. 6. pp. 389–396. doi: 10.1080/15459624.2024.2328296

5. Santos W., Rojas C., Isidoro R. et al. Efficacy of Ergonomic Interventions on Work-Related Musculoskeletal Pain: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of Clinical Medicine. 2025, vol. 14. pp. 3034. doi: 10.3390/jcm14093034

6. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopolsky A.B. Effect of tire dynamic characteristics on vibration load at the operator's workplace. Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1441. pp. 012097. doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012097

7. Rybansky M., Dohnal F., Rada J. The Impact of Microrelief Forms on Mobility of Terrain Vehicles. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 540. pp. 012083. doi: 10.1088/1755-1315/540/1/012083.

8. Liu Z., Chen S., Hu L., Gao H. Dynamics modeling and stability analysis of lunar crew vehicles on uneven terrain. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. 2025, vol. 240. no. 9. doi: 10.1177/14644193251374653.

9. Wang F., Pan N., Li H., Xu Y. et al. Multimodal Fusion Lateral Stability Control Strategy for Autonomous Vehicles. Frontiers in Computing and Intelligent Systems. 2026, vol. 16. pp. 22–27. doi: 10.54097/etbkya43.

10. Koutras E., Moretti Leila F., Ribaric A. et al. A new contact and road model for multi-body dynamic simulation of wheeled vehicles on soft-soil terrain. Multibody System Dynamics. 2025, vol. 63. pp. 39–62. doi: 10.1007/s11044-024-09980-6

11. Zhang K., Shi J., Wu J. et al. A mechanical model of elastic wheel-terrain interaction for real-time simulation. Nonlinear Dynamics. 2025, vol. 113, pp. 17661–17681. doi: 10.1007/s11071-025-11094-3

12. Yaghoubi S., Ghanbarzadeh A. Modeling and optimization of car suspension system in the presence of magnetorheological damper using Simulink-PSO hybrid technique. Results in Engineering. 2024, vol. 22. pp. 102065. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102065

13. Leanza A., Ugenti A., Galati R. et al. Predicting the impact of wheel passage on terrain unevenness. Journal of Terramechanics. 2025, vol. 117. pp. 101015. doi: 10.1016/j.jterra.2024.101015

14. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Mathematical modeling of functioning of a tillage machine-tractor unit. Tractors and Agricultural Machinery. 2018, vol. 85. no. 4. pp. 55–62. doi: 10.17816/0321-4443-66405

15. Karpman E., Kövecses J., Teichmann M. Semi-empirical terramechanics modelling of rough terrain represented by a height field. Journal of Terramechanics. 2024, vol. 115. pp. 100975. doi: 10.1016/j.jterra.2024.100975

16. Gainanov V.V., Dyachuk A.K. Development of a methodology for modeling the microrelief of the terrain. Mezhdunarodnihyj nauchno-issledovateljskiyj zhurnal [International research journal], 2025, no. 5. doi: 10.60797/irj.2025.155.64 (in Russian).

17. Sukharev R.Yu. Modeling of three-dimensional microrelief for theoretical studies of road and construction machines. Vestnik Sibirskoyj gosudarstvennoyj avtomobiljno-dorozhnoyj akademii [Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy], 2014, no. 6 (40), pp. 108–111. (in Russian).

18. Katunov I.V., Burlakova G.Yu. Predictive analytics of defects of road surfaces and structures based on non-destructive testing methods. Vestnik Doneckoyj akademii transporta [Bulletin of the Donetsk Academy of Transport], 2025, no. 3, pp. 22-38. (in Russian).

19. Mishra P.K., Nath S.K., Sen M.K., Fasshauer G.E. Gaussian-cubic radial basis functions for scattered data interpolation.Computational geosciences. 2018, vol. 22 no. 5. pp. 1203–1218. doi: 10.1007/sl0596-018-9747-3

20. Zhiyong L. Local multilevel scattered data interpolation. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2018, vol. 92. pp. 101–107.

21. Ding Z., Mei G., Cuomo S., Xu N., Tian H. Performance evaluation of GPU-accelerated spatial interpolation using radial basis functions for building explicit surfaces. International journal of parallel programming. 2018, vol. 46. no. 5 (si). pp. 963–991. doi: 10.1007/sl0766-017-0533-6

22. Yunxia H., Luo M., Hui Y., et al. Variability of Interpolation Errors and Mutual Enhancement of Different Interpolation Methods. Applied Sciences. 2024, vol. 14. pp. 11493. doi: 10.3390/app142411493

23. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V., Pochekuyeva I.E. Interpolation of experimental values for working parameters of a construction machine in the data space of an arbitrary dimensionality. Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1546(1). pp. 012086. doi: 10.1088/1742-6596/1546/1/012086

24. Grebenc A. Foundations for a general theory of sigmoid functions: modelling with 30 methods. Intelligent Systems and Applications. 2025, vol. 1553. pp. 481–511. doi: 10.1007/978-3-031-99958-1_31

25. Gromov M. Sign and geometric meaning of curvature. Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» [Izhevsk: Research Center «Regular and Chaotic Dynamics»], 2000, 128 p. (in Russian).

Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Sukharev R.Y., Kashapova I.E.

INTERPOLATION OF THE UNROUGHNESS OF THE MICRORELIEF OF THE SUPPORT SURFACE OF A GROUND MACHINE USING RADIAL BASIS FUNCTIONS

***Abstract**. Modeling the microrelief of a supporting surface is important when studying the performance of ground-based transport and technological machines, as the machine's interaction with microrelief irregularities impacts its safety and operational efficiency. The interaction of running elements with these irregularities causes vibrations and dynamic effects, affecting machine stability. A height field is used for the mathematical description of complex spatial microreliefs. This paper examines the feasibility of interpolating an individual microrelief irregularity of a supporting surface using the radial basis function method, which simultaneously ensures rigidity and smoothness of the interpolated surface. The influence of the discretization step of uniformly spaced reference points, their horizontal offsets relative to the protrusion center, and the parameter of the analytical expression for the surface on interpolation accuracy is examined. The reference surface was defined as an analytical expression describing a radially symmetric protrusion. For interpolation, an input matrix was formed, and the weighting coefficients of all reference points were calculated. The relative interpolation error was determined by comparing the interpolated and true values, the latter obtained using an analytical expression. Increasing the sampling step and point offsets by up to half the sampling step degrade interpolation accuracy. Conversely, centering the grid of control points relative to the center of the protrusion minimizes interpolation error. The interpolation method using radial basis functions has proven effective for both fine and coarse*

sampling steps of control points. Its use is promising for studying not only microrelief but also the operational processes of ground vehicles.

Keywords: *microrelief, ledge, radial basis function interpolation, three-dimensional, ground vehicle.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Корытов Михаил Сергеевич Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия, профессор, доктор технических наук, профессор, e-mail: kms142@mail.ru	**Mikhail Sergeevich Korytov** Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: kms142@mail.ru
Щербаков Виталий Сергеевич Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия, профессор, доктор технических наук, профессор, e-mail: sherbakov_vs1947@mail.ru	**Vitaly Sergeevich Shcherbakov** Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: sherbakov_vs1947@mail.ru
Сухарев Роман Юрьевич Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия, заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор, e-mail: suharev_ry@mail.ru	**Roman Yuryevich Sukharev** Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia, Head of Department, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: **suharev_ry@mail.ru**
Кашапова Ирина Евгеньевна Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия, ст. преподаватель, кандидат технических наук, e-mail: kashapova_ie@mail.ru	**Irina Evgenievna Kashapova** Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia, Senior Lecturer, Candidate of Engineering Sciences, e-mail: kashapova_ie@mail.ru

УДК 621.869.3:004.94

Лесковец И. В., Савельев С. В.

НАГРУЗКИ В ГУСЕНИЧНОМ ДВИЖИТЕЛЕ БУЛЬДОЗЕРА ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ КОПАНИЯ ГРУНТА

Аннотация. *В статье рассмотрены особенности нагружения гусеничного движителя бульдозера в режиме копания грунта. Выполнен анализ современных отечественных и зарубежных источников, посвященных моделированию взаимодействия элементов гусеничного движителя, динамическим нагрузкам, усталостной долговечности и износу траков. Представлена математическая модель взаимодействия трака с катками гусеничного движителя и грунтом, учитывающая свойства опорной поверхности и диссипативные характеристики шарнирного соединения. На основе численного моделирования получены значения сил, действующих на траки при работе бульдозера в режиме копания с различными толщинами стружки. Сформулированы проблемы определения нагрузок на стадии проектирования и направления дальнейших исследований в области создания имитационных моделей гусеничного движителя.*

Ключевые слова: *бульдозер, гусеничный движитель, трак, математическая модель, имитационная модель, динамические нагрузки.*

Постановка задачи

Гусеничные бульдозеры являются основными машинами для послойной разработки грунтов. Наиболее интенсивные нагрузки в этом режиме испытывает гусеничный движитель. На различных этапах копания от начала заглубления отвала, набора и транспортирования призмы волочения гусеничный движитель испытывает отличающиеся по величине и разные по направлению и интенсивности нагрузки. На основе анализа режимов работы можно предположить, что на этапе транспортирования грунта при максимальной призме волочения реализуются максимальные тяговые усилия – до 80 … 90 % от сцепного веса машины. В режиме максимальной силы тяги буксование достигает 10–20 %, а двигатель работает на режиме номинальной мощности. Циклическое изменение расположения траков при работе бульдозера формирует их периодическое нагружение.

Бульдозер является машиной циклического действия. Периодически повторяющиеся операции формируют циклические режимы работы гусеничного движителя в целом. Расположение траков в разных местах гусеничного обвода также формирует знакопеременные нагрузки на траках. На этапе внедрения отвала в грунт происходит перераспределение нагрузок на передних и задних катках гусеничного движителя, что также оказывает влияние на величины сил, действующих на траки. На различных стадиях копания нагрузки, действующие на рабочее оборудование, различаются по величине и направлению. В фазе резания и набора призмы волочения силы сопротивления копанию возрастают и достигают максимальных значений при полной призме волочения и максимальной толщине стружки грунта. При уменьшении

толщины стружки и транспортировании призмы волочения силы сопротивления копанию снижаются, однако сохраняется значительное сопротивление передвижению.

Основная проблема, решению которой посвящена статья, заключается в следующем: на основе статических расчетов невозможно вычислить нагрузки на траки, находящиеся в разных местах гусеничного обвода в конкретный момент времени при работе бульдозера в режиме копания грунта. Отсутствие достоверных данных о величинах нагрузок, действующих в гусеничном обводе, величинах коэффициентов динамичности затрудняет выбор основных параметров траков и расчеты прочности, надежности и долговечности на ранних стадиях проектирования. Получается замкнутый круг: для прогнозирования ресурса необходимы нагрузки, а точное определение нагрузок требует знания режимов работы, которые становятся известными лишь после испытаний опытного образца.

К числу важных проблем, возникающих на этапе функционального проектирования, относятся:

– многофакторность нагружения (одновременное воздействие тяговых усилий, вертикальных нагрузок от опорных катков и изменения направления движения);

– случайная природа эксплуатационных нагрузок (непредсказуемость траектории движения, значительная неоднородность свойств грунта, разные величины нагрузок в разных местах гусеничного обвода);

– сложность моделирования взаимодействия трака с грунтом;

– сложность верификации расчетных методов в полевых условиях.

Анализ последних исследований.

Анализ отечественной и зарубежной научной литературы показывает, что исследования нагрузок в гусеничных движителях развиваются по нескольким направлениям.

На мета уровне находятся работы, посвященные динамике машины в целом. Основным инструментом здесь выступают методы многотельной динамики (Multibody Dynamics, MBS), позволяющие рассчитывать общие силы и моменты, действующие на движитель, а также спектры нагружения в характерных эксплуатационных режимах, включая копание [8, 11].

На макроуровне исследуется взаимодействие отдельных траков с грунтом и с элементами ходовой системы (опорные катки, ведущая звездочка, направляющее колесо). Здесь активно используется конечно-элементный анализ (Finite Element Analysis, FEA) для расчета напряженно-деформированного состояния трака [1, 6, 14, 13], а также метод дискретных элементов (Discrete Element Method, DEM) для моделирования несплошной среды грунта [13, 14].

На микроуровне изучаются контактные процессы непосредственно в зоне «трак–грунт» и «трак–каток», а также механизмы износа и усталостного разрушения материала [2, 5, 7]. Как отмечают авторы [7], наиболее перспективными являются комбинированные подходы (MBS+FEA, DEM+FEA), позволяющие передавать нагрузки между уровнями и получать внутренне согласованные результаты.

Отечественные исследования. Авторы [6] детально анализируют распределение напряжений в зоне контакта опорного катка и беговой дорожки трака, показывая, что максимальные контактные давления возникают именно на задних опорных катках в фазе внедрения отвала. В публикации [2] предлагают методику оценки усталостного ресурса гусеничной цепи карьерного бульдозера, базирующуюся на реальных спектрах нагружения; авторы особо подчеркивают, что среднеквадратичные значения нагрузок при копании на 30–40 % превышают таковые при транспортировке грунта. Авторы [1] исследуют динамические ударные нагрузки, возникающие при переезде препятствия, и

показывают, что пиковые воздействия могут в 3–5 раз превышать статические, а длительность ударного импульса составляет 0,01–0,05 с. В статье [4] представлена методика расчета нагрузок при установившемся повороте тяжелой машины, установлено, что боковые силы при повороте под нагрузкой могут достигать 30–50 % от величины продольного тягового усилия. Авторы [5] на основе тензометрирования в полевых условиях установили, что реальные значения пиковых нагрузок в 1,5–2 раза превышают расчетные при использовании классических методик. В публикации [3] показано, что интенсивность износа грунтозацепов при копании глинистых грунтов на 60–70 % выше, чем при работе на песчаных грунтах. В работе [9] представлена методика прогнозирования остаточного ресурса шарнирных соединений гусеничных цепей на основе анализа кинематики поворота звеньев и интенсивности абразивного износа. В статье [10] представлены результаты тензометрических измерений нагрузок на опорные катки бульдозера в реальных условиях копания грунта. Авторами установлено, что максимальные вертикальные нагрузки приходятся на четвертый и пятый опорные катки (считая от заднего ведущего колеса), что подтверждает теоретические выводы о перераспределении веса машины в фазе внедрения отвала. Работа [11] посвящена анализу влияния динамических пульсаций тягового усилия на накопление усталостных повреждений в материале траков. Авторами выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния трака с учетом реальных спектров нагрузок, полученных в полевых испытаниях. Определены зоны концентрации напряжений, критичные для зарождения усталостных трещин. Предложена методика оценки усталостной долговечности с использованием критериев многоосного нагружения. В статье [12] исследуется влияние формы и углов наклона грунтозацепов на интенсивность их изнашивания при работе на различных грунтах. Методом численного моделирования контактного взаимодействия «трак–грунт» авторами установлены оптимальные геометрические параметры грунтозацепов, обеспечивающие снижение интенсивности износа на 20–25 % при сохранении требуемых тягово-сцепных свойств.

Зарубежные исследования. Авторы [17] демонстрируют комбинированный MBS-FEA подход, позволяющий предсказать критические зоны концентрации напряжений; для режима копания максимальные эквивалентные напряжения возникают в зоне проушины трака и могут достигать 0,8 от предела текучести материала. В статье [18] используется DEM для моделирования грунта совместно с FEA трака, установлено, что для скальных грунтов контактные давления на вершине грунтозацепа в 2–3 раза выше, чем для песчаных. В работе [9] на основе полевых измерений приводятся количественные данные о разбросе нагрузок, действующих на траки: коэффициент вариации амплитуд циклов нагружения при копании составляет 0,35–0,50. Авторы [14] показывают, что без учета зазоров в шарнирах и нелинейной жесткости контакта погрешность определения нагрузок на палец трака может достигать 40 %. В статье [15] предлагается новая вычислительная модель взаимодействия «трак–грунт», представлено предположение, что традиционные модели Беккера занижают пиковые контактные давления на 25–35 % из-за отсутствия учета дискретности гусеницы. Авторы [14] выявляют зоны концентрации напряжений в сложной геометрии трака, показывая, что коэффициент концентрации напряжений во внутренних радиусах проушин достигает 3–4. В статье [16] проанализированы высокоскоростные режимы движения, показано, что при скоростях движения свыше 3 м/с инерционные составляющие нагрузок становятся соизмеримыми с тяговыми. Статья [19] посвящена прогнозированию износа шарнирных соединений пальцев и втулок гусеничной цепи на основе динамических спектров нагружения, полученных в реальных условиях эксплуатации бульдозера. Авторы предлагают эмпирическую модель износа, учитывающую как нормальные, так и касательные нагрузки в шарнире, а также абразивные свойства грунта. В работе [20]

представлен вероятностный подход к оценке усталостной долговечности траков гусеничных машин при случайном характере нагружения. Авторы используют метод Монте-Карло для моделирования спектров нагрузок с заданными функциями распределения амплитуд и частот. Применена модифицированная гипотеза линейного накопления повреждений Пальмгрена-Майнера с учетом случайного характера нагрузок. Статья [21] предлагает концепцию цифрового двойника ходовой системы гусеничной машины, интегрирующего данные с датчиков (тензометрия, акселерометры, датчики температуры) и вычислительную модель MBS-FEA. Авторы демонстрируют работу системы в реальном времени: на основе измеряемых параметров цифровой двойник корректирует расчетные нагрузки и прогнозирует остаточный ресурс элементов движителя. В статье [22] применены методы топологической оптимизации для проектирования геометрии трака с целью снижения концентрации напряжений и повышения усталостной долговечности. Использован комбинированный подход: FEA-анализ напряженно-деформированного состояния в цикле «копание–транспортировка» и алгоритм эволюционной топологической оптимизации. Работа [23] посвящена экспериментальной валидации моделей взаимодействия «трак–грунт» на основе полномасштабных испытаний бульдозера. Авторы измеряли контактные давления под траками с помощью специальных датчиков, встроенных в опорную поверхность, а также продольные и поперечные силы в элементах гусеницы. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов по моделям Беккера, Вонга-Риса и Дина показало, что наиболее точной является модель Дина (погрешность 12–18 %), тогда как классическая модель Беккера дает погрешность до 35 %. Статья [24] исследует влияние высоты грунтозацепов траков на тягово-сцепные свойства и распределение контактных давлений при работе на глинистых грунтах. Методом DEM-FEA моделирования авторы анализируют три варианта высоты грунтозацепов (30, 45 и 60 мм).

Цель работы

Целью работы является определение нагрузок, действующих на траки гусеничного движителя бульдозера при его работе в режиме копания грунта, на основе анализа различных этапов режима копания, от зарезания грунта до транспортирования полной призмы волочения, разработка математической модели взаимодействия трака с опорным катком и грунтом, а также выявление на основе численного моделирования закономерностей изменения силовых факторов, действующих на трак, при различных стадиях копания грунта.

Основная часть

Математическая модель взаимодействия трака с опорным катком и грунтом

Для описания взаимодействия траков гусеничного движителя с опорными катками и грунтом в режиме копания разработана математическая модель, базирующаяся на системном подходе, обеспечивающем учет влияния основных систем и механизмов гусеничного бульдозера при работе в режиме копания грунта. В модели приняты следующие допущения: движитель взаимодействует с опорной поверхностью, которая является упругодеформируемой; деформации в контактной зоне подчиняются линейному закону; трак рассматривается как твердое тело, соединенное с соседними звеньями упруго-диссипативными шарнирами.

Работа трака в гусеничном обводе описывается системой дифференциальных уравнений. Схема сил, действующих на выбранный трак в декартовой системе координат, представлена на рисунке 1

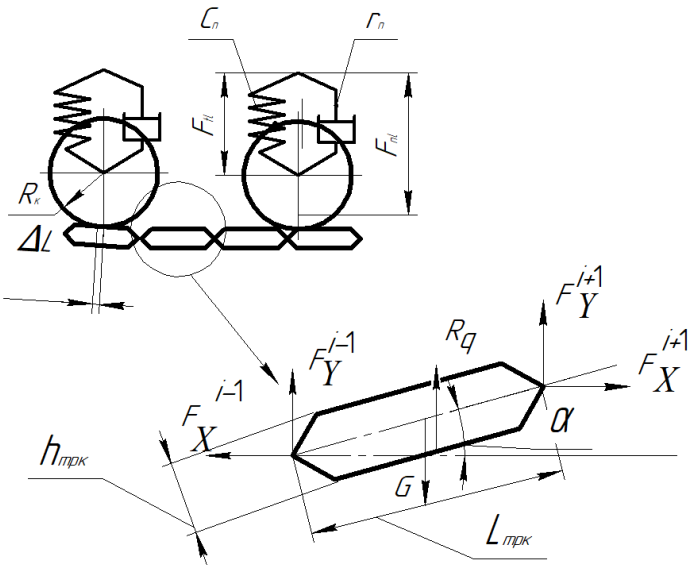


Рис. 1. Схема сил, действующих на трак

На рисунке приняты обозначения: $R_к$ – радиус опорного катка, C_n – коэффициент жесткости подвески, r_{np} – коэффициент диссипативных сил подвески, F_{tl} – текущая длина пружины подвески, F_{nl} – начальная длина пружины подвески, $h_{трк}$ – высота трака, F_Y^{i-1} – сила взаимодействия с предыдущим траком вдоль оси ординат, F_Y^{i+1} – сила взаимодействия с последующим траком вдоль оси абсцисс, G – сила тяжести трака, R_q – сила взаимодействия трака с грунтом, α – угол наклона трака, F_X^{i-1} – сила взаимодействия с предыдущим траком вдоль оси абсцисс, F_X^{i+1} – сила взаимодействия с последующим траком вдоль оси абсцисс, ΔL – текущее расстояние от центра трака до точки взаимодействия между траком и опорным катком.

Дифференциальные уравнения движения трака получены на основе второго закона Ньютона путем составления уравнений равновесия сил по осям координат и моментов относительно центра масс трака.

$$\frac{dv^x_{трк} m_{трк}}{dt} = C_{трк}\Delta X^{i+1}_{трк} - r_{трк}\frac{dX^{i+1}_{трк}}{dt} - C_{трк}\Delta X^{x-1}_{трк} + r_{трк}\frac{dX^{i-1}_{трк}}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{dv^y_{трк} m_{трк}}{dt} = C_{трк}\Delta Y^{i+1}_{трк} - r_{трк}\frac{dY^{i+1}_{трк}}{dt} + C_{трк}\Delta Y^{i-1}_{трк} - r_{трк}\frac{dY^{i-1}_{трк}}{dt} - m_{трк}g + R_q - R_к\cos\alpha, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_{трк} J_{трк}}{dt} = \left(C_{трк}\Delta Y^{i+1}_{трк} - r_{трк}\frac{dY^{i+1}_{трк}}{dt}\right)\sin(\alpha)\frac{L_{трк}}{2} - \left(C_{трк}\Delta Y^{i-1}_{трк} - r_{трк}\frac{dY^{i-1}_{трк}}{dt}\right)\sin(\alpha)\frac{L_{трк}}{2} - \left(C_{трк}\Delta X^{i+1}_{трк} - r_{трк}\frac{dX^{i+1}_{трк}}{dt}\right)\cdot\cos(\alpha)\frac{h_{трк}}{2} + \left(C_{трк}\Delta X^{x-1}_{трк} + r_{трк}\frac{dX^{i-1}_{трк}}{dt}\right)\cdot\cos(\alpha)\frac{h_{трк}}{2} - R_k\cdot\Delta L. \quad (3)$$

Сила, действующая на трак со стороны опорного катка, определяется на основании теории упругости.

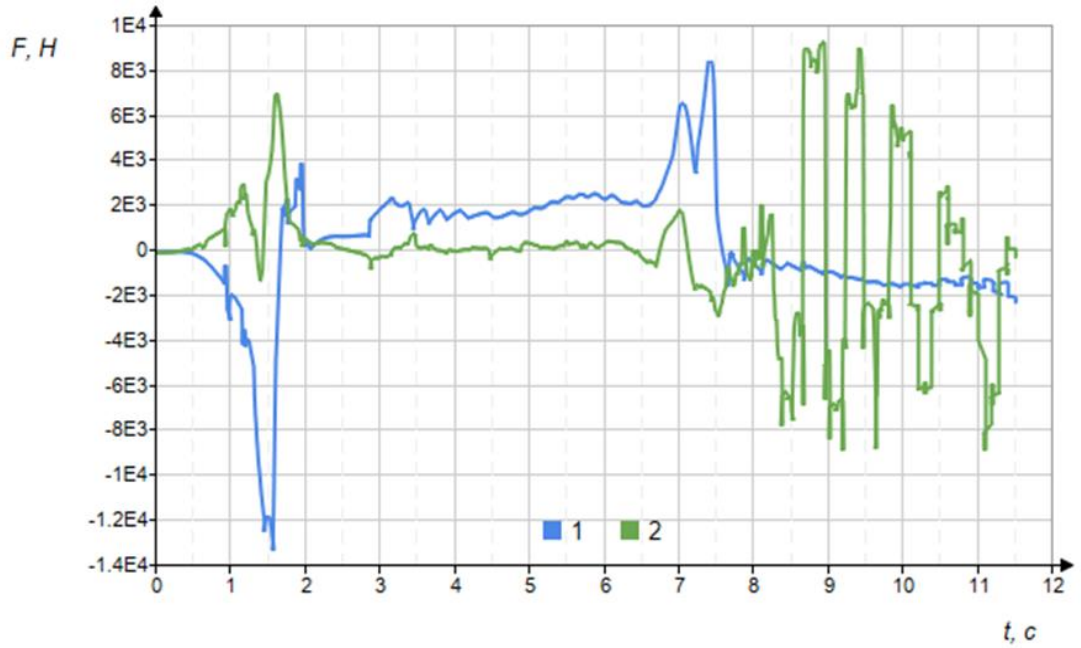
В случае, когда трак не касается опорной поверхности (отрыв трака от грунта или катка), величина соответствующей реакции принимается равной нулю.

Сила взаимодействия с грунтом R_q определяется в зависимости от глубины погружения трака в грунт. В рамках настоящей модели принято, что нормальная

составляющая реакции грунта пропорциональна глубине внедрения, а касательная составляющая – тяговому усилию, развиваемому движителем в режиме копания.

Результаты численного моделирования

На основе разработанной имитационной модели проведено численное моделирование, позволяющее определить характеристики сил, действующих на траки гусеничного обвода для двух режимов копания: при толщине стружки грунта 100 мм (рисунок 2) и 150 мм (рисунок 3). Моделирование выполнялось для бульдозера 10 тягового класса с параметрами: масса трака $m_{трк}$ = 45 кг, коэффициент жесткости шарнира $C_{трк}$ = $2{,}5\cdot10^6$ Н/м, коэффициент демпфирования $r_{трк}$ =$1{,}2\cdot10^4$ Н·с/м, коэффициент жесткости системы «трак – опорная поверхность» $C_{трк}$ =$3{,}0\cdot10^6$ Н/м. Для анализа характеристик выбран трак, который в начале моделирования находится под первым опорным колесом при отсчете слева – направо. В процессе движения трак перемещается по гусеничному обводу и последовательно проходит через ведущее колесо, поддерживающие катки, направляющий валец, опорные катки.



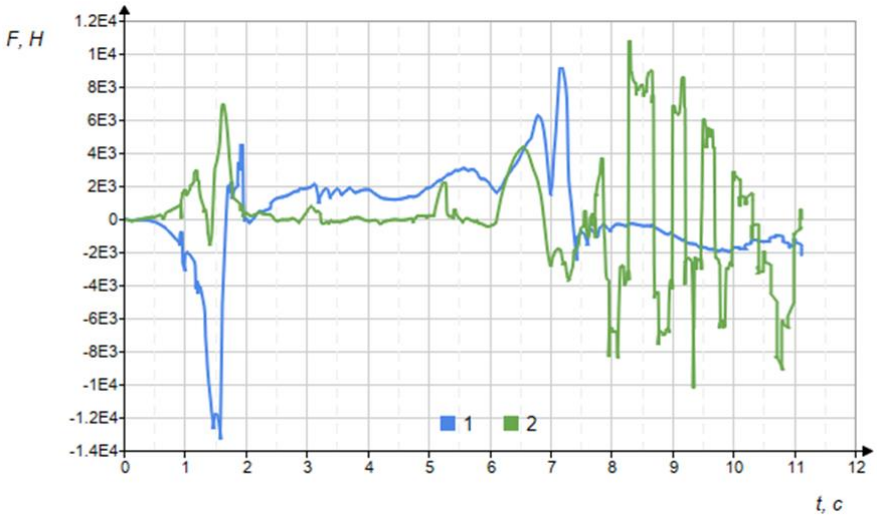
1 – силы на выбранном траке вдоль оси ординат; 2 – силы на выбранном траке вдоль оси абсцисс

Рис. 2. Силы, действующие на выбранный трак в декартовой системе координат при толщине стружки 100 мм

При увеличении толщины стружки со 100 мм до 150 мм наблюдается рост как вертикальных (ось ординат), так и горизонтальных (ось абсцисс) составляющих сил, действующих на трак. Максимальные средние значения сил возрастают в среднем на 10 – 20 %, что объясняется увеличением сопротивления грунта копанию.

Динамический характер взаимодействия проявляется в наличии высокочастотных колебательных составляющих на графиках сил. Эти колебания обусловлены упругими свойствами шарнирных соединений и дискретным характером контакта траков с опорной поверхностью. Частота колебаний лежит в диапазоне 50–100 Гц, что соответствует собственным.

Статистические параметры сил, действующих на трак, представлены в таблице1.



1 – силы на выбранном траке вдоль оси ординат; 2 – силы на выбранном траке вдоль оси абсцисс

Рис. 3. Силы, действующие на выбранный трак в декартовой системе координат при толщине стружки 150 мм

Таблица 1

Статистические результаты исследований

Наименование параметра	толщина стружки 100 мм		толщина стружки 150 мм	
	вдоль оси абсцисс	вдоль оси ординат	вдоль оси абсцисс	вдоль оси ординат
мин	-1,33E4	-1,02E4	-1,33E4	-8,92E3
макс.	9,22E3	1,08E4	8,44E3	9,23E3
среднее значение	2,8E2	2,8E2	1,95E2	-1,81E2
коэффициент динамичности	47,5	62,3	68,2	59,1

Асимметрия графиков сил относительно горизонтальной оси указывает на наличие знакопеременных нагрузок, что является важным фактором при оценке усталостной долговечности элементов шарнирных соединений и проушин траков. При нахождении трака на верхней ветви нагрузки минимальны (период со второй по шестую секунды). Максимальные нагрузки вдоль оси абсцисс возникают при прохождении трака под опорными катками (период с восьмой по 11 секунды). Наибольшие нагрузки возникают при прохождении трака под последним опорным колесом, что вызвано нагрузками на рабочее оборудование при копании грунта, направленными вниз.

Небольшие значения сил вдоль оси ординат в период с первой по вторую секунды соответствуют нахождению трака на ведущем колесе. При нахождении трака на ведомом колесе в период с седьмой по 7, 5 секунды горизонтальные нагрузки также велики. Это обусловлено не только силами тяги, которые реализуются движителем, но и резкой сменой траектории движения.

Пиковые значения сил, зафиксированные в моменты нахождения трака в контакте с опорным катком, в десятки раз превышают среднестатистические значения. Это подтверждает выводы авторов [1] о существенной роли динамических добавок в общем спектре нагружения.

Выводы

На основе анализа отечественных и зарубежных источников установлено, что современные исследования развиваются в направлении комбинированных методов,

объединяющих многотель на основе анализа различных этаповную динамику (MBS), метод дискретных элементов (DEM) и конечно-элементный анализ (FEA). Наиболее перспективным для режима копания признается MBS-DEM-FEA подход.

Разработанная математическая модель взаимодействия трака с опорным катком и грунтом учитывает свойства опорной поверхности, жесткость и демпфирование в шарнирных соединениях, особенности нагружения гусеничного движителя при работе бульдозера в режиме копания грунта. Модель позволяет рассчитывать динамические силы, действующие на трак в режиме копания.

Усилия, возникающие в траках гусеничного движителя бульдозера при его работе в режиме копания грунта, зависят от расположения трака в конкретном месте гусеничного обвода. Наибольшие усилия в вертикальном направлении возникают при наезде опорными катками на исследуемый трак. Наибольшие усилия в горизонтальном направлении возникают в момент расположения трака на ведущем и направляющем катках. Коэффициенты динамичности имеют большие значения и достигают 68,2 в вертикальном направлении и 59,1 в горизонтальном направлении.

Выполненное численное моделирование показало, что при работе бульдозера в режиме копания грунта максимальные силы на траке увеличиваются по сравнению со средними в несколько десятков раз, что необходимо учитывать при проектировании.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на создание имитационных моделей гусеничного движителя, интегрирующих MBS-, DEM- и FEA-компоненты и позволяющих прогнозировать нагрузки и ресурс с учетом реальных условий эксплуатации, а также на разработку имитационных моделей для ранних стадий проектирования.

Список литературы

1. Волков А.А., Сергеев В.В. Численное исследование динамических нагрузок в элементах гусеничного движителя при преодолении препятствия // Транспортное машиностроение. – 2021. – № 5. – С. 12–19.

2. Григорьев М.В., Белов А.Н. Оценка усталостной долговечности гусеничной цепи карьерного бульдозера на основе спектра нагружения // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 2 (176). – С. 29–35.

3. Анисимов П.С., Федоров И.В. Влияние режимов эксплуатации на износ грунтозацепов траков гусеничных машин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 3-2 (347). – С. 85–92.

4. Казаков Ю.М., Новиков Д.А. Методика расчета нагрузок в гусеничном движителе при установившемся повороте тяжелой машины // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2020. – № 4 (90). – С. 45–51.

5. Лапшин В.И., Колесников А.С., Мирошниченко Д.А. Экспериментальное определение нагрузок в гусеничном движителе мобильной энергетической установки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 8 (713). – С. 64–73.

6. Петров К.С., Сидоров А.А. Моделирование контактного взаимодействия звена гусеничной цепи с опорным катком транспортно-технологической машины // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 103. – С. 154–165.

7. Семенов Е.А., Тарасов Б.П. Современные подходы к расчету прочности элементов гусеничных движителей специальных машин // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 11. – С. 38–45.

8. Mantovani S., Sandu C. A Multibody Dynamics Methodology for the Loads Calculation in the Track System of an Autonomous Ground Vehicle // Proceedings of the

Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2023. – Vol. 237, № 2–3. – P. 476–489.

9. Морозов В.В., Чернышов К.А. Прогнозирование ресурса шарнирных соединений гусеничных цепей с учетом износа [Текст] / В.В. Морозов, К.А. Чернышов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2022. – № 4. – С. 23–31.

10. Ермаков А.И., Степанов В.Н., Кузнецов Д.А. Экспериментальное исследование распределения нагрузок по опорным каткам гусеничного бульдозера в режиме копания [Текст] / А.И. Ермаков, В.Н. Степанов, Д.А. Кузнецов // Механизация строительства. – 2020. – № 1 (1015). – С. 14–19.

11. Фролов Ю.К., Шапошников В.В. Влияние динамических нагрузок на усталостную долговечность траков гусеничных машин [Текст] / Ю.К. Фролов, В.В. Шапошников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 312–320.

12. Гребнев В.С., Мальцев А.П. Повышение износостойкости грунтозацепов гусеничных траков путем оптимизации их геометрии [Текст] / В.С. Гребнев, А.П. Мальцев // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 5. – С. 521–528.

References

13. Park J., Lee S., Kim Y. Fatigue Life Evaluation of Track Link Assembly Considering Dynamic Load Spectra from Field Measurements // International Journal of Automotive Technology. – 2021. – Vol. 22, № 4. – P. 1087–1096.

14. Liu Y., O'Connor W. Stress Concentration and Fatigue Initiation Sites in Heavy Vehicle Track Shoes: A Finite Element Study // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 134. – Art. 106048.

15. Ding L., Gao H., Deng Z., Li Y. A Novel Method for Modeling and Simulation of Track-Terrain Interaction Dynamics for Tracked Vehicles // Mechanism and Machine Theory. – 2019. – Vol. 140. – P. 123–145.

16. Jin Z., Zhang Y., Peng Y. Investigation on the Dynamic Load Characteristics and Influence Factors of Track Link for High-Speed Tracked Vehicles // Defence Technology. – 2020. – Vol. 16, № 5. – P. 902–912.

17. Yang Y., Li L., Liu G. Dynamic Load Prediction and Stress Analysis of Track Link for a Heavy-Duty Tracked Vehicle Based on Multi-body Dynamics // Journal of Terramechanics. – 2023. – Vol. 105. – P. 1–12.

18. Zhang W., Wang C., Sun P. Numerical and Experimental Study on the Contact Stress Distribution and Wear Behavior of Track Shoe under Different Terrains // Wear. – 2022. – Vol. 498–499. – Art. 204317.

19. Wang X., Li Z., Chen J. Wear Prediction of Track Pin Joints Based on Dynamic Load Spectra for Heavy-Duty Bulldozers [Текст] / X. Wang, Z. Li, J. Chen // Tribology International. – 2022. – Vol. 168. – Art. 107432. – DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107432.

20. Chen H., Zhang Y., Li X. Probabilistic Fatigue Life Assessment of Track Links under Random Loading Conditions [Текст] / H. Chen, Y. Zhang, X. Li // International Journal of Fatigue. – 2023. – Vol. 166. – Art. 107267. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107267.

21. Kim H., Park S., Lee J. Digital Twin Framework for Real-Time Load Monitoring and Residual Life Prediction of Tracked Vehicle Undercarriage [Текст] / H. Kim, S. Park, J. Lee // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 12345–12358. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3245678.

22. Thompson R., Williams S., Brown A. Topology Optimization of Track Shoe Geometry for Improved Fatigue Life under Cyclic Loading [Текст] / R. Thompson, S. Williams, A. Brown // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2021. – Vol. 64, № 4. – P. 2345–2362. – DOI: 10.1007/s00158-021-02987-5.

23. Miller D., Johnson R., Davis P. Experimental Validation of Track-Terrain Interaction Models Using Full-Scale Bulldozer Testing [Текст] / D. Miller, R. Johnson, P. Davis // Journal of Terramechanics. – 2022. – Vol. 101. – P. 45–58. – DOI: 10.1016/j.jterra.2022.03.004.

24. Nakamura T., Suzuki K., Takahashi H. Influence of Track Shoe Grouser Height on Traction Performance and Contact Pressure Distribution in Clayey Soils [Текст] / T. Nakamura, K. Suzuki, H. Takahashi // Journal of Terramechanics. – 2020. – Vol. 90. – P. 15–26. – DOI: 10.1016/j.jterra.2020.05.002.

Leskovets I.V., Saveliev S.V.

LOADS IN THE TRACKED UNDERCARRIAGE OF A BULLDOZER DURING SOIL DIGGING OPERATION

Abstract. *The article considers the features of loading of a bulldozer tracked undercarriage in the soil digging mode. An analysis of modern domestic and foreign sources devoted to modeling the interaction of tracked undercarriage elements, dynamic loads, fatigue life and wear of track links is carried out. A mathematical model of the interaction of a track link with the rollers of a tracked undercarriage and soil is presented, taking into account the properties of the supporting surface and the dissipative characteristics of the hinge joint. Based on numerical simulation, the values of forces acting on track links during bulldozer operation in the digging mode with various chip thicknesses are obtained. The problems of determining loads at the design stage and directions for further research in the field of creating simulation models of a tracked undercarriage are formulated.*

Keywords: *bulldozer, tracked undercarriage, track, mathematical model, simulation model, dynamic loads.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Лесковец Игорь Вадимович Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь, заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины», канд. техн. наук, доцент e-mail: leskovets1966@mail.ru	**Leskovets Igor Vadimovich** Belarusian-Russian University, Mahileu, Republic of Belarus, Head of the Department "Transport and Technological machines", Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor e-mail: leskovets1966@mail.ru
Савельев Сергей Валерьевич Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» Омск, Российская Федерация, профессор кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», докт. техн. наук, профессор e-mail: saveliev_sergval@mail.ru	**Saveliev Sergey Valerievich** Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)" Omsk, Russian Federation, Professor Department of "Operation of Oil, Gas and Construction Equipment", Doctor of Technical Sciences (Engineering), professor e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

УДК 629.047

Лиджеев Д.В., Гончаров Р.Б., Евсеев К.Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАВМОБЕЗОПАСНОСТИ ВОДИТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА БОКОВОГО УДАРА

Аннотация. *В работе проведено сравнительное исследование нагрузок, действующих на манекен, расположенный на водительском месте, при двух типах бокового удара: удар подвижным деформируемым барьером и удар о жесткий столб. Сравнение проведено с помощью численного моделирования на основе метода конечных элементов и метода корпускулярных частиц. Описаны математические модели манекенов «EUROSID-2» и «WorldSID», деформируемого барьера, а также приводится описание других математических моделей элементов пассивной безопасности (кузов автомобиля, ремень безопасности с механизмом преднатяжителя и боковые подушки безопасности). В работе описан явный метод численного интегрирования, а также приведены зависимости, определяющие деформированное состояние модели на каждом шаге интегрирования. В соответствии с Правилами ООН №95 и №135 заданы граничные условия, связанные с кинематикой ударов испытываемого автомобиля с препятствиями и их закреплениями. По результатам виртуальных испытаний на пассивную безопасность был проведен сравнительный анализ критериев травмирования при двух типах бокового удара.*

Ключевые слова*: пассивная безопасность, боковой удар, деформируемый барьер, боковой удар о столб, подушка безопасности, ремень безопасности, метод конечных элементов, легковой автомобиль*

Постановка задачи

Для оценки полученных водителем травм при боковом ударе разработаны стандартизованные испытания. В частности, Правила ООН №95 [1], являющиеся частью ТР ТС 018/2011, регламентируют условия бокового столкновения между движущимся деформируемым барьером, имитирующим фронтальную часть автомобиля, и испытываемым транспортным средством, в то время как Правила ООН №135 [2] устанавливают требования, касающиеся бокового удара автомобиля о жесткий неподвижный объект (столб, дерево). Несмотря на схожесть этих двух видов испытаний, процесс физико-механического взаимодействия кузова автомобиля с препятствиями значительно отличается. При ударе подвижным деформируемым барьером энергия удара поглощается как за счет деформации самого барьера, так и за счет деформации части кузова автомобиля достаточно большой площади. В случае удара о столб деформируется ограниченная зона кузова, что приводит к глубокому проникновению препятствия в салон автомобиля и создает прямую угрозу жизни и здоровью водителя или пассажира [3]. Таким образом, необходимо провести сравнительное исследование нагрузок, действующих на манекены при различных видах бокового удара, в том числе с использованием различных критериев травмирования.

Анализ существующих исследований

В результате анализа статистических данных о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) [4-6] можно сделать вывод, что при боковых ударах возникают травмы крайне высокой степени тяжести. Несмотря на то, что такие аварии случаются реже лобовых столкновений, боковые удары представляют повышенную опасность [4-6]. Риск тяжелых травм здесь крайне высок, поскольку зона удара находится в непосредственной близости от водителя и пассажиров.

Существует ряд работ [7-9], где пассивная безопасность автомобилей оценивается путем измерения деформаций кузова в различных точках и с учетом сохранения жизненного пространства. В то же время вопрос оценки травмобезопасности водителя с помощью манекена (при его наличии) остается открытым.

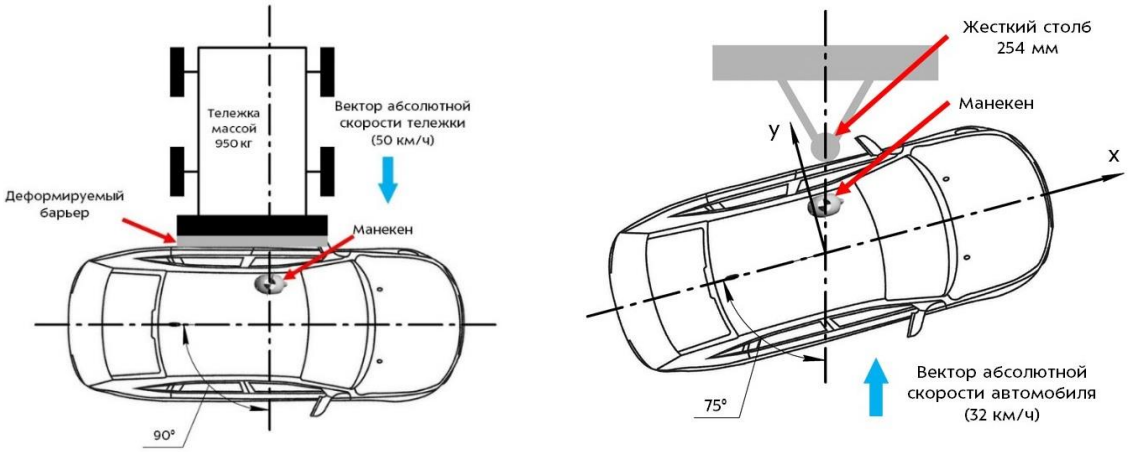
Цель работы

Оценка травмобезопасности водителя легкового автомобиля при двух видах бокового удара.

Основная часть

1. Критерии оценки пассивной безопасности легковых автомобилей в соответствии с требованиями Правил ООН №95 и №135

Проведем сравнительный анализ Правил ООН №95 и №135, который выявляет принципиальные различия в моделируемых сценариях ДТП. Испытание транспортного средства на пассивную безопасность при боковом столкновении регламентируется Правилами ООН №95 и №135. По Правилам ООН №95 тележка с установленным на ней деформируемым барьером общей массой 950 ± 20 кг, движущаяся со скоростью 50 ± 1 км/ч, под прямым углом сталкивается с боковой частью неподвижного автомобиля, а Правила ООН №135 регламентируют удар автомобиля, движущегося со скоростью 32 ± 1 км/ч под углом 75º по направлению движения, с жестким неподвижным вертикально установленным столбом диаметром 254 ± 6 мм. Схемы испытаний для двух типов бокового удара представлены на рис. 1.



а) б)

Рис. 1. Схемы испытаний: а) боковой удар подвижным деформируемым барьером (Правила ООН №95); б) боковой удар о столб (Правила ООН №135)

Согласно Правилам ООН №95 пассивная безопасность легковых автомобилей при ударе деформируемым барьером оценивается с помощью манекена взрослого мужчины 50-го процентиля «EUROSID-2» по пяти критериям травмирования. При боковом ударе о столб (Правила ООН №135) используется манекен взрослого мужчины 50-го

процентиля «WorldSID», а полученные травмы измеряются по шести биомеханическим критериям. Помимо количественных показателей, оба правила предъявляют ряд конструктивных требований, проверяемых в ходе натурных испытаний: сохранение целостности дверных защелок и петель, герметичность топливной системы и безопасность высоковольтного электрооборудования. В табл. 1 приведены пороговые значения критериев травмирования для двух рассматриваемых видов боковых ударов по Правилам ООН №95 и №135.

Таблица 1

Пороговые значения критериев травмирования

Параметр	Правила ООН №95	Правила ООН №135
Критерий травмирования головы манекена (HIC36), не более, ед.	1000	
Пиковая боковая нагрузка на плечо (вдоль оси «y»), кН	-	3
Максимальное значение смещения ребер грудной клетки, мм	42	55
Критерий по мягким тканям для грудной клетки (скорость сжатия грудной клетки), не более, м/с	1	-
Максимальное значение смещения ребер брюшной полости, мм	-	65
Пиковая внешняя нагрузка на брюшную секцию, кН	2,5	-
Ускорение нижнего отдела позвоночника, не более (в единицах ускорения свободного падения «g»)	-	75
Пиковая нагрузка, прилагаемая к лобковому симфизу, кН	6,00	3,36

2. Описание математических моделей для проведения виртуальных испытаний на пассивную безопасность

Особенности моделирования кузова легкового автомобиля

Точность результатов расчетов виртуальных испытаний в наибольшей степени зависит от качества математической модели транспортного средства и его элементов [10, 11]. В данном исследовании используется верифицированная конечно-элементная модель (КЭМ) легкового автомобиля «Toyota Yaris», которая была описана в работе [12]. На рис. 2 представлена КЭМ автомобиля.

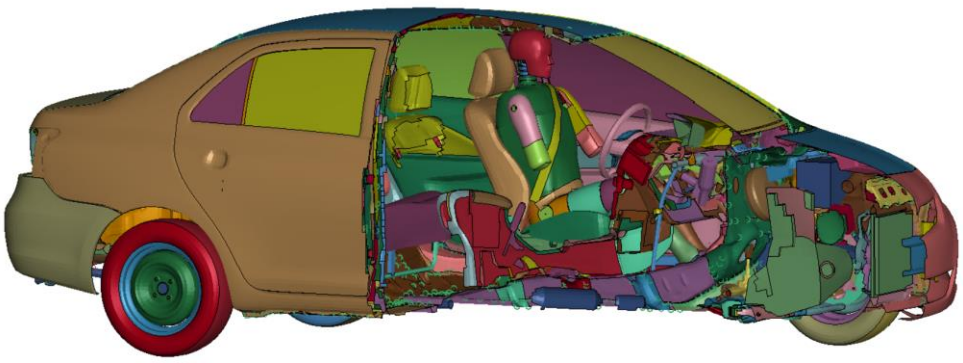


Рис. 2. КЭМ автомобиля «Toyota Yaris» с интегрированным манекеном «EuroSID-2»

Особенности моделирования подвижного деформируемого барьера

Подвижная тележка с установленным деформируемым барьером, адекватно воспроизводящим жесткость, геометрию и энергопоглощающую способность фронтальной зоны реального кузова, соответствует параметрам легкового автомобиля, осуществляющего боковой удар в испытываемый автомобиль. КЭМ подвижной тележки

с барьером была выполнена в соответствии с источником [13]. Модель фронтальной деформируемой части барьера представляет собой два сотовых алюминиевых блока, соединенных со стальными облицовочными листами с помощью клеевого соединения [14, 15]. Размер ячейки сотового блока составляет 19 мм. КЭМ алюминиевых сот и стальных листов состоит из двухмерных оболочечных КЭ. Средний размер конечно-элементной сетки барьера равен 13 мм. Для корректного описания процесса смятия сот при ударе используется упруго-пластичная модель материала, характерная для фронтальных энергопоглощающих элементов [16]. На рис. 3 представлена КЭМ подвижной тележки с деформируемым барьером.

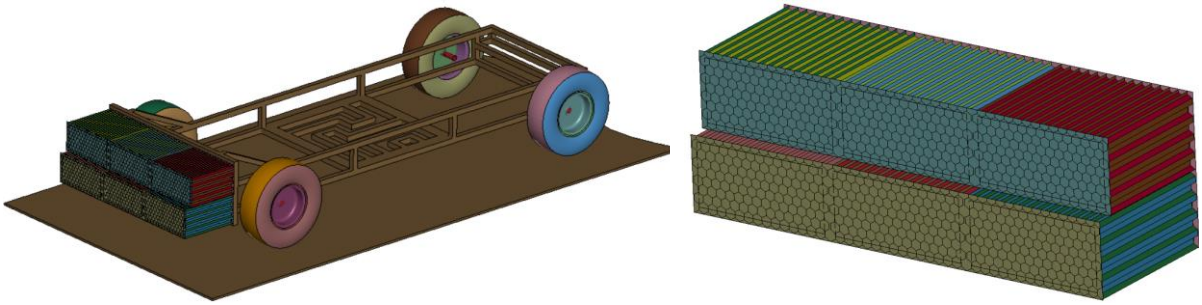


Рис. 3. Общий вид КЭМ подвижной тележки с деформируемым барьером

Особенности моделирования манекенов

В соответствии с Правилами ООН №95 для оценки нагрузок, действующих на водителя, используется манекен «EUROSID-2». КЭМ манекена [17] имеет модульную структуру, включающую шесть составляющих: голову, шею, туловище (с грудной клеткой, животом и плечами), тазовый отдел, а также верхние и нижние конечности. Модель построена преимущественно на основе объемных КЭ, что является стандартным и необходимым подходом для обеспечения биомеханической достоверности. Такие элементы позволяют точно моделировать сложное объемное напряженно-деформированное состояние тканей, костей и внутренних органов, а также корректно рассчитывать контактные взаимодействия, что критически важно для оценки критериев травмирования, основанных на объемных деформациях и нагрузках.

Для проведения испытаний в соответствии с Правилами ООН №135 используется манекен «WorldSID», отличающийся наивысшей биомеханической достоверностью среди манекенов, применяемых в испытаниях, связанных с боковым ударом [18]. Как и в случае с моделью манекена «EUROSID-2», КЭМ более совершенного манекена «WorldSID» [19] состоит из шести основных анатомических компонентов и выполнена по большей части из объемных КЭ. Основным отличием манекена «WorldSID» от «EUROSID-2» является наличие в конструкции ребер брюшной полости, что позволяет ему лучше воспроизводить нагрузки, приходящиеся на данную часть тела человека. Кроме того, масса манекена «WorldSID» составляет 74 кг, что на 6 кг меньше массы манекена «EUROSID-2».

На рис. 4 представлены использующиеся в данной работе КЭМ манекенов.

Особенности моделирования ремня безопасности и подушек безопасности

Далее рассмотрим КЭМ ремня безопасности и боковых подушек безопасности. В работе [12] были подробно описаны математические модели ремня безопасности и двух боковых подушек безопасности. Используемая в данной работе КЭМ трехточечного ремня безопасности с механизмом преднатяжителя включает в себя такие элементы, как: плечевая и поясная ленты, замок, верхнее кольцо, втягивающее устройство и нижний якорь. На рис. 5 представлена визуализация модели ремня безопасности при проведении виртуальных испытаний.



Рис. 4. КЭМ манекенов «EuroSID-2» (слева) и «WorldSID» (справа)

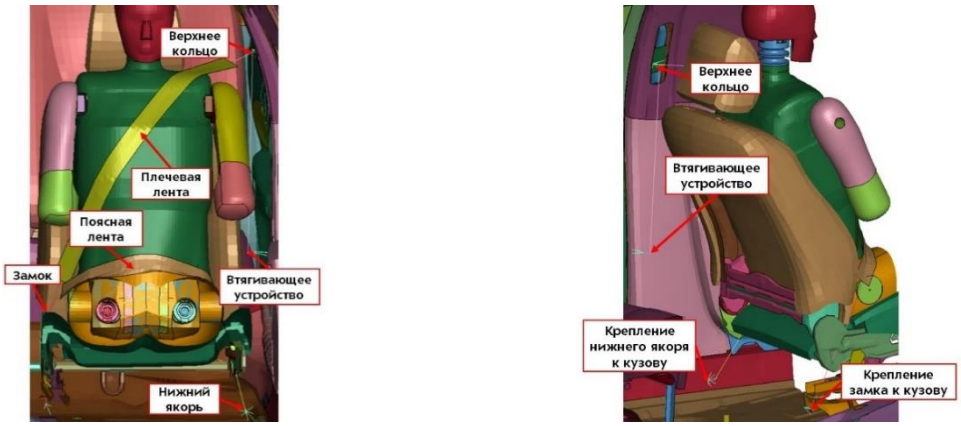


Рис. 5. КЭМ трехточечного ремня безопасности водителя автомобиля

В КЭМ автомобиля интегрированы модели двух боковых подушек безопасности – верхней («шторки» для защиты головы) и нижней (для защиты туловища). Процесс раскрытия моделей подушек безопасности реализован с помощью метода корпускулярных частиц, при котором частицы поступают во внутреннюю полость оболочки подушек безопасности и имитируют термодинамическое состояние газа на основе молекулярно-кинетической теории [20-23]. Взаимодействие корпускул с оболочкой подушки безопасности при этом осуществляется в соответствии со II законом Ньютона. Механические свойства ткани подушек безопасности задаются с помощью ортотропной слоистой модели, которая адекватно описывает работу материала, воспринимающего в основном растягивающие усилия [24-26]. Расположение КЭМ боковых подушек безопасности в раскрытом состоянии представлено на рис. 6.

На основе работ [27-29] и с учетом фундаментальных законов газодинамики были заданы формы кривых газового расхода для обеих подушек безопасности, а их пиковые значения были подобраны так, что полное раскрытие достигалось за 15 миллисекунд [30]. На рис. 7 представлены кривые массового расхода газа боковых подушек безопасности. Стоит отметить, что на представленных графиках время по оси абсцисс соответствует не времени моделирования бокового удара, а общему времени работы газогенератора, т.е. раскрытие подушек безопасности происходит с задержкой относительно начала виртуальных испытаний.

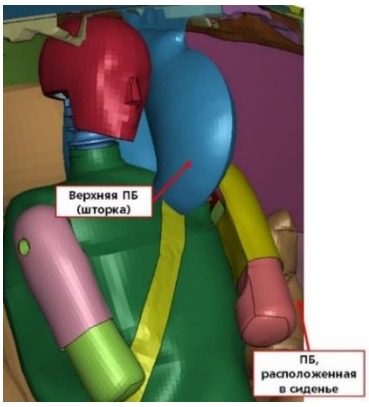
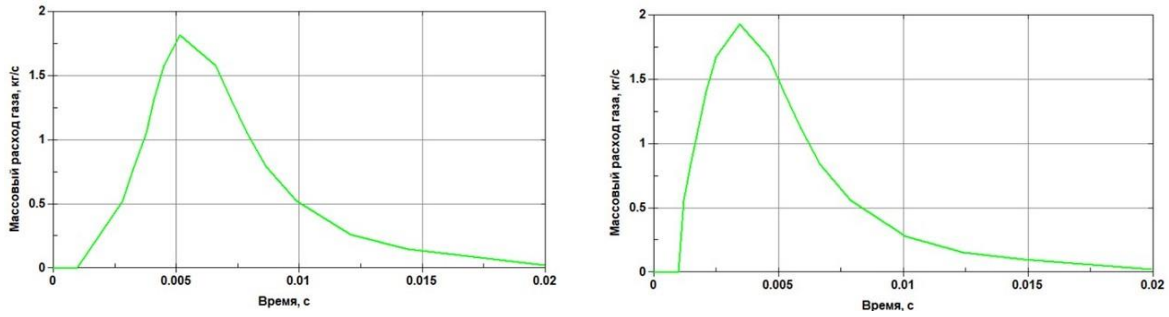


Рис. 6. Расположение боковых подушек безопасности в автомобиле



а) б)

Рис. 7. Зависимости массового расхода газа от времени для: а) верхней подушки безопасности («шторки»); б) нижней подушки безопасности

3. Выбор метода численного решения и постановка граничных условий

Описание явного метода численного интегрирования

Столкновение автомобиля с препятствием характеризуется высокой нелинейностью, которая заключается в нелинейности свойств материалов, геометрической нелинейности, контактном взаимодействии элементов и быстропротекающим (динамическим) процессом. С учетом этого, а также общепринятых рекомендаций [31] (рис. 8), для виртуальных испытаний автомобилей на пассивную безопасность наиболее целесообразно использовать решатель, реализующий явный метод интегрирования дифференциальных уравнений, которые описывают состояние системы.

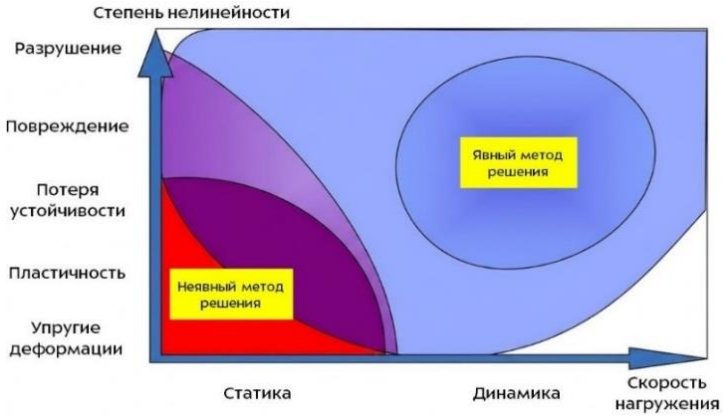


Рис. 8. Применимость методов интегрирования (решения) конечно-элементных задач [31]

В общем виде при решении задач методом конечных элементов (МКЭ) уравнение, описывающее состояние динамической системы, выглядит следующим образом [32]:

$$[M]\{\ddot{q}\}+[C]\{\dot{q}\}+[K]\{q\}=\{P\}, \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс;

$\{\ddot{q}\}$ – вектор ускорений;

$[C]$ – матрица демпфирования;

$\{\dot{q}\}$ – вектор скоростей;

$[K]$ – матрица жесткости;

$\{q\}$ – вектор перемещений;

$\{P\}$ – вектор внешних сил.

При помощи центрального разностного метода по уравнениям формулы (2) вычисляются векторы перемещений, скорости и ускорений:

$$\begin{aligned}
\{\ddot{q}\}_n &= [M]^{-1}\left(\{P\}_n-[C]\{\dot{q}\}_{n-\frac{1}{2}}+[K]\{q\}_n\right),\\
\{\dot{q}\}_{n+\frac{1}{2}} &= \{\dot{q}\}_{n-\frac{1}{2}}+\{\ddot{q}\}_n\,\Delta t_n, \quad (2)\\
\{q\}_{n+1} &= \{q\}_n+\{\dot{q}\}_{n+\frac{1}{2}}\,\Delta t_{n+\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

где n – текущий шаг интегрирования;

Δt_n – шаг интегрирования по времени.

При решении задач МКЭ с помощью явного метода интегрирования критически важным является значение шага интегрирования по времени. Данный шаг интегрирования дифференциальных уравнений вычисляется решателем программного комплекса автоматически, исходя из условия Куранта-Фридрикса-Леви по формуле (3) [28]:

$$\Delta t_n=\min\left(\frac{L_i}{c_i}\right), \quad (3)$$

где L_i – характерный размер i-го КЭ;

c_i – скорость звука в i-ом КЭ.

Граничные условия задач бокового удара

В соответствии с Правилами ООН №95 удар тележки с деформируемым барьером наносится перпендикулярно продольной оси испытываемого автомобиля. Вертикальная продольная плоскость барьера совмещается с поперечной плоскостью, проходящей через точку R (точка, которая определяет теоретическое положение центра вращения бедра человека относительно туловища) переднего сиденья со стороны удара, с отклонением ± 25 мм. На рис. 9 представлено расположение точки R. Испытание проводится на горизонтальной опорной поверхности. Поскольку испытываемый автомобиль не закреплен, то при ударе с тележкой происходит его свободное смещение.

В случае бокового удара о столб (испытание по Правилам ООН №135) ситуация противоположна испытанию по Правилам ООН №95 – испытываемый автомобиль движется со скоростью 32 км/ч в боковом направлении, а столб при этом неподвижен. КЭМ столба закреплена по всем степеням свободы в верхних и нижних узлах (рис. 10).

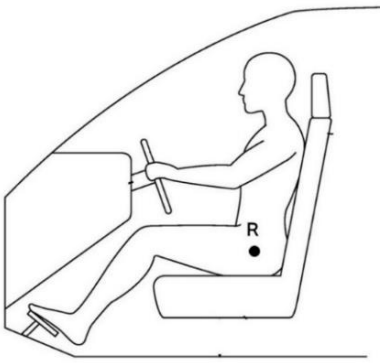


Рис. 9. Расположение точки «R»

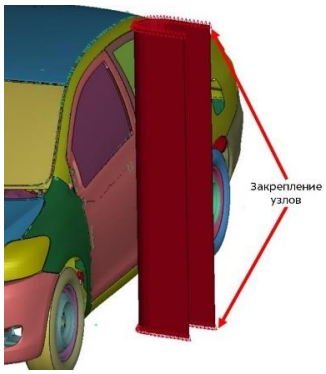


Рис. 10. Закрепление КЭМ столба

При натурных испытаниях по Правилам ООН №135 движение автомобиля в боковом направлении осуществляется на специальной рельсовой платформе для обеспечения требуемой кинематики удара. В данной работе модель такой платформы отсутствует, так как при моделировании кинематика удара определяется начальным положением автомобиля по отношению к столбу и заданным вектором скорости его кузова.

Для корректного воспроизведения ударов реализуется следующее контактное взаимодействие: КЭМ деформируемого барьера с дверьми (испытание по Правилам ООН №95) и КЭМ столба с дверью водителя (испытание по Правилам ООН №135). Контактное взаимодействие моделируется по принципу штрафных функций. Суть такого подхода заключается в прямо пропорциональной зависимости силы отталкивания от глубины взаимного проникновения контактирующих поверхностей. Коэффициент пропорциональности в таком случае определяется по формуле (4):

$$K = \frac{\rho c A}{\Delta t}, \tag{4}$$

где ρ – плотность материала;

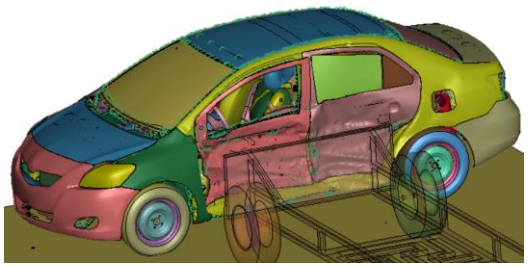
c – скорость звука;

A – площадь ячейки;

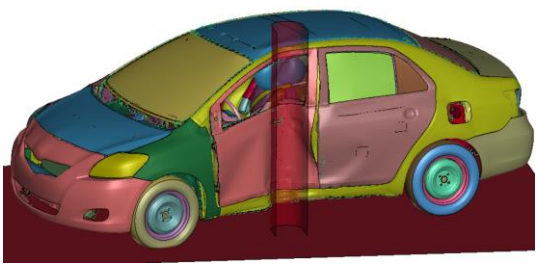
Δt – шаг интегрирования по времени.

4. Виртуальные испытания в соответствии с Правилами ООН №95 и №135

Сравнительная оценка тяжести двух типов бокового удара проводится путем прямого сопоставления абсолютных значений измеряемых критериев травмирования, включенных в требования Правил ООН №95 и №135. По результатам расчетов были получены картины деформированного состояния кузова автомобиля, приведенные на рис. 11.



а)



б)

Рис. 11. Картина деформированного состояния кузова автомобиля: а) при боковом ударе подвижным деформируемым барьером; б) при боковом ударе о столб

Поскольку конструктивно манекены «EUROSID-2» и «WorldSID» отличаются, нагрузка на область живота оценивается по-разному: манекен «WorldSID» не измеряет внешнюю силу, действующую на брюшную секцию, а манекен «EUROSID-2» не оценивает деформацию ребер брюшной полости. В результате проведения расчета получены значения всех критериев травмирования, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты виртуальных испытаний на пассивную безопасность при боковых ударах

Параметр	Пороговое значение (Правила ООН)	Боковой удар подвижным барьером (ООН №95)	Боковой удар о столб (ООН №135)
Критерий травмирования головы манекена (HIC36), ед.	1000 (№95, №135)	153	874
Пиковая боковая нагрузка на плечо (вдоль оси «y»), кН	3 (№135)	0,96	2,64
Максимальное значение смещения ребер грудной клетки, мм	42 (№95) 55 (№135)	31	48
Критерий по мягким тканям для грудной клетки (скорость сжатия грудной клетки), м/с	1,0 (№95)	0,33	1,24*
Максимальное значение смещения ребер брюшной полости, мм	65 (№135)	-	52,3
Пиковая внешняя нагрузка на брюшную секцию, кН	2,5 (№95)	0,8	-
Ускорение нижнего отдела позвоночника (в единицах ускорения свободного падения «g»)	75 (№135)	34,66*	74,92
Пиковая нагрузка, прилагаемая к лобковому симфизу, кН	6 (№95) 3,36 (№135)	1,78	3,04

* - значения критериев получены расчетным способом и не применяются в рамках данных Правил ООН

На рис. 12 представлены графики изменения значений соответствующих критериев травмирования от времени удара, полученные в результате проведения виртуальных испытаний. Анализ результатов моделирования и картин деформированного состояния автомобиля (рис. 13) показывает наглядное различие в характере взаимодействия манекена с интерьером автомобиля в зависимости от типа бокового удара. По всем сравниваемым критериям травмирования боковой удар о столб (Правила ООН №135) является более тяжелым режимом нагружения, чем удар подвижным деформируемым барьером (Правила ООН №95) с позиции пассивной безопасности транспортного средства. Значение критерия травмирования головы манекена (HIC36) при боковом ударе о столб превосходит аналогичное значение при боковом ударе подвижным деформируемым барьером более чем в 5 раз (874 единицы и 153 единицы соответственно). В первую очередь это связано с характером ударного взаимодействия. При ударе деформируемым барьером нагрузка распределяется по большей площади нижней части боковины кузова. В отличие от этого, при столкновении со столбом зона контакта локальна и охватывает всю высоту кузова в районе передней двери и стойки. Локальное воздействие при боковом ударе о столб приводит к полуторакратному увеличению максимального смещения ребер грудной клетки (с 31 мм до 48 мм) и резкому росту скорости их смещения (с 0,33 м/с до 1,24 м/с) по сравнению с ударом подвижной тележкой. Значение пиковой боковой нагрузки на левое плечо при боковом ударе о столб почти в 3 раза больше, чем при ударе подвижным деформируемым барьером (0,96 кН и 2,64 кН соответственно).

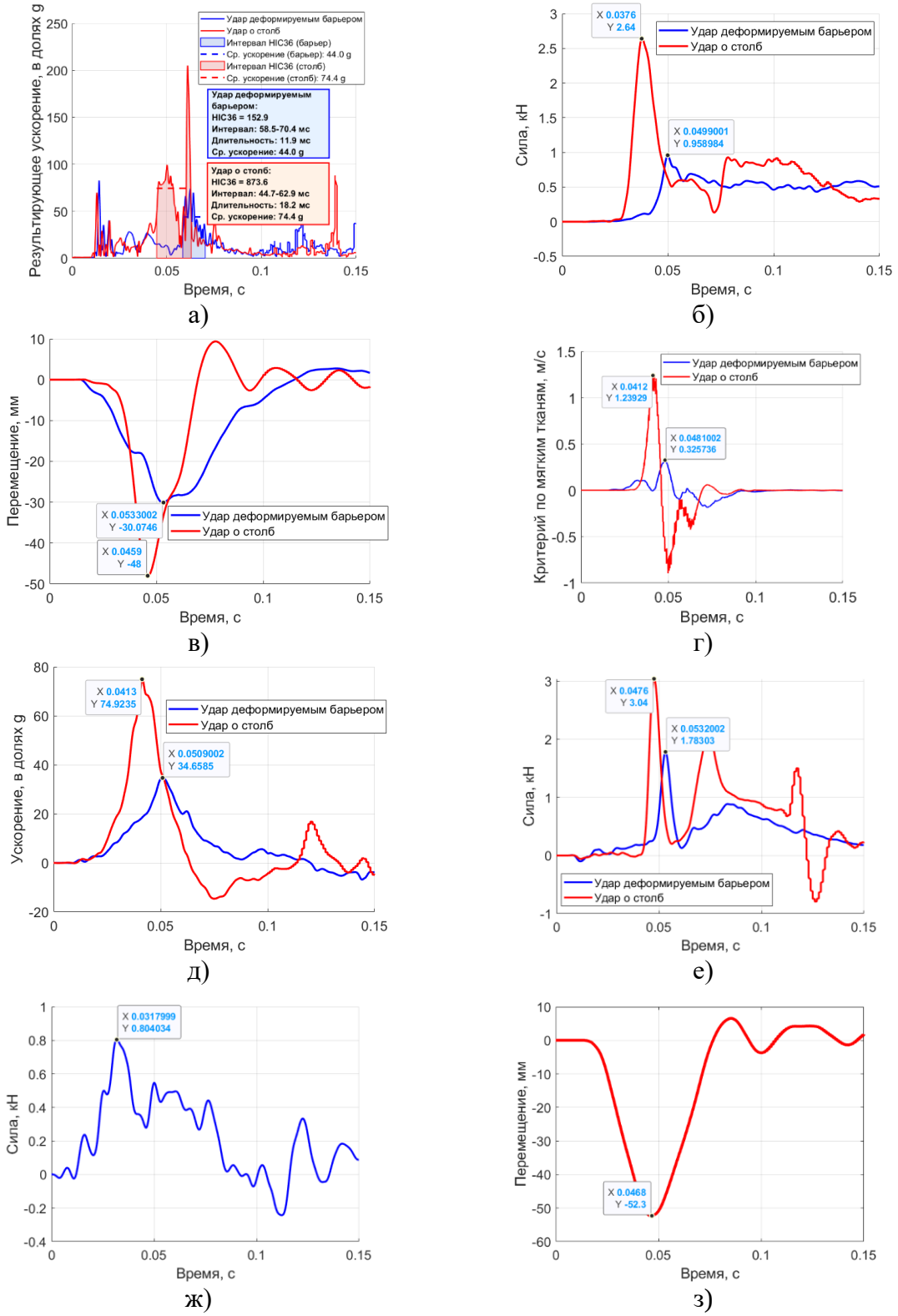
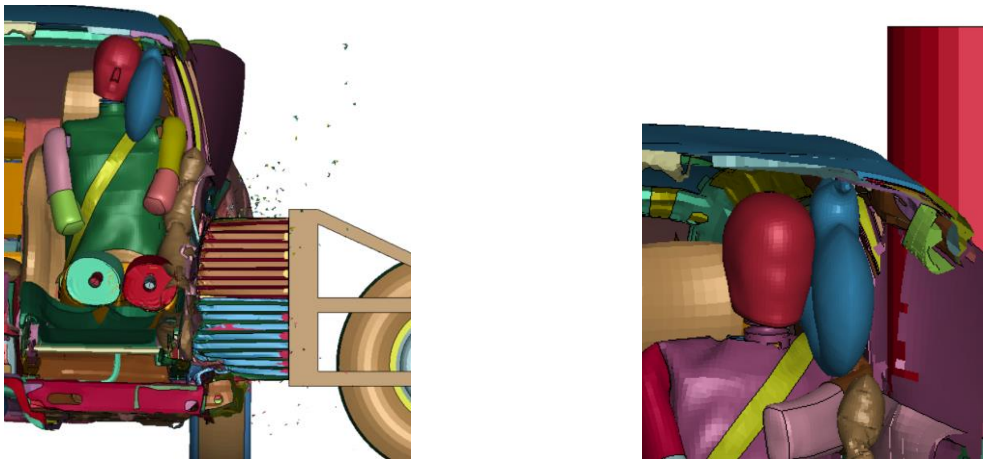


Рис. 12. Графики изменения значений критериев травмирования от времени при двух видах бокового удара: а) результирующее ускорение головы манекена и значение HIC36; б) боковая нагрузка, действующая на левое плечо; в) смещение ребер грудной клетки; г) критерий по мягким тканям для грудной клетки; д) ускорение нижнего отдела позвоночника е) нагрузка, прикладываемая к лобковому симфизу; ж) внешняя нагрузка на брюшную секцию; з) смещение ребер брюшной полости



а) б)

Рис. 13. Взаимодействие манекена с боковыми подушками безопасности и интерьером автомобиля: а) при боковом ударе подвижным деформируемым барьером; б) при боковом ударе о столб

Аналогично верхней части туловища манекена, значения критериев травмирования, относящихся к нижней части тела, имеют существенную разницу для двух типов ударов. Так, ускорение нижнего отдела позвоночника при боковом ударе о столб по сравнению с боковым ударом деформируемым барьером возрастает в 2 раза – с 34,66g до 74,92g, а нагрузка, действующая на плечо, – в 1,7 раза (с 1,78 кН до 2,64 кН).

Выводы

Проведенное исследование однозначно подтверждает более существенную для водителя травмоопасность бокового удара о столб (Правила ООН №135) по сравнению с боковым ударом подвижным деформируемым барьером (Правила ООН №95). Наибольшая разница в результатах наблюдается у критерия травмирования головы: при боковом ударе о столб значение данного критерия травмирования почти в 6 раз выше, чем в случае бокового удара деформируемым барьером. Значения остальных критериев травмирования также оказались выше при ударе о столб, а их разница варьировалась в диапазоне от 1,7 (деформация ребер грудной клетки) до 2,2 раза (ускорение нижнего отдела позвоночника).

При этом стоит отметить, что все критерии травмирования для рассматриваемых режимов нагружения не превышают пороговые значения, установленные Правилами ООН №95 и 135. Таким образом, исследуя вопросы, связанные с пассивной безопасностью легкового автомобиля при боковом ударе (в части анализа травмобезопасности водителя), следует, прежде всего, рассматривать боковой удар о столб (Правила ООН №135), так как данный вид бокового удара является более травмоопасным по сравнению с ударом подвижным деформируемым барьером (Правила ООН №95).

Список литературы

1. UNECE Regulation No. 135 (E/ECE/324/Rev.2/Add.134/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.134/Rev.2). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their Pole Side Impact performance (PSI). UN, 2025. – 54 с.

2. UNECE Regulation No. 95 (E/ECE/324/Rev.1/Add.94/Rev.4 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.94/Rev.4). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision. UN, 2023. – 80 с.

3. Зузов В.Н., Сулегин Д.А. Исследование влияния на энергоёмкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара. Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение., 2020. №4., с. 20-34. DOI: 10.14529/engin200403. EDN: MJDFIQ.

4. V. Eis, D. Otte, R. Schafer. Characteristics of passenger car side to pole impacts – Analysis of German and UK in-depth data using different approaches. SAE Technical Paper, 2008, pp. 1-14. DOI: 10.4271/2008-22-0014.

5. FARS Encyclopedia: Vehicles – All Vehicles (Электронный ресурс) – URL: https://www-fars.nhtsa.dot.gov/Vehicles/VehiclesAllVehicles.aspx (дата обращения 20.12.2025).

6. FA Pintar, DJ Maiman, N. Yoganandan. Injury patterns in side pole crashes. Annual proceedings / Association for the Advancement of Automotive Medicine. Association for the Advancement of Automotive Medicine., 2007, vol. 51.

7. Long C., Chung Kim Yuen S., Gerald N. Analysis of a car door subjected to side pole impact. Latin American Journal of Solids and Structures, 2019, vol. 16 (8), pp. 1-17. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255753.

8. Сулегин Д.А. Оптимизация конструкции основания кузова грузопассажирского автомобиля в целях повышения энергоемкости при боковом ударе. Инженерный журнал: наука и инновации., 2021, №2 (110). EDN: PQOPFN.

9. AS Siva Balan, A. Bragadeshwaran, G. Eswaramoorthy, et al. Vehicle side safety enhancement through door intrusion barrier analysis and recuperation. SAE Technical Paper, 2019, pp. 1-13. DOI:10.4271/2019-26-0001.

10. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Совершенствование конструкций кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для обеспечения требований пассивной безопасности при ударе и минимизации массы. Труды НАМИ., 2019. № 4 (279). С. 28-37. EDN: XXVGQA.

11. Четвериков М.В., Гончаров Р.Б., Бутарович Д.О. Исследование остаточного напряженно-деформированного состояния несущей системы минипогрузчика при многократном нагружении по требованиям стандарта безопасности ROPS // Труды НАМИ. 2023. № 1 (292). С. 46-55. EDN: DETBGE.

12. Лиджеев Д.В., Гончаров Р.Б., Евсеев К.Б. Анализ степени влияния активных элементов системы пассивной безопасности легкового автомобиля на травмируемость водителя при боковом ударе о столб. Труды НАМИ. 2026;(2):29-42. EDN: CFHYFU.

13. LSTC Barrier Models [Электронный ресурс] / ANSYS, Inc. – Электрон. дан. – [Питтсбург] : ANSYS, Inc., 2022. – Режим доступа: https://lsdyna.ansys.com/lstc-barrier-models/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. – Дата обращения: 23.12.2025.

14. T. Trylend. Alternative Models of the Offset and Side Impact Deformable Barriers. 9th International LS-DYNA user conference., 2008. pp. 24-39. URL: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/12CrashSafety.pdf (дата обращения 23.12.2025).

15. H. Yang, L. Li, Q. Liu, et al. Finite element modelling and validation of the honeycombs for automobile crash MDB and ODB. 9th European LS-DYNA Conference., 2013, pp. 1-8. URL: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2022/11/finite-element-modelling-and-validation-of-the-honeycombs-for-automobile-crash-mdb-and-odb.pdf (дата обращения 23.12.2025).

16. S. Nasim, S.Z.H. Shah, T. Liaghat, et al. Trigger geometry influencing the failure modes in steel/polymer/steel sandwich crashboxes: Experimental and numerical evaluation. Composite Structures., 2021 vol. 262 (4). – Art. No. 113619 DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113619.

17. U. Franz, O. Graf. Accurate and detailed LS-DYNA FE models of the US- and EUROSID: A Review of the German FAT Project. 6th International LS-DYNA user

conference. Detroit, USA., 2000. pp. 3-20 URL: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/session2-2.pdf (дата обращения 23.12.2025).

18. T. Xu, X. Sheng, T. Zhang, et al. Development and Validation of Dummies and Human Models Used in Crash Test. Appl Bionics Biomech., 2018 (8): 1-12. DOI: 10.1155/2018/3832850.

19. F. Tahan, D. Marzougui, CD Kan, et al. Development of LSTC WorldSID Dummy Finite Element Model (50th Percentile Male). 15th International LS-DYNA Users Conference., 2018. URL: https://www.academia.edu/126992622/Development_of_LSTC_WorldSID_Dummy_Finite_Element_Model_50_th_Percentile_Male_ (дата обращения: 25.12.2025).

20. Гонсалес А.А.В., Гончаров Р.Б., Петюков А.В. Физико-математическое моделирование процесса взаимодействия подушки безопасности легкового автомобиля с антропоморфным манекеном. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки., 2022, № 4 (103), с. 4–21. DOI: https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-4-21. EDN: NJQZLI.

21. C. H. Lin, Y. P. Cheng, J. Wang. Evaluation of LS-DYNA Corpuscular Particle Method for Side Impact Airbag Deployment Applications. 13th International LS-DYNA Users Conference., 2018. URL: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/evaluation-of-ls-dyna-r-corpuscular-particle-method-for-side-impact-airbag-deployment-applications.pdf (дата обращения: 06.01.2026).

22. Petyukov A.V., Goncharov R.B., Gonsales Astua A.V. Numerical simulation of airbag module operating features // AIP Conf. Proc. 2023. № 2833 (1): 020043. DOI: 10.1063/5.0151985.

23. H. Teng, J. Wang, D. Bhalsod. The Recent Progress and Potential Applications of Corpuscular Method in LS-DYNA. 11th International LS-DYNA Users Conference: conference proceedings. Munich, Germany., 2010, pp. 85–103. URL: https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2010/Automotive-3-4.pdf (дата обращения: 06.01.2026).

24. D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. Sahli, et al. Numerical analysis of side airbags deployment in out-of-position situations. International Journal of Mechanical and Materials Engineering., 2017, vol. 12, Iss. 1. – Art. No. 5. DOI: 10.1186/s40712-016-0070-2.

25. A. Chawla, S. Mukherjee, J. Jangra, et al. Issues in ALE simulation of airbags. International Journal of Crashworthiness., 2007, vol. 12, Iss. 5, pp. 559–566. DOI: 10.1080/13588260701492939.

26. A. Hirth, A. Haufe, L. Olovsson. Airbag Simulation with LS-DYNA: Past-Present-Future., 6th European LS-DYNA Users' Conference: conference proceedings., 2007. URL: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/airbag-simulation-with-ls-dyna-past-2013-present.pdf (дата обращения: 26.12.2025).

27. H. Singh, V. Ganesan, J. Davies, et al. Vehicle interior and restraints modeling development of full vehicle finite element model including vehicle interior and occupant restraints systems for occupant safety analysis using THOR dummies. Report № DOT HS 812 545, Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration., 2018. URL: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812545_edagvehicleinteriorandrestraintsmodelingreport.pdf (дата обращения 16.02.2026).

28. Marklund, P. O. Optimization of airbag inflation parameters for the minimization of out of position occupant injury / P. O. Marklund, L. Nilsson // Computational Mechanics. – 2003. – Vol. 31, No. 6. – P. 496-504. – DOI 10.1007/s00466-003-0457-9. – EDN ESUFUP.

29. Tay Y. Y., Moradi R., Lankarani H. M. A Numerical Analysis of Pre-Deployment Effect of Side-Impact Airbags in Reducing Occupant Injuries // Volume 13: Transportation Systems. : American Society of Mechanical Engineers, 2013.

30. Гонсалес Астуа А.В. Структурно-функциональный анализ гибридных

газогенераторов модулей подушек безопасности автомобиля. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение., 2024, №1 (148), с. 36-54. EDN: CTXJNK.

31. Altair University. Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide. Academic Program [Электронный ресурс]. – 3rd ed. – [Troy, MI], 2015. – 503 p. – URL: https://altairuniversity.com/free-ebooks/free-ebook-practical-aspects-of-finite-element-simulation-a-study-guide/ (дата обращения: 26.12.2025).

32. Зузов, В. Н. Механика наземных транспортно-технологических средств / В. Н. Зузов. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2015. – 188 с. – ISBN 978-5-7038-4097-9. – EDN ZCLEXJ.

References

1. UNECE Regulation No. 135 (E/ECE/324/Rev.2/Add.134/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.134/Rev.2). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their Pole Side Impact performance (PSI). UN, 2025, 54 p.

2. UNECE Regulation No. 95 (E/ECE/324/Rev.1/Add.94/Rev.4 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.94/Rev.4). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision. UN, 2023, 80 p.

3. Zuzov V.N., Sulegin D.A. Study of the influence on energy intensity of the main load-bearing elements of the car body in the side impact zone. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering], 2020, no. 4, pp. 20–34. (in Russian).

4. Eis V., Otte D., Schafer R. Characteristics of passenger car side to pole impacts – Analysis of German and UK in-depth data using different approaches. SAE Technical Paper, 2008, pp. 1–14. DOI: 10.4271/2008-22-0014.

5. FARS Encyclopedia: Vehicles – All Vehicles. Available at: https://www-fars.nhtsa.dot.gov/Vehicles/VehiclesAllVehicles.aspx (accessed 20.12.2025).

6. Pintar F.A., Maiman D.J., Yoganandan N. Injury patterns in side pole crashes. Annual proceedings / Association for the Advancement of Automotive Medicine. Association for the Advancement of Automotive Medicine., 2007, vol. 51.

7. Long C., Chung Kim Yuen S., Gerald N. Analysis of a car door subjected to side pole impact. Latin American Journal of Solids and Structures, 2019, vol. 16, no. 8, pp. 1–17. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255753.

8. Sulegin D.A. Optimization of the body base structure of a cargo-passenger vehicle to increase energy absorption in a side impact. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 2 (110). (in Russian).

9. Siva Balan A.S., Bragadeshwaran A., Eswaramoorthy G., et al. Vehicle side safety enhancement through door intrusion barrier analysis and recuperation. SAE Technical Paper, 2019, pp. 1–13. DOI:10.4271/2019-26-0001.

10. Goncharov R.B., Zuzov V.N. Improvement of truck cab designs at the design stage to meet passive safety requirements under impact and minimize weight. Trudy NAMI [Proceedings of NAMI], 2019, no. 4 (279), pp. 28–37. (in Russian).

11. Chetverikov M.V., Goncharov R.B., Butarovich D.O. Investigation of residual stress-strain state of the skid-steer loader supporting structure under repeated loading according to ROPS safety standard. Trudy NAMI [Proceedings of NAMI], 2023, no. 1 (292), pp. 46–55. (in Russian).

12. Lidzheev D.V., Goncharov R.B., Evseev K.B. Analysis of the degree of impact of passive safety system active elements of passenger cars on driver’s pole side impact injuring. Trudy NAMI. 2026;(2):29-42. (in Russ). EDN: CFHYFU.

13. LSTC Barrier Models. ANSYS, Inc., 2022. Available at: https://lsdyna.ansys.com/lstc-barrier-models/ (accessed 23.12.2025).

14. Trylend T. Alternative Models of the Offset and Side Impact Deformable Barriers. 9th International LS-DYNA user conference, 2008, pp. 24–39. Available at: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/12CrashSafety.pdf (accessed 23.12.2025).

15. Yang H., Li L., Liu Q., et al. Finite element modelling and validation of the honeycombs for automobile crash MDB and ODB. 9th European LS-DYNA Conference, 2013, pp. 1–8. Available at: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2022/11/finite-element-modelling-and-validation-of-the-honeycombs-for-automobile-crash-mdb-and-odb.pdf (accessed 23.12.2025).

16. Nasim S., Shah S.Z.H., Liaghat T., et al. Trigger geometry influencing the failure modes in steel/polymer/steel sandwich crashboxes: Experimental and numerical evaluation. Composite Structures, 2021, vol. 262 (4), art. no. 113619. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113619.

17. Franz U., Graf O. Accurate and detailed LS-DYNA FE models of the US- and EUROSID: A Review of the German FAT Project. 6th International LS-DYNA user conference, Detroit, USA, 2000, pp. 3–20. Available at: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/session2-2.pdf (accessed 23.12.2025).

18. Xu T., Sheng X., Zhang T., et al. Development and Validation of Dummies and Human Models Used in Crash Test. Appl Bionics Biomech., 2018, vol. 8, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2018/3832850.

19. Tahan F., Marzougui D., Kan C.D., et al. Development of LSTC WorldSID Dummy Finite Element Model (50th Percentile Male). 15th International LS-DYNA Users Conference, 2018. Available at: https://www.academia.edu/126992622/Development_of_LSTC_WorldSID_Dummy_Finite_Element_Model_50_th_Percentile_Male_ (accessed 25.12.2025).

20. Gonsales A.A.V., Goncharov R.B., Petyukov A.V. Physico-mathematical modeling of the interaction process of a passenger car airbag with an anthropomorphic dummy. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences], 2022, no. 4 (103), pp. 4–21. (in Russian).

21. Lin C.H., Cheng Y.P., Wang J. Evaluation of LS-DYNA Corpuscular Particle Method for Side Impact Airbag Deployment Applications. 13th International LS-DYNA Users Conference, 2018. Available at: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/evaluation-of-ls-dyna-r-corpuscular-particle-method-for-side-impact-airbag-deployment-applications.pdf (accessed 06.01.2026).

22. Petyukov A.V., Goncharov R.B., Gonsales Astua A.V. Numerical simulation of airbag module operating features. AIP Conf. Proc., 2023, no. 2833 (1), 020043. DOI: 10.1063/5.0151985.

23. Teng H., Wang J., Bhalsod D. The Recent Progress and Potential Applications of Corpuscular Method in LS-DYNA. 11th International LS-DYNA Users Conference, Munich, Germany, 2010, pp. 85–103. Available at: https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2010/Automotive-3-4.pdf (accessed 06.01.2026).

24. Bendjaballah D., Bouchoucha A., Sahli M., et al. Numerical analysis of side airbags deployment in out-of-position situations. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2017, vol. 12, iss. 1, art. no. 5. DOI: 10.1186/s40712-016-0070-2.

25. Chawla A., Mukherjee S., Jangra J., et al. Issues in ALE simulation of airbags. International Journal of Crashworthiness, 2007, vol. 12, iss. 5, pp. 559–566. DOI: 10.1080/13588260701492939.

26. Hirth A., Haufe A., Olovsson L. Airbag Simulation with LS-DYNA: Past-Present-Future. 6th European LS-DYNA Users' Conference, 2007. Available at: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/airbag-simulation-with-ls-dyna-past-2013-present.pdf (accessed 26.12.2025).

27. Singh H., Ganesan V., Davies J., et al. Vehicle interior and restraints modeling development of full vehicle finite element model including vehicle interior and occupant restraints systems for occupant safety analysis using THOR dummies. Report No. DOT HS 812 545, Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2018. Available at: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812545_edagvehicleinteriorandrestraintsmodelingreport.pdf (accessed 16.02.2026).

28. Marklund P.O., Nilsson L. Optimization of airbag inflation parameters for the minimization of out of position occupant injury. Computational Mechanics, 2003, vol. 31, no. 6, pp. 496–504. DOI: 10.1007/s00466-003-0457-9.

29. Tay Y.Y., Moradi R., Lankarani H.M. A Numerical Analysis of Pre-Deployment Effect of Side-Impact Airbags in Reducing Occupant Injuries. Volume 13: Transportation Systems, American Society of Mechanical Engineers, 2013.

30. Gonsales Astua A.V. Structural and functional analysis of hybrid gas generators of car airbag modules. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering], 2024, no. 1 (148), pp. 36–54. (in Russian).

31. Altair University. Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide. Academic Program. 3rd ed. Troy, MI, 2015, 503 p. Available at: https://altairuniversity.com/free-ebooks/free-ebook-practical-aspects-of-finite-element-simulation-a-study-guide/ (accessed 26.12.2025).

32. Zuzov V.N. Mekhanika nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Mechanics of ground transport and technological means]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2015, 188 p. (in Russian).

Lidzheev D.V., Goncharov R.B., Evseev K.B.

ANALYSIS OF DRIVER INJURY SAFETY DEPENDING ON THE TYPE OF SIDE IMPACT

Abstract*. This paper presents a comparative study of the loads acting on a dummy positioned in the driver's seat during two types of side impacts: an impact with a movable deformable barrier and an impact with a rigid pole. The comparison is conducted using numerical simulation based on the finite element method and the particle physics method. Mathematical models of the EUROSID-2 and WorldSID dummies, a deformable barrier, and other mathematical models of passive safety components (vehicle body, seat belt with pretensioner mechanism, and side airbags) are described. An explicit numerical integration method is described, along with dependencies determining the model's deformation state at each integration step. In accordance with UN Regulations Nos. 95 and 135, boundary conditions related to the kinematics of the test vehicle's impacts with the barriers and their fastenings are specified. Based on the results of virtual passive safety tests, a comparative analysis of injury criteria for two types of side impacts is conducted.*

Keywords*: passive safety, side impact, deformable barrier, side pole impact, airbag, seatbelt, finite element method, passenger car*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Лиджеев Дорджи Викторович Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация Аспирант кафедры «Колесные машины» e-mail: lidzheevdv@bmstu.ru	**Lidzheev Dordzhi Viktorovich** Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Moscow, Russian Federation Wheeled Vehicles Department Postgraduate student e-mail: lidzheevdv@bmstu.ru
Гончаров Роман Борисович Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация Доцент кафедры «Колесные машины» Кандидат технических наук e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru	**Goncharov Roman Borisovich** Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Moscow, Russian Federation Wheeled Vehicles Department Associate Professor Candidate of Technical Sciences e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru
Евсеев Кирилл Борисович Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация Заведующий кафедрой «Колесные машины» Доктор технических наук, доцент e-mail: kb_evseev@bmstu.ru	**Evseev Kirill Borisovich** Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Moscow, Russian Federation Head of the Wheeled Vehicles Department Doctor of Technical Sciences, the academic title of Docent e-mail: kb_evseev@bmstu.ru

УДК 625.17:65.012.12

Юркова Е.О., Ильиных А.С., Култан М.А., Бармин Н.Н.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Аннотация. *Капитальный ремонт путей важен для обеспечения безопасности и эффективности железных дорог, однако сложность возникает из-за сокращения длительности технологических окон, влияющих на качество и стоимость ремонтных работ.*

Обеспечение необходимого качества и объемов работ по капитальному ремонту железнодорожного пути при сокращении продолжительности технологических «окон» является насущной задачей для надежного и безопасного функционирования железнодорожной транспортной системы.

В рамках исследования был проанализирован этап демонтажа рельсошпальной решётки, являющийся составной частью технологического процесса капитального ремонта железнодорожного пути. Для его изучения с помощью AnyLogic была разработана и реализована имитационная модель для проведения анализа, позволяющего оценить эффективность технологического процесса капитального ремонта железнодорожного пути на основе определения вероятности выполнения работ в установленное «оконное» время.

Ключевые слова: *капитальный ремонт пути, имитационное моделирование, демонтаж рельсошпальной решетки, железнодорожный путь, технология капитального ремонта.*

Постановка задачи

Эффективность функционирования железнодорожной транспортной системы в большой степени зависит от надежности и безопасности инфраструктуры, ключевым элементом которой является железнодорожный путь. Бесперебойное движение поездов в первую очередь определяется исправностью железнодорожного пути. Важнейшей частью системы поддержания железнодорожной инфраструктуры в исправном состоянии является капитальный ремонт железнодорожного пути, который направлен на восстановление технического состояния путевого хозяйства с целью обеспечения безопасности и эффективности движения поездов [1-6].

При всей необходимости проведения капитального ремонта железнодорожного пути, его реализация усложняется необходимостью организации технологических «окон» – закрытия перегонов для движения поездов, что приводит к значительным убыткам, связанным с ограничением пропускной способности участков пути, задержкой движения и снижением скорости перевозок. В этой связи в условиях интенсификации работы железнодорожного транспорта, происходит повсеместное сокращение как количества технологических «окон», так и их продолжительности. Уменьшение времени производства работ негативно сказывается на качестве их выполнения, которое может выражаться в уменьшении объема ремонта, нарушении геометрии рельсового пути, недостаточном закреплении рельсошпальной решетки в проектном положении и

наличии других дефектов [7, 8]. Все это приводит в послеремонтный период к снижению скоростей движения на участке пути, повторным назначениям технологических воздействий, образованию остродефектных рельсов и, как следствие, к снижению эффективности работы транспортного производства в целом. Кроме того, величина расходов на организацию и проведение капитального ремонта железнодорожного пути в значительной степени определяется продолжительностью технологического «окна» и тесно связана с используемой технологией выполнения ремонтных работ [9-11].

На основании вышеизложенного обеспечение необходимого качества и объёмов выполнения капитального ремонта железнодорожного пути при переменной продолжительности технологических «окон» выступает одной из ключевых задач, направленных на поддержание стабильного, надёжного и безопасного функционирования железнодорожной транспортной системы.

Анализ последних исследований

В настоящее время в филиалах ОАО «РЖД» применяются технологии капитального ремонта железнодорожного пути, обеспечивающие среднесуточную производительность комплекса работ на уровне 1600 метров отремонтированного пути. При благоприятных условиях данный показатель может достигать 2000 метров в сутки. Реализация указанных технологий предполагает задействование свыше 200 единиц путевой техники и вагонов, а также привлечение к работам до 350 человек персонала [12].

Следует также отметить, что технологические процессы характеризуются значительным объёмом ручных операций, которые неравномерно распределены по всему фронту работ.

Анализ производственного процесса работы машинных комплексов при капитальном ремонте железнодорожного пути показывает, что, как правило, производительность отдельной машины, заявленная заводом-изготовителем, не достигается вследствие имеющейся зависимости от других операций. Так, например, при нормативной производительности укладочного крана УК-25 750 м уложенного пути в час, фактическая выработка составляет не более 300 м в час. На производительность укладочного крана существенное влияние оказывают такие операции, как подвоз пакетов звеньев рельсошпальной решётки, их перетяжка, переворот первого звена, а также стыковка и рихтовка укладываемых звеньев. Несмотря на то, что для указанных операций установлены нормы времени, их выполнение не отражается в пооперационном графике, что затрудняет оценку их совокупного влияния на эффективность технологического процесса в целом [12-14].

Для исключения неравномерности времени выполнения отдельных операций и используемого персонала требуется оптимизация технологии производства работ на основе внедрения инновационных путевых машин и средств малой механизации. При этом целевым параметром является повышение производительности капитального ремонта железнодорожного пути до 3000 м в сутки [15]. Сдерживающим фактором в решении данной задачи является отсутствие информации о лимитирующих операциях, которые требуют совершенствования.

Цель работы

В концепции системы технического обслуживания пути, утвержденной ОАО «РЖД» 28.04.2023 г. № ЦДИ-2527, отмечено, что в реестре нормативно-технической документации проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре ОАО «РЖД» в части путевого хозяйства числится 444 технологических документа, непосредственно регулирующих работы по обслуживанию и ремонту железнодорожного

пути, из которых: 76 технологических и 67 опытных технологических процессов; 145 карт технологического процесса; 69 технико-нормировочных, 69 типовых технологических и 18 опытных технологических карт. Кроме того, на основании типовых документов дистанциями пути и путевыми машинными станциями разрабатываются технологические карты и технологические процессы, обеспечивающие конкретизированные параметры и показатели работ для местных условий. При этом одни и те же операции могут нормироваться несколькими документами, зачастую не согласующихся между собой. Применение различных норм влияет на организационно-технологическую надежность всего производственного процесса.

Для оценки возможной производительности технологического процесса капитального ремонта железнодорожного пути и выявления лимитирующих операций требуется создание специализированного инструмента, позволяющего оценивать вероятность выполнения объема работ в установленное технологическое «окно» при изменяемых условиях выполнения отдельных операций [16, 17].

В рамках данной работы рассмотрена часть технологического процесса капитального ремонта железнодорожного пути – демонтаж рельсошпальной решетки, для которой разработана имитационная модель, и произведен соответствующий анализ.

Выбор демонтажа рельсошпальной решётки в качестве объекта для детального изучения и моделирования обусловлен его ключевой ролью в технологическом процессе. Эта работа, находящаяся на начальной стадии капитального ремонта пути, состоит из множества операций с использованием взаимодействующих средств механизации. Производительность и организация всех последующих работ подстраиваются под него, вследствие чего любые задержки при демонтаже приводят к изменению графика всего комплекса работ. Следует отметить, что аналогичный подход к моделированию и анализу применяется и в отношении других наиболее сложных процессов в рамках данной технологии.

Основная часть

Поскольку на ход выполнения работ по демонтажу рельсошпальной решетки влияет большое количество переменных факторов, было принято решение применить подход имитационного моделирования. Использование простого статического моделирования с заранее заданными параметрами здесь недопустимо ввиду многообразия постоянно изменяющихся условий планирования и проведения ремонтных мероприятий. Наличие возможности регулярно обновлять исходные данные позволяет существенно повысить точность анализа производственного процесса. Именно поэтому был разработан цифровой аналог данного процесса на платформе AnyLogic. Создание такого цифрового двойника даёт возможность многократно воспроизводить реалистичные сценарии экспериментов в виртуальной среде [18,19].

AnyLogic является средой визуального моделирования на основе языка Java, оснащённой инструментами для двумерной и трёхмерной симуляции. База компонентов системной динамики позволяет строить модели на основе дифференциальных и алгебро-дифференциальных систем уравнений, представленных в виде ориентированного графа [18, 20-22]. При создании имитационной модели демонтажа и перетяжки рельсошпальной решетки использовалась дискретно-событийная библиотека данной среды. Этот подход предусматривает наглядное графическое описание технологических этапов работы агентов через последовательность отдельных блоков, каждый из которых соответствует отдельной операции или событию и отображён на схеме.

На рисунке 1 представлен алгоритм действующего технологического процесса демонтажа рельсошпальной решётки, лежащий в основе разработанной имитационной модели. Построенная в AnyLogic модель отображает последовательность и время

выполнения операций, и позволит определить необходимое время для выполнения всего объема работ. На данном этапе анализа продолжительность операций принималась на основе рекомендаций ряда нормативных документов. Разброс значений продолжительности выполнения конкретной операции возникает в результате неоднозначности нормативных данных, приведенных в разных документах и описывающих одни и те же операции для идентичных условий. В ходе анализа было установлено, что процесс демонтажа рельсошпальной решетки нормируется следующими документами:

1. «Нормы времени на работы по ремонту верхнего строения пути», утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 789/р от 14.04.2021 г.;
2. Технологический процесс «Капитальный ремонт 1(2) уровня в режиме закрытого перегона с выработкой 2000 метров в сутки» (К1125ц–19);
3. Технолого-нормировочная карта «Разборка пути с железобетонными шпалами звеньями краном УК-25/9-18 (УК-25/25), формирование пакетов» (К679Ц-15);
4. Опытный технологический процесс «Капитальный ремонт железнодорожного пути 1(2) уровня на закрытом перегоне с очисткой балласта машиной ЩОМ–2000» (К215ц–25);
5. Карта технологического процесса «Перетяжка пакетов рельсошпальной решетки с применением платформы моторной МПД-2 (МПД-2М, МПД-2М1) и платформы моторной с кабиной МПК» (К1154ц–19);
6. Карта технологического процесса «Перетяжка пакетов рельсошпальной решетки с применением обводного блока, оборудованного на платформе УСО» (Кх805ц–16);
7. Типовая технологическая карта «Перетяжка пакетов звеньев рельсошпальной решетки при укладке и разборке пути» (К566ц–13);
8. Технолого-нормировочная карта «Снятие звеньев рельсошпальной решетки краном УК с автоматическим захватом и расцепом захватного устройства» (Кх1600ц–22);
9. Технико-нормировочная карта «Перетяжка пакетов звеньев рельсошпальной решетки синтетическим тросом (по типу Апервид)» (Кх2121ц–25).

Перечень операций с ссылками на нормативные документы и нормативное время выполнения операции или ряда операций приведен в таблице 1. Номера операций на схеме (рисунки 1 и 2), в таблице 1 и на фрагменте модели (рисунок 3) совпадают.

Общее время, затрачиваемое на выполнение всего комплекса работ по демонтажу рельсошпальной решётки, может быть представлено в виде математической зависимости, мин:

$$T = \sum_{i=1}^{k} t_i + max\left(\sum_{j=1}^{p} t_j, \sum_{j=1}^{q} t_j, \dots\right) + \dots \rightarrow T_{\text{н}},$$

где t_i и t_j – продолжительность выполнения операций процесса, мин.; k – количество последовательных операций; p и q – количество операций, выполняемых параллельно, $T_н$ – время выполнения всего объема работ по демонтажу рельсошпальной решетки в соответствии с К215ц (таблица 1).

Диапазоны значений t_i и t_j определялись на основе нормативных документов К679Ц; Кх1600ц; К1154ц и Кх805ц. При настройке модели для всех операций принимался треугольный закон распределения, при этом среднее значение задавалось равным среднеарифметическому граничных значений t_i и t_j.

На рисунке 3 приведен фрагмент модели демонтажа и перетяжки рельсошпальной решетки с переворотом нижнего звена. В этой связи нумерация операций на рисунке 2 начинается с позиции номер 2, что соответствует схеме процесса (рисунки 1 и 2) и значениям в таблице 1. Модель демонтажа и перетяжки рельсошпальной решетки с укладкой нижнего звена на лыжи выглядит аналогично.

Таблица 1

Операции технологического процесса демонтажа рельсошпальной решетки (РШР)

Номер на схеме	Операция	Оперативное время (на 1 пакет), мин.		Время (на 1 пакет), мин.		Время, мин. (на 1 км)
	Номер нормативного документа					
	К679Ц; Кх1600ц; К1154ц; Кх805ц	К679Ц	Кх1600ц 789	К566ц	Кх2121ц	К215ц К1125ц
1*	При помощи траверсы лыжи устанавливаются на ролики УСО.				-	
2	Устанавливаются ручные тормозные башмаки на месте начала работ перед снимаемым звеном.				-	
3	Одновременно по обеим рельсовым нитям разрезаются рельсы путем выжигания металла.				-	
4	Перемещение строповочной траверсы к снимаемому звену.				-	
5**	Звено приподнимается на высоту 30-40 см от поверхности для обрушения балласта, после чего снова опускается.				-	
6**	Устанавливается на траверсе крана приспособление для переворота звена. На рельсах переворачиваемого звена устанавливают сменные башмаки. Под звеном по ручьям башмаков через блок пропускаются тросы, концы тросов соединяются между собой скобой и штырем.	**9** (с переворотом нижнего звена РШР)	**11,16** (с переворотом нижнего звена РШР)		-	
7**	Производится подъем траверсы и одновременно с этим происходит переворот звена.	**8** (нижнее звено РШР уложено на лыжи)	**9,3** (нижнее звено РШР уложено на лыжи)	**8**	-	**134** (К215ц)
8**	Блок фиксируется закладным пальцем от проворота. Перевернутое звено поднимается на нужную высоту и перемещается к платформе крана и опускается рельсами на ролики УСО.				-	**139,5** (К1125ц)
9	Устанавливаются рельсовые захваты траверсы на снимаемое звено.				-	
10	После проверки надежности зацепки и отсутствия перекоса, производится дальнейший подъем. Поднятое звено плавно перемещается к платформе крана, где укладывается на заранее приготовленное перевернутое звено или лыжи. Отцепляется траверса крана от уложенного звена.				-	
11	Путеразборочный поезд перемещается назад к следующему снимаемому звену.				-	
12	На торцы рельсов перевернутого звена надеваются специальные наконечники.				–	
13	К рельсу второго снизу звена через обводной ролик прикрепляется лебедочный канат тяговой лебедки крана.	–	–	**4**	**11**	
14	При помощи лебедки с фермы крана производится перетяжка пакета на платформы разборочного поезда.	–	–	**2**	**2**	
15	Погруженные пакеты путевой решетки закрепляются на подвижном составе	–	–	**4**	–	**163,33** (К215ц) **36,5** (К1125ц)

* с установкой первого звена на лыжи;

** операции для первого звена с переворотом.

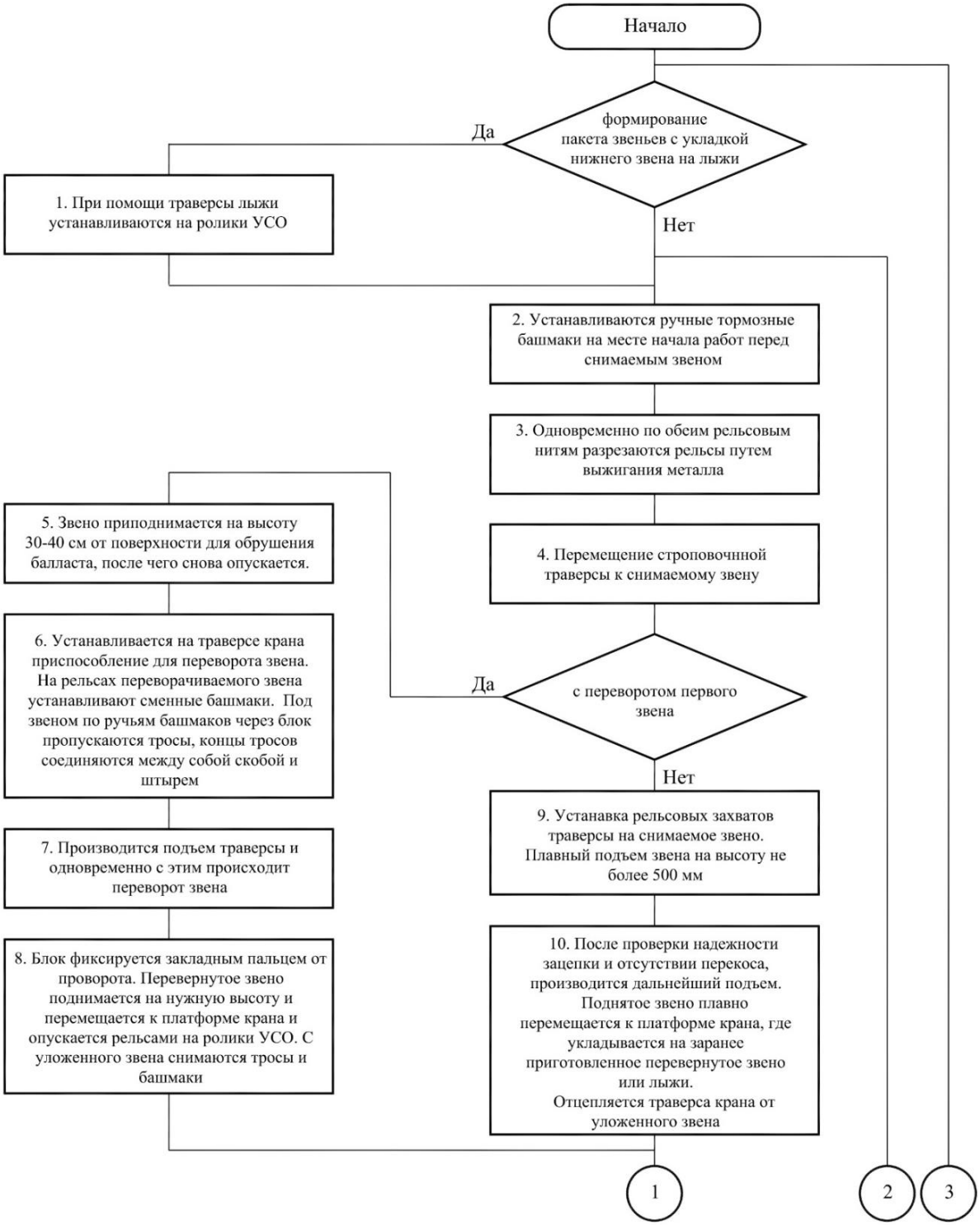


Рис. 1. Схема технологического процесса демонтажа рельсошпальной решетки (начало)

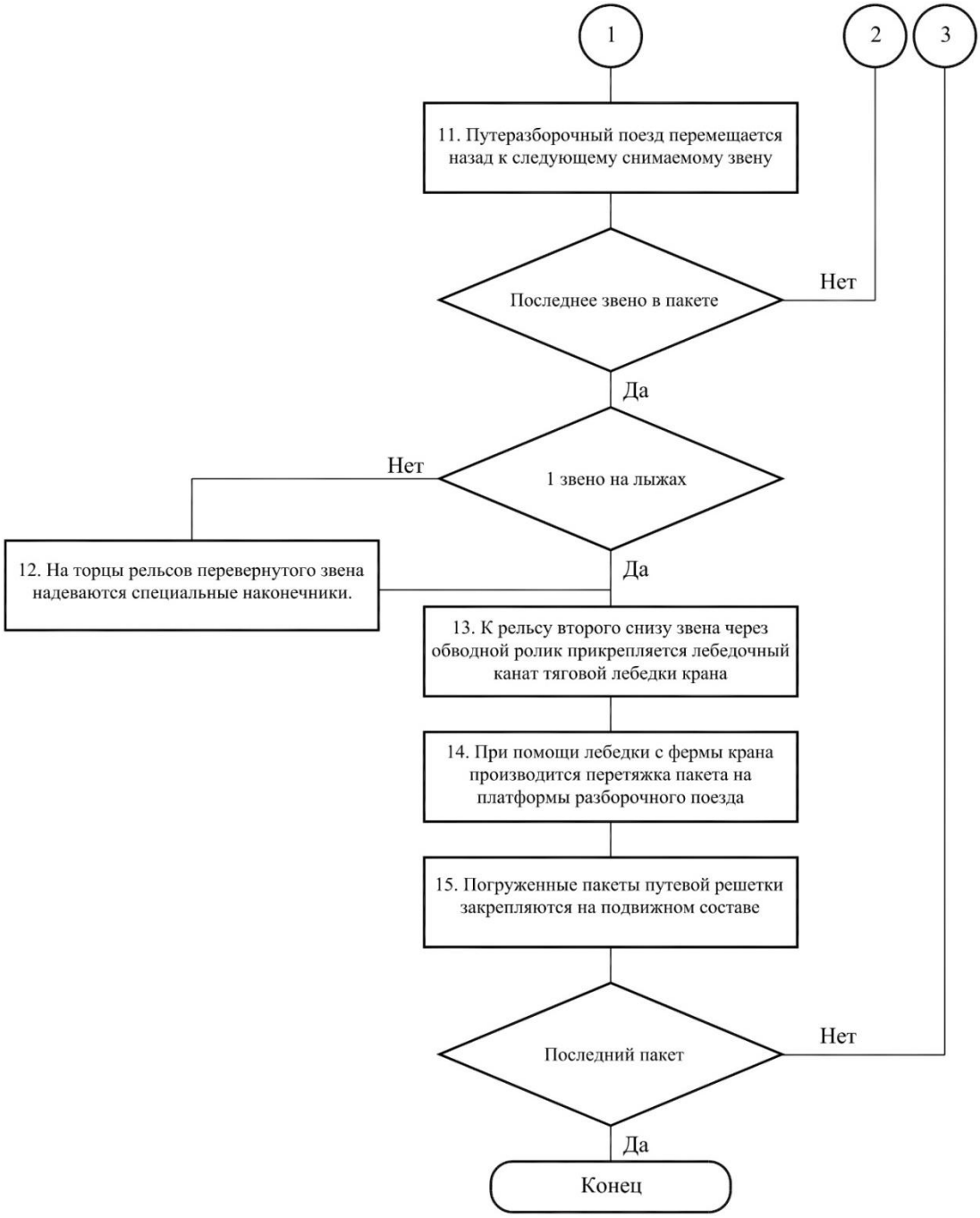
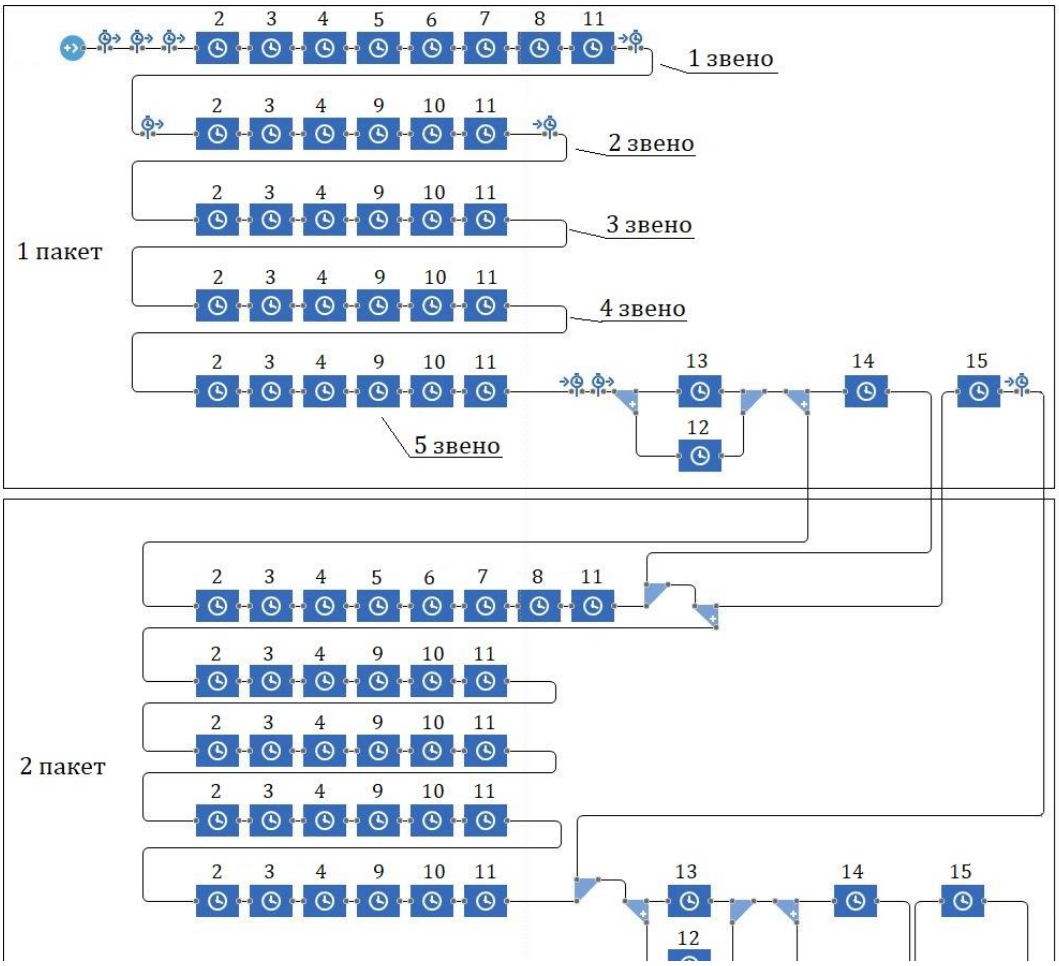


Рис. 2. Схема технологического процесса демонтажа рельсошпальной решетки (окончание)

Для верификации точности модели результаты её симуляции сравнивались с фактической продолжительностью операций, полученной посредством картирования на семи участках перегона Чебула — Болотное. Каждый из семи наборов данных был использован для проведения серии из 500 испытаний. Расхождение расчётных и натурных данных составило в среднем 4%, что свидетельствует о корректности настройки модели. В дальнейшем эти данные были заменены на исследуемые нормативные значения.

В ходе моделирования устанавливалась требуемая длительность процесса, учитывающая выполнение всех необходимых операций, без учета непредвиденных ситуаций.



2-15 – операции технологического процесса (содержание операций приведены в таблице 1 и на рисунках 1 и 2)

Рис. 3. Фрагмент модели технологического процесса в AnyLogic

Эффективность организации работ по демонтажу рельсошпальной решетки оценивалась вероятностью завершения всех технологических операций в установленный срок. При этом общее технологическое время, с которым производилось сравнение, принималось из опытного технологического процесса К215ц–25, так как именно оно принимается в пооперационном графике технологического процесса капитального ремонта железнодорожного пути.

Предложенный подход обеспечивает возможность количественной оценки риска превышения запланированных сроков выполнения работ, а также вероятности возникновения задержек на последующих этапах капитального ремонта железнодорожного полотна.

На основе разработанной имитационной модели проведена серия испытаний для оценки вероятности выполнения всех работ по демонтажу рельсошпальной решетки в указанный срок, основываясь на нормах продолжительности технологических операций. Первая серия испытаний проведена для процесса демонтажа рельсошпальной решетки с переворотом первого звена и перетяжкой пакетов звеньев, вторая с укладкой первого звена на лыжи. Каждая серия содержала более 4500 повторений. Результаты экспериментов представлены на рисунках 4 и 5.

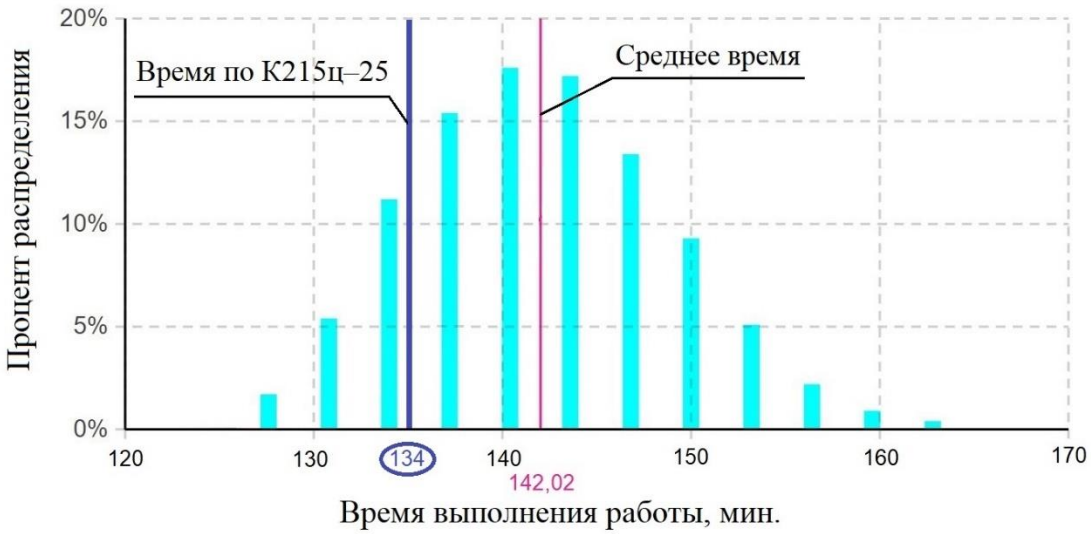


Рис. 4. Диаграмма распределения результатов моделирования технологического процесса демонтажа рельсошпальной решетки с переворотом первого звена

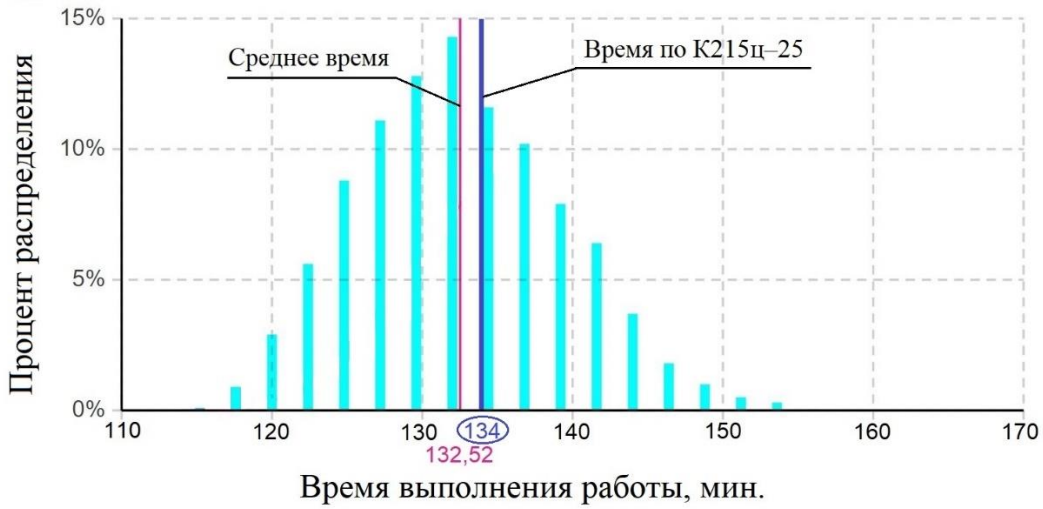


Рис. 5. Диаграмма распределения результатов моделирования технологического процесса демонтажа рельсошпальной решетки с укладкой первого звена на лыжи

Исходя из полученных экспериментальных данных (рисунок 4), вероятность завершения всех необходимых операций по демонтажу рельсошпальной решетки с переворотом первого звена и перетяжке пакетов в установленный срок равна 0,18. Анализ данных показывает, что в 82 % случаев последующие работы по капитальному ремонту железнодорожного пути будут задержаны вследствие несоблюдения технологических норм. Аналогичная ситуация, но в меньшей степени, наблюдается при моделировании полного комплекса операций по разборке рельсошпальной решетки с укладкой первого звена на лыжи и последующей перетяжке пакетов звеньев (рисунок 5). В данном случае вероятность выполнения работ в установленное технологическое «окно» составляет 0,55. При этом как в первом, так и во втором случае учитывалось только оперативное время, указанное в нормативно-технической документации, без учета непредвиденных ситуаций.

Причиной столь высокого уровня риска является большой разброс времени выполнения одной и той же операции в разных документах в зависимости от степени

механизации. При этом при формировании общего технологического процесса не конкретизируется техническая оснащенность отдельных работ, вследствие чего возникает межоперационная несогласованность.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанный подход на основе имитационного моделирования в AnyLogic позволяет производить критериальную оценку эффективности технологического процесса капитального ремонта железнодорожного пути на основе определения вероятности выполнения работ в установленное «оконное» время.

2. На основании проведённого анализа в качестве одной из ключевых рекомендаций предлагается систематизация нормативной документации, регламентирующей работы по демонтажу рельсошпальной решётки. Данная работа должна быть направлена на устранение дублирования информации и оптимизацию количества документов. В качестве инструмента для гармонизации и увязки данных о продолжительности технологических операций между различными нормативными источниками предлагается использовать разработанную имитационную модель.

3. Разработанная имитационная модель может быть использована для оптимизации процесса капитального ремонта пути. За счёт вариативного управления продолжительностью отдельных операций она позволяет идентифицировать наиболее значимые из них с точки зрения влияния на общее время процесса. Результаты моделирования определяют перечень операций, требующих разработки корректировочных мероприятий для сокращения их длительности и повышения надёжности.

Список литературы

1. Северова, М. О. Значение капитального ремонта железнодорожного пути для устойчивого развития транспортной отрасли / М. О. Северова, М. А. Ромашева // Тренды экономического развития транспортного комплекса России: форсайт, прогнозы и стратегии: труды национальной научно-практической конференции, Москва, 17 апреля 2025 года. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2025. – С. 231-235. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80379293 (дата обращения: 04.05.2026).

2. Guler, H. Decision Support System for Railway Track Maintenance and Renewal Management. Journal of Computing in Civil Engineering. – 2013. – Vol. 27. – P. 292-306. DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000221

3. Земерова, А. А. Методика создания цифровых проектов для реконструкции и ремонта железнодорожных путей / А. А. Земерова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 1. – С. 130-136. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-1-130-136. – EDN LLQVEW.

4. Королев, А. С. Капитальный ремонт железнодорожного пути на основе традиционных материалов: стратегии и методы оптимизации / А. С. Королев, Ю. С. Миняева // Наука, образование, транспорт: актуальные вопросы, приоритеты, векторы взаимодействия : материалы IV Международной научно-методической конференции, Оренбург, 19–20 ноября 2025 года. – Оренбург: Приволжский государственный университет путей сообщения, 2025. – С. 83-86. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60028030 (дата обращения: 10.05.2026).

5. Дементьев, А. П. Совершенствование механизма взаимодействия исполнителей капитального ремонта пути на основе ресурсного подхода / А. П. Дементьев, А. В. Рассказов // Экономика железных дорог. – 2024. – № 12. – С. 45-57. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=76801399 (дата обращения: 10.05.2026).

6. Валиахметов, А. Ф. Капитальный ремонт железнодорожного пути с применением системы автоматизированного контроля работ путевых машин / А. Ф. Валиахметов, А. С. Нечушкин // Вестник транспорта Поволжья. – 2024. – № 1(103). – С. 39-44. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=64001892 (дата обращения: 10.05.2026).

7. Ефимов, Н. В. Методика создания цифровых проектов для реконструкции и ремонта железнодорожных путей / Н. В. Ефимов, С. А. Комягин, Е. Н. Тимофеев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 1. –С. 71-77. DOI:10.33764/2618-981X-2024-1-71-77.

8. Gonzalez-Jorge H., Ríos-Otero E., Aldao E., Balvís E., Veiga-López F., Fontenla-Carrera G. Rail Maintenance, Sensor Systems and Digitalization: A Comprehensive Review // Future Transportation. – 2025. – Vol. 5, № 3. – P. 83. DOI:10.3390/futuretransp5030083.

9. Прудников, А. А. К вопросу организации планирования капитального ремонта железнодорожного пути / А. А. Прудников, А. Ю. Абраменко // Управленческий учет. – 2024. – № 11. – С. 530-538. – URL: https://uprav-uchet.ru/index.php/journal/article/view/4862 (дата обращения: 11.05.2026).

10. Северова, М. О. Совершенствование подходов к формированию себестоимости капитального ремонта железнодорожного пути / М. О. Северова, М. А. Ромашева // Финансовый менеджмент. – 2024. – № 9. – С. 141-150. – URL: https://finance-man.ru/index.php/journal/article/view/1440 (дата обращения: 11.05.2026).

11. Heuristic Techniques for Scheduling Railway Track Maintenance / M. Lake, L. Ferreira, E. Kozan // Handbook of Operations Research in Rail Transportation. – 2011. – P. 177-187. DOI:10.1007/978-1-4615-0819-9_11.

12. Пикалов А. С., Милорадович В. К., Севостьянов А. А. Организация производства работ по капитальному ремонту пути на закрытом перегоне с учетом использования инновационной железнодорожно-строительной техники // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(61). – С. 33-43. DOI:10.52170/1815-9265_2022_61_33.

13. Демьянович, И. В. Повышение эффективности работы путевых машинных станций в условиях БАМ // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 274-286. DOI:10.17816/transsyst626637.

14. Гринчар, Н. Г. Об управлении надёжностью путевых машин // Путь и путевое хозяйство. – 2025. – № 6. – С. 30-32. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82381871 (дата обращения: 11.06.2026).

15. Горьканова, Т. Н. На заседании секции «Комплексные проблемы транспорта» // Путь и путевое хозяйство. – 2025. – № 5. – С. 7-8. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=82053215 (дата обращения: 11.05.2026).

16. Deep Learning Approach for Automated Railroad Ballast Condition Evaluation / J. Luo, K. Ding, I. Qamhia, J. Hart, E. Tutumluer // Artificial Intelligence and Smart Cities for Sustainable Development. – 2024. – P. 49-57. DOI:10.1007/978-981-97-8213-0_7.

17. Коваленко, Н. И. Технологические окна для путевых работ при минимизации приведенных затрат на ремонты и потерь перевозочного процесса // Наука и технологии железных дорог. – 2021. – Т. 5, № 1(17). – С. 75-80. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44909119(дата обращения: 11.05.2026).

18. Королев, А. Л. Компьютерное моделирование процессов и систем в среде программного комплекса имитационного моделирования Anylogic / А. Л. Королев, Н. Б. Паршукова. – Челябинск: Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2024. – 196 с. – ISBN 978-5-907869-04-2. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=68018255 (дата обращения: 12.05.2026).

19. Сазанова, Е. В. Проблема планирования ремонтов железнодорожного пути в Отечественной науке // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР

в XXI веке. – 2021. – Т. 1. – С. 258-262. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46233307 (дата обращения: 12.05.2026).

20. Дудакова, А. В. Разработка инструментальных средств моделирования транспортных объектов с использованием агентного моделирования и среды anylogic / А. В. Дудакова, Н. Ю. Гончарова, Р. Ю. Упырь // Актуальные проблемы транспорта и логистики: Материалы первой Международной научно-технической конференции (Электронный ресурс), Гомель, 30 мая 2023 года. – Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2023. – С. 66-69. – URL: https://elibrary.ru/vxlqos (дата обращения: 12.05.2026).

21. Ефромеева, Е. В. Имитационное моделирование: основы практического применения в среде AnyLogic: учебное пособие / Е. В. Ефромеева, Н. М. Ефромеев. — Саратов: Вузовское образование, 2020. – 120 c. – ISBN 978-5-4487-0586-1. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44732605 (дата обращения: 12.05.2026).

22. Боев, В. Д. Моделирование в среде AnyLogic: учебное пособие / В. Д. Боев. – 1-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2017. – 298 с. – (Бакалавр. Прикладной курс). – ISBN 978-5-534-02560-6. – URL: https://elibrary.ru/zsxiff (дата обращения: 12.05.2026).

References

1. Severova, M.O. and Romasheva, M.A. (2025), "Znachenie kapital’nogo remonta zheleznodorozhnogo puti dlya ustoychivogo razvitiya transportnoy otrasli" [The importance of railway track overhaul for the sustainable development of the transport sector], Trendy ekonomicheskogo razvitiya transportnogo kompleksa Rossii: forsayt, prognozy i strategii: trudy natsional’noy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Economic development trends of Russia’s transport complex: foresight, forecasts and strategies: proceedings of the national scientific and practical conference], Dashkov i K, Moscow, pp. 231–235. (in Russian)

2. Guler, H. (2013), "Decision Support System for Railway Track Maintenance and Renewal Management", Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 27, pp. 292–306. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000221.

3. Zemerova, A.A. (2021), "Metodika sozdaniya tsifrovykh proektov dlya rekonstruktsii i remonta zheleznodorozhnykh putey" [A methodology for creating digital projects for the reconstruction and repair of railway tracks], Interekspo Geo-Sibir’, vol. 1, pp. 130–136. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-1-130-136. (in Russian)

4. Korolev, A.S. and Minyaeva, Yu.S. (2025), "Kapital’nyy remont zheleznodorozhnogo puti na osnove traditsionnykh materialov: strategii i metody optimizatsii" [Major overhaul of railway track based on traditional materials: strategies and optimization methods], Nauka, obrazovanie, transport: aktual’nye voprosy, prioritety, vektory vzaimodeystviya: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii [Science, education, transport: topical issues, priorities, vectors of interaction: proceedings of the IV International scientific and methodological conference], Privolzhskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, Orenburg, pp. 83–86. (in Russian)

5. Dement’ev, A.P. and Rasskazov, A.V. (2024), "Sovershenstvovanie mekhanizma vzaimodeystviya ispolniteley kapital’nogo remonta puti na osnove resursnogo podkhoda" [Improving the mechanism of interaction between track overhaul contractors based on a resource approach], Ekonomika zheleznykh dorog, no. 12, pp. 45–57. (in Russian)

6. Valiakhmetov, A.F. and Nechushkin, A.S. (2024), "Kapital’nyy remont zheleznodorozhnogo puti s primeneniem sistemy avtomatizirovannogo kontrolya rabot putevykh mashin" [Major overhaul of railway track using an automated work-control system for track machines], Vestnik transporta Povolzh’ya, no. 1 (103), pp. 39–44. (in Russian)

7. Efimov, N.V., Komyagin, S.A. and Timofeev, E.N. (2024), "Metodika sozdaniya tsifrovykh proektov dlya rekonstruktsii i remonta zheleznodorozhnykh putey" [A methodology

for creating digital projects for the reconstruction and repair of railway tracks], Interekspo GeoSibir', vol. 1, pp. 71–77. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-1-71-77. (in Russian)

8. Gonzalez-Jorge, H., Ríos-Otero, E., Aldao, E., Balvís, E., Veiga-López, F. and FontenlaCarrera, G. (2025), "Rail Maintenance, Sensor Systems and Digitalization: A Comprehensive Review", Future Transportation, vol. 5, no. 3, p. 83. DOI: 10.3390/futuretransp5030083.

9. Prudnikov, A.A. and Abramenko, A.Yu. (2024), "K voprosu organizatsii planirovaniya kapital'nogo remonta zheleznodorozhnogo puti" [On the organization of planning for railway track overhaul], Upravlencheskiy uchet, no. 11, pp. 530–538. (in Russian)

10. Severova, M.O. and Romasheva, M.A. (2024), "Sovershenstvovanie podkhodov k formirovaniyu sebestoimosti kapital'nogo remonta zheleznodorozhnogo puti" [Improving approaches to cost formation for railway track overhaul], Finansovyy menedzhment, no. 9, pp. 141–150. (in Russian)

11. Lake, M., Ferreira, L. and Kozan, E. (2011), "Heuristic Techniques for Scheduling Railway Track Maintenance", Handbook of Operations Research in Rail Transportation, pp. 177–187. DOI: 10.1007/978-1-4615-0819-9_11.

12. Pikalov, A.S., Miloradovich, V.K. and Sevost'yanov, A.A. (2022), "Organizatsiya proizvodstva rabot po kapital'nomu remontu puti na zakrytom peregone s uchetom ispol'zovaniya innovatsionnoy zheleznodorozhno-stroitel'noy tekhniki" [Organization of track overhaul works on a closed line section considering the use of innovative railway construction machinery], Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, no. 2 (61), pp. 33–43. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_61_33. (in Russian)

13. Dem'yanovich, I.V. (2024), "Povyshenie effektivnosti raboty putevykh mashinnykh stantsiy v usloviyakh BAM" [Improving the efficiency of track machine stations under the conditions of the BAM], Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii, vol. 10, no. 2, pp. 274–286. DOI: 10.17816/transsyst626637. (in Russian)

14. Grinchar, N.G. (2025), "Ob upravlenii nadezhnost'yu putevykh mashin" [On reliability management of track machines], Put' i putevoe khozyaystvo, no. 6, pp. 30–32. (in Russian)

15. Gor'kanova, T.N. (2025), "Na zasedanii sektsii «Kompleksnye problemy transporta»" [At the meeting of the "Complex problems of transport" section], Put' i putevoe khozyaystvo, no. 5, pp. 7–8. (in Russian)

16. Luo, J., Ding, K., Qamhia, I., Hart, J. and Tutumluer, E. (2024), "Deep Learning Approach for Automated Railroad Ballast Condition Evaluation", Artificial Intelligence and Smart Cities for Sustainable Development, pp. 49–57. DOI: 10.1007/978-981-97-8213-0_7.

17. Kovalenko, N.I. (2021), "Tekhnologicheskie okna dlya putevykh rabot pri minimizatsii privedennykh zatrat na remonty i poter' perevozochnogo protsessa" [Track possession windows for track works while minimizing reduced repair costs and transportation process losses], Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog, vol. 5, no. 1 (17), pp. 75–80. (in Russian)

18. Korolev, A.L. and Parshukova, N.B. (2024), Komp'yuternoe modelirovanie protsessov i sistem v srede programmnogo kompleksa imitatsionnogo modelirovaniya AnyLogic [Computer modeling of processes and systems in the AnyLogic simulation modeling software environment], Izdatel'stvo Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo gumanitarnopedagogicheskogo universiteta, Chelyabinsk, 196 p. (in Russian)

19. Sazanova, E.V. (2021), "Problema planirovaniya remontov zheleznodorozhnogo puti v otechestvennoy nauke" [The problem of planning railway track repairs in Russian science], Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke [Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century], vol. 1, pp. 258–262. (in Russian)

20. Dudakova, A.V., Goncharova, N.Yu. and Upyr', R.Yu. (2023), "Razrabotka instrumental'nykh sredstv modelirovaniya transportnykh ob"ektov s ispol'zovaniem agentnogo modelirovaniya i sredy AnyLogic" [Development of tools for modeling transport objects using agent-based modeling and the AnyLogic environment], Aktual'nye problemy transporta i logistiki: materialy pervoy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Topical problems of transport and logistics: proceedings of the First International scientific and technical conference], Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta, Gomel, pp. 66– 69. (in Russian)

21. Efromeeva, E.V. and Efromeev, N.M. (2020), Imitatsionnoe modelirovanie: osnovy prakticheskogo primeneniya v srede AnyLogic: uchebnoe posobie [Simulation modeling: fundamentals of practical application in the AnyLogic environment: a study guide], Vuzovskoe obrazovanie, Saratov, 120 p. (in Russian)

22. Boev, V.D. (2017), Modelirovanie v srede AnyLogic: uchebnoe posobie [Modeling in the AnyLogic environment: a study guide], 1st ed., Yurayt, Moscow, 298 p. (in Russian)

Yurkova E.O., Ilinykh A.S., Kultan M.A., Barmin N.N.

APPLICATION OF SIMULATION MODELING IN THE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MAJOR RAILWAY TRACK REPAIRS

Abstract. *Major track repairs are important for ensuring the safety and efficiency of railways, but complexity arises from the reduced duration of processing windows, affecting the quality and cost of repairs. Ensuring the required quality and volume of work on major railway track repairs while reducing the duration of technological 'windows' is an urgent task for the reliable and safe functioning of the railway transport system. As part of the study, the stage of dismantling the rail and sleeper grid, which is an integral part of the technological process of major railway track repairs, was analyzed. To study this stage, using AnyLogic, a simulation model was developed and implemented to analyze the effectiveness of the technological process of major railway track repairs based on determining the probability of completing the work within the established 'window' time.*

Keywords: *major track repairs, simulation modeling, dismantling the rail and sleeper grid, railway track, major repair technology.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Юркова Елена Олеговна Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин». e-mail: eoyurk@mail.ru	**Elena Olegovna Yurkova** Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation, Candidate of Engineering, Associate Professor, Transport Engineering Technology and Machine Operation Department e-mail: eoyurk@mail.ru
Ильиных Андрей Степанович Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Российская Федерация, доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология	**Andrey Stepanovich Ilinykh** Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation, Associate Professor, Doctor of Engineering, Professor, Transport

транспортного машиностроения и эксплуатация машин». e-mail: asi@stu.ru	Engineering Technology and Machine Operation Department e-mail: asi@stu.ru
Култан Мария Андреевна Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Российская Федерация, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин». e-mail: kultanma@yandex.ru	**Maria Andreevna Kultan** Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation, postgraduate student of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department e-mail: kultanma@yandex.ru
Бармин Николай Николаевич Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Российская Федерация, старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины». e-mail: nikbarmin@gmail.com	**Nikolay Nikolaevich Barmin** Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation, Senior Lecturer, Lifting and Transport, Track, Construction, and Road Machinery Department e-mail: nikbarmin@gmail.com

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

УДК 004.89: 528.92: 656.07

Григоренко Н.И.

ИНТЕГРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ И ИММЕРСИВНЫХ РЕШЕНИЙ В АВТОМОБИЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Аннотация. *Рассмотрены ключевые направления и перспективы внедрения цифровых и иммерсивных технологий в автомобильные транспортные системы (АТС). С развитием информационных технологий и всеобъемлющей цифровой трансформацией эта концепция имеет потенциал реализации в транспортном комплексе. Можно сформировать единую городскую систему, которая будет регулировать процессы, обмениваться данными и взаимодействовать на различных уровнях принятия решений. Дана оценка синергетического эффекта от совместного использования технологий виртуальной реальности с интеллектуальными транспортными системами (ИТС) и искусственным интеллектом. Виртуальная реальность рассматривается не просто как технология, которую можно внедрить, а как формирующаяся парадигма управления транспортом. Область применения включает интеллектуальное управление дорожным движением, координацию мультимодальных перевозок, оперативное управление в режиме реального времени, планирование устойчивости инфраструктуры и поддержку принятия решений. На основе проведенного анализа определены барьеры на пути интеграции данных решений и предложены перспективные сценарии трансформации логистических процессов и городской мобильности.*

Ключевые слова: *транспортная система; виртуальная реальность; цифровые двойники; умные дороги и инфраструктура; управление мобильностью; технологии.*

Постановка задачи

Растущая интеграция и быстрая эволюция транспортных технологий кардинально меняют основы развития автомобильных транспортных систем в рамках цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 19.12.2025 № 3887-р [1]. Транспортные системы становятся всё более сложными и взаимосвязанными; исследования выходят за рамки традиционных мер безопасности и переходят к экосистемам интеллектуальной мобильности, объединяющим транспортные средства, инфраструктуру, коммуникационные сети и принятие решений на основе данных. В контексте повышения безопасности дорожного движения и эффективности мобильности требуются не только технологические инновации, но и глубокое понимание их взаимодействия при внедрении инновационных транспортных решений. Европейская

экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН) рассматривает внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и активную мобильность как ключевые элементы устойчивого развития городов [2]. Многие традиционные системы управления трафиком основаны на статических данных и не могут реагировать на высокую динамику изменений. Управление движением на основе технологий виртуальной реальности существенно трансформирует данный процесс.

Инновационные технологии стали радикальными инструментами, встроенными в ИТС. Сегодня ИТС — это совокупность междисциплинарных областей, сосредоточенных на разработке, внедрении и управлении устойчивыми и более интеллектуальными транспортными сетями во всех видах транспорта. ИТС разработаны на основе технологий связи, вычислений и управления, которые значительно способствовали снижению проблем, связанных с урбанизацией, таких как пробки и загрязнение окружающей среды. Возможности ИТС в настоящее время значительно выросли в технологическом аспекте благодаря внедрению технологий виртуальной реальности, которые позволяют создавать в реальном времени иммерсивные и ориентированные на пользователя решения, меняющие саму природу транспортных систем.

В последнее время виртуальная реальность привлекает всё больше внимания как новая цифровая архитектура, способная расширить традиционные методы моделирования и поддержки принятия решений в транспортных системах. Эта парадигма обеспечивает непрерывное взаимодействие между различными участниками, потоками данных в режиме реального времени и адаптивное поведение системы в едином виртуальном пространстве, а не с помощью изолированных инструментов моделирования или оптимизации. Внедрение цифровых решений и развитие цифровизации в сфере транспорта играют определяющую роль в выстраивании долгосрочной стратегии управления транспортной системой. Синхронизация транспортных систем с дорожной инфраструктурой является основной проблемой [3]. Для транспортной системы это особенно важно, когда на уровнях планирования, эксплуатации и управления доминируют пространственно-временная динамика, неопределенность и многосторонний процесс принятия решений. Виртуальную реальность в этом смысле можно рассматривать как эволюцию концепций цифрового представления и контроля в цифровую эпоху, включающую цифровые двойники, искусственный интеллект, иммерсивные интерфейсы и передовые коммуникационные технологии. Рассмотрим более подробно её применение в автомобильных транспортных системах.

Анализ последних исследований

Эволюционное развитие интеллектуальных транспортных систем (ИТС) характеризуется постепенным преобразованием интеллектуальных функций в сетях автомобильного транспорта (рисунок 1). Первые системы управления дорожным движением, согласно рисунку, относятся к 1980-м и началу 1990-х годов; они в основном опирались на светофоры с фиксированным временем работы, индуктивные петлевые датчики, централизованные диспетчерские пункты и оптимизацию на основе правил. Этап конца 1990-х и 2000-х годов сопровождался разработкой и внедрением передовых систем управления дорожным движением и коммуникационных технологий, характеризуясь развитием интеллектуальных транспортных систем. Систематическая обработка GPS-данных, контроль над сетью и адаптивное управление светофорными сигналами приобретают все большее значение для согласованной работы дорожной сети в сфере ИТС. Усиливается роль коммуникационной инфраструктуры и защищенного обмена информацией при интеграции передовых технологий в вопросах безопасности в

области ИТС. Последующие усовершенствования связаны с внедрением прогрессивных методов формирования данных. Методы технологической трансформации охватывают проектирование магистралей и оценку пропускной способности с учетом эксплуатации беспилотных и автономных транспортных средств. Изучение и анализ транспортных потоков базируются на масштабности сбора информации, аналитике больших данных и прогностическом моделировании. Поток достоверных данных, поступающий с сенсорных устройств, которые сегодня применяются в дорожной инфраструктуре и на автомобилях, способствует развитию интеллектуальной транспортной системы. Прогнозировать изменения и адаптироваться к ним в реальном времени позволяют алгоритмы машинного обучения, включенные в системы умного управления транспортными потоками [4]. В дальнейшем предполагается динамическая конфигурация инфраструктуры в рамках развития интеллектуальной среды.

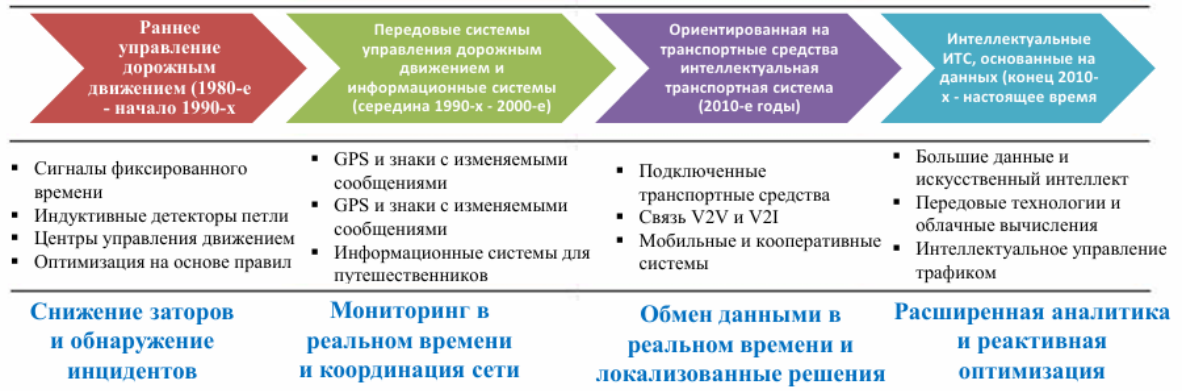


Рис. 1. Эволюционное развитие интеллектуальных транспортных систем (ИТС)

Рисунок 1 следует рассматривать как обобщение концептуального перехода от реактивного управления дорожным движением и управления на основе инфраструктуры к интеллектуальным транспортным системам, основанным на связности, данных и искусственном интеллекте.

Цель работы

Растущий спрос на мобильность, обусловленный быстро меняющимися тенденциями и развитием транспортной инфраструктуры, требует современных стратегий управления и механизмов регулирования. Целью данной работы является проработка гибридного технологического решения, направленного на совершенствование методологии прогнозирования и управления транспортными системами. Предлагаемый подход базируется на алгоритмизации процессов сбора и передачи данных в режиме реального времени, обеспечивающих двунаправленный информационный поток между физическим объектом и его динамической виртуальной моделью. Научная новизна исследования заключается в следующем:

• разработке многоуровневой архитектуры сквозного взаимодействия физических объектов ИТС с их цифровыми двойниками в среде виртуальной реальности;

• формализации процесса сбора и предиктивной обработки данных на основе гибридных нейросетевых алгоритмов (Conv-BPNN) для оценки дорожного движения и экологической обстановки;

• количественной оценке эффективности предложенного подхода методами имитационного мультиагентного моделирования.

Основная часть

Существующие компоненты интеллектуальных транспортных систем и «умных» дорог зачастую моделируются изолированно, что ограничивает оценку их совместной работы. В данном контексте технологии виртуальной реальности могут выступить в качестве интегративной платформы для сквозного планирования и управления «умной» дорожной инфраструктурой. Согласно рисунку 2, виртуальную реальность «умных дорог» представляют в виде единой среды принятия решений, объединяющей в себе постоянное моделирование, параллельные сценарии развития событий, адаптивное управление, упреждающую оценку безопасности, тестирование решений и социально-техническое планирование.



Рис. 2. Концепция интегративной среды виртуальной реальности в интеллектуальных транспортных системах

Использование виртуальной реальности в интеллектуальных транспортных системах основано на данных, однако следует отметить проблемы при внедрении систем, объединяющих данные в режиме реального времени: совместимость, киберфизическая интеграция и обеспечение конфиденциальности. В агрегаторе нейросетей GigaChat объединяются различные языковые модели, механизмы графового внимания и кросс-модальное семантическое согласование для синтеза визуальных и текстовых представлений транспортных средств, что позволяет более точно находить нужные автомобили в системах городского видеонаблюдения. Данная методология демонстрирует интеграцию процессов, формирующих виртуальную реальность в режиме реального времени. Разрабатывается геопространственная виртуальная реальность, объединяющая в себе пространственные вычисления, цифровые двойники и виртуальные миры; это имеет непосредственное отношение к дорожным системам, поскольку пространственная согласованность необходима для интерпретации состояния дорожного движения.

Вследствие изолированности агрегатора нейросетей и отсутствия совместимости, подотчетности и надежности системы организация процессов требует строгого следования техническим нормам в виртуальной реальности. Транспортные технологии активно совершенствуются за счет интеграции передовых решений в области машинного обучения и искусственного интеллекта. Слияние инноваций в сфере машинного обучения, искусственного интеллекта и сенсорной инженерии способствовало развитию беспилотных технологий в транспортной сфере [5].

Управлять полным жизненным циклом инфраструктуры и поддерживать её стабильную работу позволяют технологии виртуальной реальности. Системы управления транспортом базируются на использовании датчиков, данные которых объединяются, создавая виртуальную рабочую среду [6]. С их помощью можно наглядно моделировать потенциальные риски, сценарии аварий и ключевые показатели эффективности, что заметно повышает безопасность на дорогах. В основе управления лежит сбор информации с бортовых и дорожных датчиков. Подобный подход ориентирован на упреждающий поиск угроз (см. рисунок 3): уязвимости в системе безопасности выявляются до того, как произойдет реальное происшествие.

Историческое развитие технологических решений отражено на рисунке 1. Здесь представлен эволюционный ракурс развития интеллектуальных транспортных комплексов в формировании современной концепции «умных» дорог. Рисунок 2 демонстрирует трансформацию технологий «умных» дорог в устойчивую среду для принятия решений, которая учитывает различные варианты развития транспортных систем благодаря применению виртуальной реальности. Наблюдается поэтапный процесс системной интеграции, в ходе которого дорожная инфраструктура интегрируется в общую виртуальную среду. Его основная ценность заключается в возможности планирования с учетом неопределенности, скоординированного оперативного управления, упреждающего тестирования на безопасность и прозрачной оценки политики до фактического внедрения.

В транспортной системе Москвы реализована Комплексная схема организации дорожного движения (КСОДД) на базе моделирования дорожного движения. Благодаря запуску существующей интеллектуальной транспортной системы число ДТП в Москве к 2026 году сократилось почти вдвое, а средняя скорость передвижения выросла на 13%, хотя общее количество автомобилей значительно возросло. Результатом моделирования дорожного движения г. Москвы стала организация 125 км выделенных полос для общественного транспорта (их общая длина — 350 км). Более 160 информационных экранов, установленных на ключевых маршрутах столицы, мгновенно предоставляют водителям актуальную информацию о погоде, времени в пути и загрузке дорог [7].

Успешно проведено моделирование информационной системы государственного градостроительного кадастра г. Москвы в рамках постановления Правительства Москвы [8] на основе информационных технологий. Итогом стало создание Единой городской картографической основы Москвы (ЕГКО Москвы), включающей ключевые пространственные данные, которые формируют единое геоинформационное пространство мегаполиса. В настоящее время планируется интеграция сквозного взаимодействия физических объектов ИТС с их цифровыми двойниками (рассматриваемой концепции) и ЕГКО, что позволит повысить скорость транспортного потока в городе в среднем на 5–7%..

При оптимизации транспортного узла «Волоколамская» в Москве проводилось проектирование дорожной инфраструктуры на базе мультиагентной платформы AnyLogic [9], при котором учитывался элемент контура обратной связи на базе инновационных технологий и виртуальной реальности. AnyLogic — это среда для имитационного моделирования сложных систем. В ходе работы был проведен сравнительный анализ показателей традиционной системы (адаптивного управления светофорами) и предложенной киберфизической структуры (предиктивного управления на базе Conv-BPNN с поддержкой виртуальной реальности). В результате имитационного моделирования выявлено, что предложенный метод позволяет снизить среднее время задержки на перекрестках на 24% и повысить точность краткосрочного прогнозирования заторов до 79% (по сравнению с 60% в базовом сценарии). Интеграция среды виртуальной реальности позволила операторам (человеку в контуре управления) реагировать на инциденты в среднем в 3 раза быстрее за счет наглядной пространственной локализации проблемы и автоматического предложения нейросетью альтернативных сценариев распределения потоков. Контур обратной связи на базе элементов виртуальной реальности способствовал повышению эффективности и оптимизации транспортного узла.

Приведённые выше технологии прошли апробацию на информационно-коммуникационных платформах г. Москвы. На данный момент они разрознены, поэтому их следует объединить на обобщённой платформе. Приведённые технологические заделы при интеграции в единую структуру способны значительно повысить эффективность управления транспортными системами. С учётом моделирования и гибридного сочетания инновационных технологий возможно планирование многоуровневой структуры транспортных систем с использованием виртуальной реальности.

Рассмотрим концепцию архитектуры системного уровня, способную поддерживать комплексное принятие решений в рамках долгосрочного планирования инфраструктуры, среднесрочной разработки регламентов и управления, а также краткосрочного оперативного руководства. Автомобильные транспортные системы выбраны в качестве репрезентативной области применения вследствие тесного взаимодействия между инфраструктурой, подключенными и автоматизированными транспортными средствами, участниками дорожного движения, сенсорными системами и системами контроля дорожного движения. Для контроля и развития технологий на автомобильном транспорте профильные ведомства утвердили ряд стандартов. В национальных стандартах, регламентирующих внедрение систем искусственного интеллекта, указано следующее: ГОСТ Р 70249—2022 регламентирует, что высокоавтоматизированное транспортное средство оперирует в рамках динамической среды управления [10, с. 5]; применение базовой классификации систем искусственного интеллекта по функциональному признаку и архитектурным особенностям соответствует разделу 4 ГОСТ Р 59277—2020 [11]. Международные нормативные документы следующие: ISO/IEC 5927:2024 и ISO/IEC TR 23844:2023 [12, 13].

Автомобильные транспортные системы позволяют оценить влияние виртуальной реальности на управление транспортными процессами в непредсказуемых условиях. Гибридное сочетание инновационных технологий позволяет создать многоуровневую структуру на базе единой информационной платформы. На операционном уровне она

функционирует как комплексная киберфизическая система, объединяющая физические объекты, цифровое пространство, предиктивную аналитику и действия человека. Данная архитектура связывает сбор данных с процессами планирования, обеспечивая непрерывное взаимодействие дорожной инфраструктуры, информационных баз и оперативной обстановки на магистрали. В результате алгоритмы процессов существенно трансформируются, переходя от точечного регулирования трафика к комплексному управлению всей сетью «умных дорог».

На рисунке 3 представлена многоуровневая архитектура «умных дорог» с интеграцией технологий дополненной реальности. Модель объединяет сквозные процессы: от периферийной инфраструктуры и сенсоров сбора данных до виртуальной среды, блоков интеллектуального анализа и контуров стратегического управления. В структуре выделены два ключевых компонента: обновление регламентов (левый блок) и оперативное реагирование на изменения дорожной обстановки (правый блок). Особое значение в модели имеют контуры обратной связи. Их цикличность характеризует платформу виртуальной реальности не как статичный симулятор, а как динамическую систему поддержки принятия решений. При этом компоненты схемы находятся в отношении общей структурной зависимости, исключающей жесткое линейное соответствие.



Рис. 3. Многоуровневая структура интеллектуального транспорта на базе виртуальной реальности (от физического базиса к превентивному управлению)

В работе [14] отмечается, что интеграция информации от множества источников позволяет сформировать целостную и контекстно-обогащённую модель дорожной ситуации, учитывающую состояние внешней среды. На базовом уровне (этапы 1 и 2) внедряются технологии для мониторинга инфраструктуры, V2X-связь, восприятие

дорожного движения, периферийные вычисления и долгосрочное управление цифровым состоянием. На этапах 3 и 4 происходит сопоставление логики с учетом регламента (правил) и мобильной виртуальной реальности; оно реализуется на уровнях 2 и 3, где внедрены встроенные правила, цели управления, многовариантное моделирование будущего и исследование неопределенности. Этап 5, сквозное обучение в многоуровневой системе, работает преимущественно в рамках уровня 3, используя предиктивный анализ производительности, адаптивное управление дорожным движением, проактивное управление рисками и интеллектуальный анализ жизненного цикла инфраструктуры. Этапы 6 и 7, на которых происходит поддержка принятия решений с участием человека в контуре управления и непрерывная обратная связь, предполагают формирование решений с учетом неопределенности, верификацию действий инфраструктуры, создание среды совместного принятия решений и упреждающее управление.

Качественная оценка эффективности моделирования транспортных систем на базе виртуальной реальности включает создание количественного представления различных компонентов и динамики, определяющих работу и эффективность многоуровневой структуры. Она должна отражать экономичность, индикаторы каждого уровня структуры, пропускную способность транспортного потока на исследуемом участке, воздействие на окружающую среду или сочетание сопутствующих факторов с учетом набора ограничений. Введем понятие целевой функции оптимизации Z — это математическое выражение, определяющее эффективность рассматриваемой методологии (уравнение 1). Количественно оценивается эффективность каждого уровня путем объединения различных факторов, таких как стоимость, выбросы углерода, время в пути и другие релевантные показатели устойчивости и эффективности многоуровневой структуры. При оценке эффективности многоуровневой структуры интеллектуального транспорта на базе виртуальной реальности целевая функция имеет следующую форму:

$$Z = \alpha_1 C + \alpha_2 V + \alpha_3 E + \alpha_4 S + \alpha_4 \quad (1)$$

где C— это общие затраты, связанные с операциями транспортных систем, включая инфраструктуру, техническое обслуживание, логистику и т.д;

V— это пропускная способность или эффективность транспортного потока с точки зрения выполнения функционала перевозимых грузов/людей;

E— это воздействие на окружающую среду, которое является функцией различных индикаторов;

S - представляет собой социальное воздействие, которое может включать такие факторы, как перемещение в сообщество, занятость и т.д;

Q— это качество обслуживания, которое может включать такие факторы, как надёжность, частота и скорость технологического обслуживания;

$\alpha_i,\ i = 1, \dots 5$— это веса, присваиваемые каждому из терминов, отражающие их относительную важность в процессе принятия решений. Эти веса часто определяются приоритетами нормативно-правового регулирования в транспортной сфере, концепциями развития транспортной отрасли, регулирующими и стратегическими целями.

На практике целевая функция должна учитывать и ограничения, которые следует адаптировать к конкретному контексту в процессе моделирования. Результаты моделирования могут влиять на принятие решений по проектированию, эксплуатации и пр. Сложность решения задачи оценки эффективности заключается в точной количественной оценке каждого слагаемого и присущих им компромиссах.

Предложенная концепция описывает виртуальную среду «умных дорог» как многостороннюю многоуровневую систему принятия решений, в которой разнородные элементы взаимодействуют посредством устойчивых цифровых представлений. К

категории таких объектов относятся как элементы физической среды (участки дорог, покрытие, перекрестки, придорожная инфраструктура), так и подвижной состав (автопарки, беспилотные транспортные средства), а также участники движения. Применение агентного моделирования позволяет решить задачу анализа сложного взаимодействия между различными участниками и их адаптации к изменяющимся условиям [15]. Параллельно в контур управления вовлекаются внешние субъекты: диспетчеры, операторы инфраструктуры, дорожные службы и государственные органы. Они верифицируют, корректируют или ограничивают применение автоматических виртуальных рекомендаций, принимая решения на трех ключевых уровнях:

- Стратегический — определяет инвестиции в инфраструктуру, сценарии нормативного регулирования и планирование жизненного цикла;
- Тактический — охватывает реализацию регламентов, обеспечение устойчивости системы, распределение полос и общую организацию дорожного движения;
- Оперативный — включает адаптивное управление светофорными объектами в режиме реального времени, согласование скоростного режима, реагирование на инциденты и координацию в чрезвычайных ситуациях.

Для виртуальной среды «умных» дорог формируется эмпирическая база на основе первичных телеметрических данных. В единый информационный массив интегрируются сведения от гетерогенных систем связи и мониторинга. Источниками поступающей информации служат: разнообразные сенсоры, датчики транспортного потока, данные о состоянии дорожного полотна и погоды, V2X-связь, видеоаналитика, лидары, радары, подключенная инфраструктура и периферийные устройства. На основе полученных данных формируются аналитический интерфейс и специальные визуальные интерфейсы для управления элементами систем [16]. Функции распознавания дорожной обстановки распределяются между бортовыми комплексами и периферийными алгоритмами. Это обеспечивает оперативное взаимодействие транспортных средств с инфраструктурой в режиме реального времени, что повышает безопасность и общую эффективность дорожного движения. Масштабированию таких проектов способствуют развитые технологические возможности, устойчивые аналитические модели и институциональные механизмы. В современных реалиях пространственно-географическая привязка становится обязательным требованием как для систем распознавания, так и для контуров управления. Она гарантирует верифицируемость, наблюдаемость виртуальных операций и их жесткую связь с фактическими условиями физической инфраструктуры.

На следующем этапе создаются цифровые модели в постоянно развивающейся среде виртуальной реальности, которая непрерывно трансформируется вместе с физической дорожной системой. В отличие от традиционных симуляций, которые обычно создаются для конкретных сценариев или ограниченных временных периодов, виртуальная реальность «умных дорог» сохраняет предварительные статистические данные, которые впоследствии обновляются в режиме реального времени и накапливают операционные знания. На основе ограниченных входных данных цифровой двойник способен воспроизвести объект как единое целое [17]. Это связано с тем, что для «умных» дорог, в зависимости от режима дорожного движения, необходимо подбирать вычислительный алгоритм. Незначительные нарушения можно устранять с помощью граничных вычислений, а в более сложных ситуациях потребуются облачные технологии. Для корректного отражения ситуации необходим механизм перекалибровки в виртуальной среде «умных дорог», чтобы виртуальное представление не отставало от меняющихся физических условий.

На третьем этапе во внутреннюю логику виртуальной среды «умных дорог» интегрируются нормативно-правовые акты, регламенты и операционные ограничения.

Базовые регламентирующие документы транспортной отрасли применяются в качестве внешнего фильтра после моделирования; эта система рассматривает правила и цели управления как неотъемлемые компоненты виртуальной среды. Темпы развития нормативно-правовой базы регулирования виртуальной реальности зачастую отстают от темпов развития и внедрения цифровых технологий. Для транспортных систем это критично: любые решения напрямую затрагивают безопасность граждан, юридическую ответственность, конфиденциальность и доступ к инфраструктуре. Управление виртуальной реальностью требует жестких технических стандартов, которые гарантируют совместимость систем и координацию всех участников. Для обеспечения легитимности виртуальных экспериментов и применимости их результатов на практике правовая логика закладывается непосредственно в архитектурное ядро платформы (см. рисунок 3).

В среде виртуальной реальности учитываются изменяющиеся внешние факторы: возникающие происшествия, погодные условия, поведенческие факторы, стратегии управления, доля автономного транспорта в потоке и особенности инфраструктуры. Поиск оптимального управленческого решения опирается на многокритериальный анализ неопределенностей. Сопоставляя сценарии и выбирая стратегию, устойчивую к любым изменениям среды, специалист принимает решение.

На пятом этапе многоуровневая система мобильности объединяется в единый контур, что открывает возможности для взаимного обучения уровней и предиктивной аналитики. Сравнивая множество ограниченных вариантов будущего, виртуальная реальность «умных дорог» может выявлять повторяющиеся закономерности, ненадежные решения, устойчивые стратегии и компромиссы между производительностью, безопасностью, выбросами и целями жизненного цикла инфраструктуры. Принятие решений с учетом неопределенности может повысить безопасность автономных транспортных средств за счет включения в процесс фактора неопределенности прогнозирования. Существующие методики и технологии позволяют создавать цифровые модели для прогнозирования и отработки процессов функционирования АТС [18]. В предложенной концепции прогностические модели не нацелены на определение одного «наиболее вероятного» варианта развития событий. Вместо этого они оценивают устойчивость, достоверность и вариативность альтернативных вариантов развития событий. Это способствует более безопасному и прозрачному принятию решений, особенно когда система сталкивается с нестационарным спросом, редкими инцидентами или сдвигами в поведенческих режимах.

На шестом этапе результаты, полученные с помощью виртуальной реальности, преобразуются в практическую поддержку принятия решений и контролируемое вмешательство при сохранении ответственности человека. Эта система не предполагает полной автоматизации. Модель принятия решений предполагает участие человека: диспетчеры, операторы, представители государственных органов и инженеры принимают решения на основе данных, генерируемых виртуальной реальностью. Применение искусственного интеллекта в виртуальной реальности не должно исключать человеческий фактор, особенно когда решения принимаются в условиях неопределенности, институциональной легитимности или подотчетности перед обществом. Поддержка принятия решений с участием человека позволяет операторам оценивать компромиссы, проверять рекомендации, отклонять небезопасные предложения и санкционировать вмешательство в реальных условиях в режиме виртуальной реальности «умных дорог». Создание систем мониторинга и управления, способствующих оперативному реагированию на изменения в дорожной ситуации, является одной из важнейших перспектив ИТС. Одна из основополагающих проблем

заключается в недостаточной интеграции новых технологий с существующими транспортными системами [19].

Посредством непрерывной обратной связи, адаптивного обучения и управленческого надзора формируется киберфизический контур, который является завершающим этапом. В среду виртуальной реальности передаются результаты принятых оперативных решений. Транслируемые данные позволяют своевременно корректировать модель, обновлять регламенты и беспристрастно оценивать эффективность работы. Инструмент непрерывной обратной связи (см. рисунок 3) решает комплексную задачу. Он не ограничивается простым сбором сведений об инфраструктуре, дорожном трафике, уровне аварийности и действиях водителей, а превращает эту информацию в основу для будущих стратегий. На стратегическом уровне данный подход интегрирует показатели алгоритмической эффективности с этическими нормами, транспарентностью процессов, правовой ответственностью и приоритетом общественных интересов.

Предложенный подход позволяет консолидировать разрозненные технологические решения в общую многоуровневую архитектуру. Она обеспечивает непрерывность процессов, параллельные вычисления, соблюдение стандартов, кросс-уровневое обучение и строгий человеческий контроль. Развертывание платформы разбито на понятные этапы. Сначала разворачивается физический базис из дорожных датчиков и систем V2X. Затем на основе цифровых двойников и граничных облачных вычислений создается ядро виртуальной реальности. На интеллектуальном уровне осуществляется построение прогностических моделей и их последующая верификация оператором. Заложенные при разработке архитектуры принципы могут быть масштабированы на другие виды транспорта: железные дороги, морские перевозки и авиацию. Ее следует воспринимать как эталонную матрицу, которая легко интегрируется в среду виртуальной реальности, в процессы транспортного планирования и регулирования.

В отличие от принятых в последнее время подходов к 3D-моделированию процессов, концепция виртуальной реальности транспортных систем кардинально отличается от них. Она выявляет ряд нерешенных научных, вычислительных, правовых и этических проблем, но является фундаментальным каркасом для последующего развития. Для создания полноценной, безопасной и юридически выверенной рабочей экосистемы необходимо обозначить вектор дальнейших исследований и совершенствовать модель виртуальной реальности. Важнейшая особенность технологии заключается в ее способности интегрировать данные из различных источников, используя сложные аналитические модели, и предоставлять интуитивно понятные визуализации для поддержки принятия решений [20]. Благодаря объединению методов теории сложности и алгоритмов искусственного интеллекта достигаются точность и адаптивность этих виртуальных моделей.

Стратегии сбора и обработки большого объема данных в данной концепции имеют большое значение. Обработка потоковых данных приведена в уравнении 2. Она объединяет время, пространство, поток транспорта и плотность датчиков для расчёта общего объема собранных данных за определённый период.

$$V(t) = N \times f_s \times S_\rho \times t \quad (2)$$

где: V(t) – объём данных, собранных за время (t);

N – общее количество активных дорожных датчиков, камер и связанных транспортных средств;

f_s – частота дискретизации или скорость передачи данных в секунду.

S_{sp} – средний размер одного пакета данных или записи в байтах.

Она измеряет общий размер данных на основе того, сколько устройств сообщают информацию и как часто они отправляют данные. Большее количество датчиков (N) или

более высокие частоты дискретизации (f_s) быстро увеличивают объём данных. Методология сбора и обработки больших объемов данных имеет хорошо отработанную и подтвержденную практику на действующих информационных платформах. В качестве примера можно привести Государственную информационную систему топливно-энергетического комплекса (ГИС ТЭК) [21]. В ней хорошо отработаны блоки для автоматизации процессов сбора, обработки и хранения информации, обеспечения доступа к ней. При необходимости процесс сбора данных и принятия решений может быть интегрирован в рассматриваемую концепцию.

Масштабированию технологий внедрения многоуровневой структуры интеллектуального транспорта на базе виртуальной реальности препятствуют определенные барьеры. Проведенный системный анализ позволил не только идентифицировать эти ограничения, но и предложить конкретные пути их преодоления для успешной реализации концепции:

1. Технологические барьеры: ограничения пропускной способности сетей (необходимость 5G/6G), разнородные данные и задержки при их передаче, потоковая передача 3D-виртуальных сред высокой четкости, кибербезопасность и защита от взлома коммуникаций V2X. Пути преодоления: переход к архитектурам граничных вычислений, что позволяет обрабатывать объемные данные виртуальной реальности локально, снижая нагрузку на коммуникационные сети; использование протоколов распределенного реестра для обеспечения неизменяемости и защиты V2X-сообщений от подмены.

2. Инфраструктурные барьеры: высокая стоимость сенсоров для дорожной инфраструктуры, отсутствие разметки и умных светофоров на региональных трассах. Пути преодоления: применение технологии краудсенсинга (сбор данных с датчиков смартфонов участников движения и штатных телематических систем автомобилей) в качестве недорогой альтернативы физической установке тысяч придорожных датчиков.

3. Человеческий фактор: дефицит квалифицированных специалистов в области ИТС и иммерсивных технологий. Пути преодоления: интеграция технологии виртуальной реальности непосредственно в программы подготовки и переподготовки кадров отрасли. Использование виртуальной реальности не только как инструмента управления, но и как тренажера для диспетчеров, что снижает когнитивную перегрузку при реальной работе с ИИ.

4. Нормативные барьеры: отсутствие единых стандартов и сертификации иммерсивных систем в транспортной сфере, а также неопределенность при юридической ответственности в случаях сбоев ИТС. Пути преодоления: создание экспериментальных правовых режимов (ЭПР — «цифровых песочниц»), в рамках которых происходит тестирование решений виртуальной реальности с отработкой алгоритмов страхования ответственности. Жесткая привязка алгоритмов принятия решений к действующим ГОСТ и ПДД на программном уровне.

Транспортный комплекс является сложной средой, постоянно меняющейся и требующей гибкого, адаптивного подхода к управлению и планированию. Он представляет собой сложную, динамичную и гетерогенную взаимосвязанную систему, на которую постоянно влияют внутренние и внешние факторы. Она зависит от погоды, износа инфраструктуры, от вида вождения (автономного и под управлением человека). Автомобильная инфраструктура представляет собой динамическую систему в виде цифрового двойника, объединяющую передовые методы моделирования, обработку данных и прогнозирование [22]. Бесшовная синхронизация физического и виртуального контуров позволяет этим платформам вести непрерывный мониторинг и гибко настраивать пространственно-временную модель.

Виртуальная реальность должна выходить за рамки простой визуализации дорожной обстановки при построении системы «умных дорог». Ее функционал заключается в генерации множества сценариев, анализе конкурирующих стратегий и реализации обоснованных решений в реальной дорожной инфраструктуре. Формирование многовариантных моделей, учитывающих динамические параметры трафика, возникновение транспортных происшествий, сбои при управлении, реакцию участников движения и различные ограничения, необходимо предусмотреть в дальнейших работах. Явным достоинством технологии виртуальной реальности является её универсальность, позволяющая воспроизводить разнообразные сценарии для обучения [23].

В процессе моделирования определенных процессов задаются четкие параметры, но в целостной системе могут возникать неопределенности. В условиях высокой неопределенности необходимо разработать транспортные модели виртуальной реальности, способные стабильно функционировать. Система должна формировать доверительные интервалы, оценивать показатели чувствительности, надежности и риски системных сбоев, а не выдавать формальный прогноз. Это достигается методом многократной кросс-валидации, но из-за нехватки вычислительных ресурсов сложно вычислить указанные параметры. Эта проблема решается за счет параллельных вычислений на графических процессорах, что позволяет сбалансировать нагрузку на систему, как отмечено в работе [24]. Симуляция виртуальной реальности напрямую влияет на безопасность дорожного движения и оперативное управление инфраструктурой, поэтому принципиально важен выверенный аудит данных.

Рассматриваемая концепция базируется на искусственном интеллекте и координации многоагентной системы. В среде виртуальной реальности «умной» дороги основными элементами являются транспортные средства (автономные или управляемые человеком), элементы дорожной инфраструктуры, услуги коммуникации и профильные организации. Данная архитектура консолидирует разнородные потоки информации от бортовых датчиков и локальных инфраструктурных узлов в единую высокоточную пространственную модель, что способствует оптимизации отслеживания объектов и повышению точности мониторинга дорожной обстановки. Ключевая задача состоит в том, чтобы локально оптимальное поведение агентов не приводило к глобально неэффективным, небезопасным или неприемлемым с институциональной точки зрения результатам. Структура имитационной модели представляет собой совокупность нескольких микромоделей, моделирующих движение транспорта (агентов) в разных направлениях [25]. В дальнейшем необходимо изучить, как можно объединить многоагентное обучение с подкреплением для поддержки скоординированного принятия решений в виртуальной реальности «умных» дорог.

Заключение

Рассмотрена концепция многоуровневой структуры интеллектуального транспорта на базе виртуальной реальности. Впервые предложена интеграция гибридного сочетания инновационных технологий на единой информационно-коммуникационной платформе данной структуры. Сформулированы основные принципы развития транспортных систем с учетом внедрения технологий виртуальной реальности для планирования и управления в многообъектовой среде. Предложенные инновационные решения могут быть интегрированы в государственную информационную систему обеспечения градостроительной деятельности (ГИСОГД).

Представленный подход на базе технологий виртуальной реальности открывает перспективное направление для интеграции, обеспечения устойчивости и адаптивного планирования перевозок. Основной акцент смещается на создание общих систем

управления и интермодальную согласованность, а не на локальное внедрение изолированных технологических решений. Однако, учитывая масштаб и цели рассматриваемой концепции, она требует обязательной апробации, поскольку на данном этапе остается сугубо теоретической моделью, не прошедшей эмпирическую верификацию. Дальнейшее развитие и валидация данного подхода способны заложить основу для качественно нового этапа цифровизации транспортной отрасли и стандартизации межсистемного взаимодействия.

Использование технологий виртуальной реальности открывает широкие перспективы для формирования цифровых пространств с жестко контролируемыми параметрами. Это позволяет обеспечить высокую детализацию данных в режиме реального времени, а также локализацию и анализ вариативных сценариев в процессах имитационного моделирования. В таком контексте виртуальная реальность выходит за рамки классического симулятора или инструмента визуализации, трансформируясь в полноценную экосистему, где физическая инфраструктура, аналитические алгоритмы и управленческие решения человека эволюционируют параллельно. Подобный подход обеспечивает непрерывность процессов обучения, тестирования и координации. В результате транспортная система начинает работать на опережение, превентивно адаптируясь к рискам, а не ликвидируя последствия уже случившихся инцидентов. Основной потенциал иммерсивных технологий кроется в трансформации самой философии управления: цифровые инструменты кардинально меняют подходы к планированию, верификации и оперативному контролю трафика на всех иерархических уровнях. Виртуальная среда становится базовой операционной моделью — фундаментом, который определяет вектор будущих прикладных исследований и задает стандарты для проектирования безопасных, прозрачных и социально ответственных транспортных систем. Практическим воплощением этой операционной модели должно стать её внедрение в контур ГИСОГД, что позволит перейти от фрагментарного градостроительного планирования к сквозному управлению жизненным циклом ИТС в единой иммерсивной среде.

Список литературы

1. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2025 г. № 3887-р. — Текст : электронный // Официальный интернет-портал правовой информации : [сайт]. — 2025. — 25 дек. — № 0001202512250030. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202512250030 (дата обращения: 13.07.2026).

2. Руководство по устойчивой городской мобильности и территориальному планированию: содействие активной мобильности. — Женева : Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН), 2020. — 222 с. — URL: https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/1922152R_web.pdf (дата обращения: 19.07.2026). — Текст : электронный.

3. Григоренко, Н. И. Управление транспортной системой в градостроительстве на основе моделирования дорожной сети / Н. И. Григоренко, В. А. Гутников. — Текст : непосредственный // Современные подходы к решению проблем в архитектуре и градостроительстве : Труды III Международной научно-практической конференции, Москва, 19–20 ноября 2025 года. — Москва : Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России, 2026. — С. 45–51. — EDN HUOFTP.

4. Ярош, Е. В. Как умные алгоритмы трансформируют транспортную систему / Е. В. Ярош. — Текст : электронный // Актуальные исследования. — 2024. — № 8 (190), ч.

I. — С. 43–45. — URL: https://apni.ru/article/8487-kak-umnie-algoritmi-transformiruyut-transport (дата обращения: 10.08.2026).

5. Григоренко, Н. И. Восприятие окружающей среды автономным транспортом при интеграции датчиков / Н. И. Григоренко. — Текст : непосредственный // Современные тенденции развития транспортной отрасли : Материалы III Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 21–22 апреля 2026 года. — Нижний Новгород : ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», 2026. — С. 283–288. — EDN WHZCAH.

6. Круглова, Л. В. Дополненная реальность в интеллектуальной системе управления транспортным средством / Л. В. Круглова, Ф. К. Сисей. — Текст : электронный // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2022. — Т. 23, № 2. — С. 155–164. — DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-155-164. — URL: rudn.ru (дата обращения: 10.08.2026).

7. Интеллектуальная транспортная система (ИТС) города Москвы: итоги развития и текущие показатели. — Текст : электронный // Единый транспортный портал Москвы. ГКУ «Центр организации дорожного движения» : [сайт]. — URL: mos.ru (дата обращения: 10.08.2026).

8. Постановление Правительства Москвы от 10 ноября 1998 г. № 874-ПП. — Текст: электронный // Официальный сайт Мэра Москвы: [https://www.mos.ru]. — URL: https://www.mos.ru/authority/documents/doc/27233220/ (дата обращения: 10.08.2026).

9. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса: официальный сайт. — Москва: Имитационное моделирование, 1992–2026. — URL: https://www.anylogic.ru (дата обращения: 10.08.2026). — Текст: электронный.

10. ГОСТ Р 70249—2022. Системы искусственного интеллекта на автомобильном транспорте. Высокоавтоматизированные транспортные средства. Термины и определения. — Москва : ФГБУ «РСТ», 2022. — 16 с. — URL: https://rosgosts.ru/file/gost/11/040/gost_r_70249-2022.pdf (дата обращения: 10.08.2026). — Текст : электронный.

11. ГОСТ Р 59277—2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. — Москва : Стандартинформ, 2021. — 15 с. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200177292 (дата обращения: 10.08.2026). — Текст : электронный.

12. ISO/IEC 5927:2024. Computer graphics, image processing and environmental data representation — Augmented and virtual reality safety — Guidance on safe immersion, set up and usage. — Geneva : International Organization for Standardization, 2024. — URL: https://www.iso.org/standard/81847.html (дата обращения: 10.08.2026). — Текст : электронный.

13. ISO/IEC TR 23844:2023. Information technology for learning, education and training — Immersive learning environments — Virtual reality classroom systems. — Geneva: ISO/IEC, 2023. — URL: https://www.iso.org/standard/77144.html (дата обращения: 13.07.2026). — Текст: электронный.

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

15. Таратун, В. Е. Вопросы имитационного моделирования транспортных потоков в городской среде с использованием методов агентного моделирования / В. Е. Таратун, Е. А. Таратун. — Текст : непосредственный // Системный анализ и логистика. — 2024. — № 5 (43). — С. 117–123. — DOI 10.31799/2077-5687-2024-5-117-123.

16. Андриенко, В. А. Умные дороги: использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий / В. А. Андриенко, В. И. Кияев, С. А. Котова. — Текст : непосредственный // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2025. — № 2 (42). — С. 5–19. — DOI 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19.

17. Столяров, А. Д. Цифровая трансформация логистики предприятия с использованием цифровых двойников / А. Д. Столяров, А. М. Файзуллина, В. И. Абрамов. — Текст : непосредственный // Beneficium. — 2024. — № 2 (51). — С. 23–31. — DOI 10.34680/BENEFICIUM.2024.2(51).23-31.

18. Орлов, С. П. Система поддержки принятия решений при управлении техническим обслуживанием автономных транспортных средств / С. П. Орлов, С. В. Сусарев. — Текст : непосредственный // Онтология проектирования. — 2023. — Т. 13, № 3 (49). — С. 424–436. — DOI 10.18287/2223-9537-2023-13-3-424-436.

19. Ефимов, А. А. Интеллектуальные транспортные системы: перспективы, эффективность и проблемы / А. А. Ефимов, К. С. Медведева. — Текст : непосредственный // International Journal of Advanced Studies. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 132–150. — DOI 10.12731/2227-930X-2025-15-1-132-150.

20. Андреев, А. В. Цифровые двойники: синтез теории сложности и искусственного интеллекта / А. В. Андреев, Л. Ш. Дараселия, В. С. Дождев [и др.]. — Текст : непосредственный // Известия вузов. ПНД. — 2026. — Т. 34, № 3. — С. 371–419. — DOI 10.18500/0869-6632-003211. — EDN UIJBGW.

21. О формировании и использовании государственных информационных ресурсов топливно-энергетического комплекса Российской Федерации : Постановление Правительства Российской Федерации от 6 сентября 2002 г. № 663 : (в редакции от 10 марта 2009 г.). — Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2002. — № 37. — Ст. 3494.

22. Курбатов, Д. С. Инновационные подходы к организации дорожного движения на основе цифровых двойников автомобильных дорог / Д. С. Курбатов, А. В. Старостенко. — Текст : электронный // Вестник СибАДИ. — 2025. — Т. 22, № 5. — С. 772–785. — DOI 10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785. — EDN ITMNZK. — URL: sibadi.org (дата обращения: 10.08.2026).

23. Дяченко, А. С. Интеграция технологии виртуальной реальности в подготовку кадров нефтегазовой промышленности: проблемы и пути их решения / А. С. Дяченко, М. В. Румянцев, Ш. М. Зайнетдинов [и др.]. — Текст : непосредственный // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. — 2025. — Т. 18, № 4. — С. 834–849. — EDN IROKAI.

24. Арьков, В. Ю. Оценивание неопределённости в машинном обучении / В. Ю. Арьков, А. М. Шарипова, Г. Г. Куликов. — Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2023. — Т. 23, № 3. — С. 48–58. — DOI 10.14529/ctcr230305.

25. Кузьмин, Д. В. Разработка имитационной дискретно-событийной модели транспортной инфраструктуры с использованием инструментов оптимизации / Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова, Д. А. Краснобаев, Д. В. Мусатов. — Текст : непосредственный // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2023. — Т. 17, № 2. — С. 42–48.

References

1. Pravitelstvo Rossiiskoi Federatsii (2025), On the approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the transport sector of the Russian Federation until 2030: Decree of the Government of the Russian Federation of December 19, 2025, no. 3887-r, Ofitsialnyi internet-portal pravovoi informatsii, no. 0001202512250030, URL:

http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202512250030 (accessed: 13.07.2026) (in Russian).

2. Evropeiskaya ekonomicheskaya komissiya OON (ECE UNO) (2020), Handbook on sustainable urban mobility and spatial planning: promoting active mobility, Geneva, 222 p., URL: https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/1922152R_web.pdf (accessed: 19.07.2026) (in Russian).

3. Grigorenko, N. I., Gutnikov, V. A. (2026), Transport system management in urban planning based on road network modeling, Sovremennye podkhody k resheniyu problem v arkhitekture i gradostroitelstve: Trudy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moscow, pp. 45–51, EDN HUOFTP (in Russian).

4. Yarosh, E. V. (2024), How smart algorithms transform the transport system, Aktualnye Issledovaniya, no. 8 (190), pt. I, pp. 43–45, URL: https://apni.ru/article/8487-kak-umnie-algoritmi-transformiruyut-transport (accessed: 10.08.2026) (in Russian).

5. Grigorenko, N. I. (2026), Environment perception by autonomous vehicles during sensor integration, Sovremennye tendentsii razvitiya transportnoi otrasli: Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Nizhny Novgorod, pp. 283–288, EDN WHZCAH (in Russian).

6. Kruglova, L. V., Sisay, F. K. (2022), Augmented reality in an intelligent vehicle control system, RUDN Journal of Engineering Researches, vol. 23, no. 2, pp. 155–164, DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-155-164 (in Russian).

7. GKU "TsODD" (2026), Intelligent transport system (ITS) of the city of Moscow: development results and current indicators, Edinyi transportnyi portal Moskvy, URL: mos.ru (accessed: 10.08.2026) (in Russian).

8. Pravitelstvo Moskvy (1998), Decree of the Government of Moscow of November 10, 1998, no. 874-PP, Ofitsialnyi sait Mera Moskvy, URL: https://www.mos.ru/authority/documents/doc/27233220/ (accessed: 10.08.2026) (in Russian).

9. AnyLogic (2026), AnyLogic: simulation modeling for business: official website, Moscow, URL: https://www.anylogic.ru (accessed: 10.08.2026) (in Russian).

10. GOST R 70249—2022 (2022), Artificial intelligence systems in road transport. Highly automated vehicles. Terms and definitions, Moscow, FGBU "RST", 16 p., URL: https://rosgosts.ru/file/gost/11/040/gost_r_70249-2022.pdf (accessed: 10.08.2026) (in Russian).

11. GOST R 59277—2020 (2021), Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems, Moscow, Standartinform, 15 p., URL: https://docs.cntd.ru/document/1200177292 (accessed: 10.08.2026) (in Russian).

12. ISO/IEC 5927:2024 (2024), Computer graphics, image processing and environmental data representation — Augmented and virtual reality safety — Guidance on safe immersion, set up and usage, Geneva, International Organization for Standardization, URL: https://www.iso.org/standard/81847.html (accessed: 10.08.2026).

13. ISO/IEC TR 23844:2023 (2023), Information technology for learning, education and training — Immersive learning environments — Virtual reality classroom systems, Geneva, ISO/IEC, URL: https://www.iso.org/standard/77144.html (accessed: 13.07.2026).

14. Volodarets, N. V., Marenich, A. S., Tkachev, S. A. (2025), Comprehensive analysis of modern intelligent decision support systems for vehicles, Vestnik Donetskoi akademii transporta, no. 4, pp. 22–42, EDN OQEVND (in Russian).

15. Taratun, V. E., Taratun, E. A. (2024), Issues of simulation modeling of traffic flows in an urban environment using agent-based modeling methods, Sistemnyi Analiz i Logistika, no. 5 (43), pp. 117–123, DOI 10.31799/2077-5687-2024-5-117-123 (in Russian).

16. Andrienko, V. A., Kiyaev, V. I., Kotova, S. A. (2025), Smart roads: use of intelligent systems and multi-agent technologies, Intellektualnye Tekhnologii na Transporte, no. 2 (42), pp. 5–19, DOI 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19 (in Russian).

17. Stolyarov, A. D., Faizullina, A. M., Abramov, V. I. (2024), Digital transformation of enterprise logistics using digital twins, Beneficium, no. 2 (51), pp. 23–31, DOI 10.34680/BENEFICIUM.2024.2(51).23-31 (in Russian).

18. Orlov, S. P., Susarev, S. V. (2023), Decision support system for maintenance management of autonomous vehicles, Ontologiya Proektirovaniya, vol. 13, no. 3, pp. 424–436, DOI 10.18287/2223-9537-2023-13-3-424-436 (in Russian).

19. Efimov, A. A., Medvedeva, K. S. (2025), Intelligent transportation systems: prospects, efficiency and problems, International Journal of Advanced Studies, vol. 15, no. 1, pp. 132–150, DOI 10.12731/2227-930X-2025-15-1-132-150 (in Russian).

20. Andreev, A. V., Daraseliya, L. Sh., Dozhdev, V. S., Shenderyuk-Zhidkov, A. V., Shpak, V. V., Khramov, A. E. (2026), Digital twins: synthesis of complexity theory and artificial intelligence, Izvestiya Vuzov. PND, vol. 34, no. 3, pp. 371–419, DOI 10.18500/0869-6632-003211, EDN UIJBGW (in Russian).

21. Pravitelstvo Rossiiskoi Federatsii (2002), On the formation and use of state information resources of the fuel and energy complex of the Russian Federation: Decree of the Government of the Russian Federation of September 6, 2002, no. 663: (as amended on March 10, 2009), Sobranie zakonodatelstva Rossiiskoi Federatsii, no. 37, art. 3494 (in Russian).

22. Kurbatov, D. S., Starostenko, A. V. (2025), Innovative approaches to traffic management based on digital twins of road networks, The Russian Automobile and Highway Industry Journal, vol. 22, no. 5, pp. 772–785, DOI 10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785, EDN ITMNZK (in Russian).

23. Dyachenko, A. S., Rumyantsev, M. V., Zainetdinov, Sh. M., Sanin, A. Yu., Silinsky, A. S., Kolesnikov, S. A. (2025), Integration of virtual reality technology into personnel training for the oil and gas industry: problems and solutions, Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences, vol. 18, no. 4, pp. 834–849, EDN IROKAI (in Russian).

24. Arkov, V. Yu., Sharipova, A. M., Kulikov, G. G. (2023), Uncertainty estimation in machine learning, Vestnik YuUrGU. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika, vol. 23, no. 3, pp. 48–58, DOI 10.14529/ctcr230305 (in Russian).

25. Kuzmin, D. V., Baginova, V. V., Krasnobaev, D. A., Musatov, D. V. (2023), Development of a simulation discrete-event model of transport infrastructure using optimization tools, T-Comm, vol. 17, no. 2, pp. 42–48 (in Russian).

Grigorenko N.I.

INTEGRATION OF DIGITAL AND IMMERSIVE SOLUTIONS INTO AUTOMOTIVE TRANSPORT SYSTEMS

Abstract*. The key directions and prospects of the introduction of digital and immersive technologies in automobile transport systems (PBX) are considered. With the development of information technology and comprehensive digital transformation, this concept has the potential to be implemented in the transport sector. It is possible to form a unified urban system that will regulate processes, exchange data and interact at various levels of decision-making. An assessment of the synergetic effect of the joint use of virtual reality technologies with intelligent transport systems (ITS) and artificial intelligence is given. Virtual reality is considered not just as a technology that can be implemented, but as an emerging transport management paradigm. The scope of application includes intelligent traffic management, multimodal transportation coordination, real-time operational management, infrastructure*

sustainability planning, and decision support. Based on the analysis, barriers to the integration of these solutions have been identified and promising scenarios for the transformation of logistics processes and urban mobility have been proposed.

***Keywords**: transportation system; virtual reality; digital twins; smart roads and infrastructure; mobility management; technologies.*

Сведения об авторе:	**Information about the author:**
Григоренко Николай Иванович Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации», г. Москва, РФ, заместитель начальника отдела «Трансфера технологий», кандидат технических наук e-mail: gri-nik@mail.ru	**Grigorenko Nikolay Ivanovich** Federal State Budget Institution "Central Research and Project Institute of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation", Moscow, Russian Federation, deputy Head of the Technology Transfer Department, Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering). e-mail: gri-nik@mail.ru

УДК 656.02/.07:519.86

Караева М.Р.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОРИДОРОВ ПРИГРАНИЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ: МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД

***Аннотация**: В статье представлена научно-методическая база для оценки и прогнозирования интеграционных процессов в транспортных системах Ростовской области, ДНР и ЛНР. На основе совмещения пространственно-географического и функционального подходов предложен метод снижения размерности расчетной задачи путем представления субрегионов как однородных макросистем. Сформулирован математический аппарат, оперирующий вектором макросостояния и матрицей внутренней эволюции транспортного комплекса, что позволило описать взаимосвязь спроса, пропускной способности инфраструктуры и доступности территорий. С учетом выявленной динамической функции лаговой задержки логистических связей доказана высокая прогностическая ценность разработанного инструментария для стратегического планирования трансграничных мультимодальных потоков.*

***Ключевые слова**: транспортные системы, макрорегиональная интеграция, вектор макросостояния, пропускная способность, мультимодальные коридоры.*

Постановка задачи

Обеспечение долгосрочных стратегических приоритетов развития регионов Российской Федерации в современных геополитических реалиях тесно связано с эффективным использованием фактора их приграничного положения. В условиях глобальных структурных сдвигов критически важным фактором стабильности становится наращивание устойчивых экономических и гуманитарных связей со смежными территориями. В ретроспективе этот процесс опирался на создание специализированных институциональных платформ межгосударственного взаимодействия.

Ярким примером практической реализации такой приграничной интеграции послужили решения, принятые в октябре 2007 года на встрече министров иностранных дел России и Украины с главами приграничных регионов в Белгороде. На данном мероприятии была подчеркнута высокая перспективность создания еврорегионов, как эффективной формы международного и межрегионального взаимодействия. Опережая эти межгосударственные консультации, в 2006 году Администрация Ростовской области и Луганская областная государственная администрация уже инициировали создание трансграничного формирования — Еврорегиона «Донбасс», соглашение о котором в 2011 году было скорректировано в части официального присоединения Донецкой области. Однако к настоящему времени под влиянием масштабных и геополитических изменений пространственные и административные параметры приграничных зон Еврорегиона «Донбасс» существенно трансформировались по сравнению с его первоначальной моделью.

Указанная трансформация геополитических и административных контуров неизбежно повлекла за собой перестройку пространственной логистики, поскольку процесс формирования и распределения транспортных потоков в регионе напрямую определяется тем, насколько эффективно местная инфраструктура обслуживает новые экономические связи субрегиона. Текущие объемы и структура грузо- и пассажироперевозок жестко зависят от количественных и качественных показателей внешнеэкономической деятельности, межрегионального взаимодействия, транзитного потенциала, а также от интенсивности внутреннего обмена товарами между районами внутри самих областей. В свою очередь, устойчивое обслуживание этих потоков предполагает повышенные требования к общему состоянию обеспечивающей инфраструктуры государства.

Анализ последних исследований

Современный этап этой макрорегиональной интеграции находит отражение в масштабной модернизации ключевых транспортных коридоров Донецкой и Луганской народных республик, которые выступают связующим звеном между новыми субъектами и остальной территорией России, в первую очередь через Ростовскую область. Основу автодорожного каркаса здесь составляет федеральная трасса Р-280 «Новороссия» (Ростов-на-Дону – Мариуполь – Мелитополь – Симферополь), которая совместно с масштабным проектом «Азовское кольцо» формирует ключевой сухопутный маршрут на Крым. По оценкам профильных ведомств, в рамках комплексной интеграции транспортной системы с 2022 по 2025–2026 годы на территориях исторических регионов было капитально отремонтировано, построено и реконструировано более 2500 километров автомобильных дорог и железнодорожных путей [1, 4, 8]. При этом интенсивность движения на основных грузовых направлениях выросла более чем в 2–2,5 раза, что потребовало оперативного расширения трассы Р-280 до четырех полос движения для ликвидации «узких мест» логистической цепи [1, 2].

Параллельно с автомобильными артериями стратегическую роль играет восстановление и развитие железнодорожного сообщения. Ключевым инфраструктурным решением стало проектирование и строительство новой железнодорожной ветки, связывающей Донецк, Волноваху и Мариуполь с Таганрогом и Ростовом-на-Дону. Данный маршрут дублирует существующие пути, снижает логистическую нагрузку на Крымский мост и обеспечивает прямой выход продукции промышленных предприятий Донбасса к опорной сети ОАО «РЖД». Мощным импульсом для роста мультимодальных перевозок стало также включение в транспортные коридоры морской портовой инфраструктуры: в Мариупольском морском торговом порту построены новые логистические площадки, которые позволяют производить перевалку угля и строительных материалов в больших объемах, что демонстрирует устойчивую положительную динамику в данном направлении [2, 3].

Вся описанная инфраструктурная сеть замыкается на Ростовскую область, которая де-факто выполняет функцию главного макрорегионального транспортно-логистического хаба для ДНР и ЛНР. Ростовско-Батайский и Таганрогский транспортные узлы выступают распределительными центрами для материальных потоков, идущих в обоих направлениях. Взаимосвязь регионов носит комплексный характер:

- Автомобильные перевозки. Основной объем торгового оборота обслуживается большегрузным автотранспортом (в структуре перевозок Ростовской области автоперевозки в последнее время демонстрируют опережающий рост — до 25% в год) через модернизированные пункты пропуска на бывшей административной границе (Весело-Вознесенка, Матвеев Курган, Гуково) [4, 6].

- Железнодорожное сообщение. Связь ЛНР с Ростовской областью исторически и географически опирается на стыковые пункты Лихая — Изварино, а ДНР напрямую подключается к Северо-Кавказской железной дороге через Таганрогский ход. [3, 4].
- Институциональная поддержка. В конце 2023 года было создано содружество «Донбасс», которое на сегодняшний день координирует процессы интеграции рассматриваемых регионов. Обеспечение высокой связности территорий, как единого экономического пространства осуществляется с привлечением более 20 крупных строительных и дорожных компаний Ростовской области, которые задействованы в восстановлении мостов, путепроводов и дорожного полотна в ДНР и ЛНР [6].

Именно поэтому в условиях постоянных структурных реформ во всех отраслях экономики сохранение и опережающее развитие потенциала транспортной системы, как базового обеспечивающего сектора приобретает стратегическое значение. Главная цель современной политики в этой сфере заключается в том, чтобы удержать и оперативно нарастить пропускную способность транспортной сети, последовательно снижая нагрузку, которую тарифы оказывают на ключевые макроэкономические показатели регионов. Реализация этой цели требует от транспортных систем интенсификации их развития за счет совершенствования организационных структур, внедрения современных наукоемких технологий в процессы принятия решений на всех уровнях управления, а также за счет более тесного согласования стратегических планов с внетранспортным сектором экономики и органами государственной власти субъектов РФ. Для научного обеспечения этой сложной задачи необходима разработка эффективных экономико-математических моделей и методик исследования транспортных систем, что на сегодняшний день является ключевым вектором поддержки реформирования отрасли и развития ее рыночных механизмов в региональных системах [4,9].

Цель работы

Реализация данного вектора моделирования существенно осложняется пространственной протяженностью транспортного комплекса страны и регионов, что приводит к объективной необходимости создания разветвленной сети транспортной инфраструктуры, даже в рамках одного вида транспорта. Вследствие этого задачи моделирования и системного исследования транспортного комплекса необходимо строго разделять по уровням экономики (макро-, мезо- и микроуровни), по конкретным видам транспорта, а также по функциональному назначению каждого отдельного транспортного предприятия или его структурного подразделения.

Однако подобный процесс разделения и детализации комплексных проблем транспортного сектора неизбежно приводит к снижению уровня абстракции и сокращению масштаба рассмотрения конкретных задач. В то же время, концептуальные вопросы взаимодействия различных видов транспорта требуют более обобщенной, системной постановки и направлены на решение вопросов стратегического развития отрасли. Модели, отражающие сетевую эффективность принимаемых решений в транспортном комплексе, формируются таким образом, что задачи, локальные по месту своей непосредственной реализации, способны генерировать масштабный синергетический и сетевой эффект. Наглядным примером здесь служит опережающее развитие ключевого транспортного узла или крупного пункта перевалки грузов, которые способны коренным образом изменить устоявшуюся географию грузопотоков, снизить себестоимость транспортных услуг и повысить общую конкурентоспособность предприятий различных видов транспорта на рынке.

В конечном счете, практическое воплощение главной вышеназванной цели, официально сформулированной в Транспортной стратегии Российской Федерации —

«обеспечение посредством транспорта экономического роста и повышения качества жизни нынешних и будущих поколений россиян» — безальтернативно требует поиска новых, научно обоснованных схем и паттернов взаимодействия всех субъектов перевозочного процесса на каждом из этапов и уровней принятия управленческих решений [10].

Исходя из этого, для корректного моделирования интеграционных процессов в рамках Еврорегиона «Донбасс» необходимо на понятийном уровне разграничить пространственный базис и инфраструктурную составляющую. Первоначально исследуемая система формируется не просто как сумма обособленных транспортных сетей, а как результат интеграции географических и экономических пространств (площадей). Транспортная система в данной концепции выступает вторичным элементом — результирующей сетевой структурой, которая накладывается на реальную территорию и моделируется с помощью матричного аппарата и векторов межрегионального влияния.

Основная часть

В итоге синергетического объединения территорий Ростовской области, Донецкой и Луганской народных республик формируется принципиально новое единое макрорегиональное пространство, которое на макроуровне математически может быть представлено в виде глобального множества интегрированных пространств S:

$$\mathcal{S} = \{S_R, S_D, S_L\}$$

где, S_R, S_D и $S_L -$ пространственно-территориальные базисы Ростовской области, Донецкой и Луганской Народных Республик соответственно, каждый из которых обладает собственной транспортной подсистемой и специфическими внутренними характеристиками.

Слияние пространственно-географического понятия «площади» и функционального понятия «транспортной системы» реализуется через описание внутренних свойств субпространств. Каждое из них $S_R, S_D, S_L,$ характеризуется уникальным внутренним транспортным потенциалом, внутренним объемом спроса на перевозочный процесс, параметрами пропускной способности локальной инфраструктуры, а также механизмами взаимного влияния и интерференции со смежными элементами глобального множества. Для обеспечения вычислимости модели и снижения размерности задачи вводится ряд фундаментальных научно обоснованных допущений:

1. Каждая подсистема $S_R, S_D, S_L,$ принимается за однородную макросистему. Модель абстрагируется от внутренней топологии и индивидуальных характеристик локальных городов (например, муниципальные образования внутри Ростовской области рассматриваются как единый агрегированный пространственный контур).

2. Трансграничная связь между подсистемами генерируется исключительно через процессы физического и экономического обмена (объемы грузо- и пассажиропотоков, взаимное влияние пропускной способности стыковых пунктов, совместные логистические и инфраструктурные проекты).

3. Все стратегические и регуляторные решения, принимаемые на федеральном уровне (федеральные целевые программы, глобальные изменения макроэкономической политики), признаются жестко экзогенными. Они не подлежат прямому оптимизационному управлению в рамках данной локальной модели и интерпретируются в уравнениях динамики как стохастический шум.

4. Временное изменение импульсов влияния. Принимается допущение, что любые структурно-производственные изменения в одной из подсистем (например, в ЛНР) транслируются на смежные подсистемы (Ростовскую область и ДНР) не мгновенно, а

через динамическую функцию задержки, отражающую технологическое время адаптации логистических цепей.

Учитывая сформулированные допущения, текущее состояние и потенциал развития каждой подсистемы S_R, S_D, S_L в момент времени t могут быть формализованы в виде вектора-столбца макросостояния $x_i(t)$

$$x_i(t) = \begin{bmatrix} q_i(t) \\ c_i(t) \\ a_i(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $x_i(t) -$ состояние,

$q_i(t)$ — агрегированный спрос на транспортные услуги внутри подсистемы,

$c_i(t)$ — провозная мощность и пропускная способность транспортной инфраструктуры,

$a_i(t)$ — коэффициент транспортной доступности рассматриваемых территорий.

Переходя к анализу внутренней динамики исследуемой системы, характеристик параметров каждого региона в изолированном состоянии можно математически описать через производную по времени:

$$\dot{x_\iota} = A_i x_i \quad (2)$$

где A_i— матрица внутренней эволюции подсистемы. Данный оператор аккумулирует ключевые процессы саморазвития региона: скорость модернизации инфраструктуры, уровень использования имеющихся транспортных мощностей, темпы формирования локального спроса и общую эффективность управления. В рамках предлагаемой методологии элементы матрицы A_i могут интерпретироваться как дифференциальный коэффициент полезного действия (КПД) транспортного комплекса региона. Математически матрица A_i рассчитывается через функцию свертки локальных критериев эффективности, где каждому фактору присвоен определенный весовой коэффициент. Данный подход позволяет придать модели строгое математическое выражение при сохранении простоты вычислительной идентификации.

Для построения адекватной модели реального макрорегиона необходимо учесть внешние управляющие и экономические воздействия. Определим вектор внешних возмущений $u_i(t)$как мультипликативную функцию трех базовых компонент:

$$u_i(t) = \begin{bmatrix} I_i(t) \\ P_i(t) \\ M_i(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где, $I_i(t)$— динамический индекс инвестиций в транспортную инфраструктуру;

$P_i(t)$— экзогенный вектор государственной транспортной политики (входной сигнал регулирования),

$M_i(t)$— внешние макроэкономические условия.

С учетом внешнего контура дифференциальное уравнение внутренней динамики подсистемы принимает классический вид «состояние-вход»:

$$\dot{x_\iota} = A_i x_i + D_i u_i \, . \quad (4)$$

Научная новизна предложенного подхода заключается в интерпретации и способе идентификации матрицы параметров D_i. Данная матрица не вычисляется напрямую из уравнений статического равновесия, а идентифицируется на основе эмпирических данных о чувствительности транспортной подсистемы к экзогенным импульсам. Она отражает меру влияния макроэкономики, политики и инвестиций на физические параметры транспорта:

$$D_i = \begin{bmatrix} d_{qI} & d_{qP} & d_{qM} \\ d_{cI} & d_{cP} & d_{cM} \\ d_{aI} & d_{aP} & d_{aM} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где элементы матрицы отражают изменение параметров транспортной системы при изменении инвестиционных, регуляторных и макроэкономических факторов. Данный подход соответствует исходной постановке статьи, согласно которой матрица D_i определяется через эмпирическую чувствительность транспортной подсистемы к экзогенным воздействиям.

Для оценки коэффициентов применяется метод множественной линейной регрессии. Он описывается с помощью следующего уравнения:

$$Y_i(t) = \beta_0 + \beta_1 I_i(t) + \beta_2 P_i(t) + \beta_3 M_i(t) + \varepsilon, \quad (6)$$

где $Y -$ показывает изменение параметров транспортного состояния ($q_i(t)$, $c_i(t)$ и $a_i(t)$;

$\varepsilon -$ случайная ошибка регрессионной модели;

$\beta_0 -$ свободный член, который показывает значение $Y_i(t)$ при нулевых начальных условиях ($I_i(t) = P_i(t) = M_i(t) = 0$;

$\beta_1 -$ регрессионный коэффициент влияния инвестиции;

$\beta_2 -$ это регрессионный коэффициент влияния регуляторных факторов и показывает чувствительности транспортной системы к изменениям нормативного воздействия;

$\beta_3 -$ регрессионный коэффициент влияния макроэкономических факторов.

Уравнения (5) и (6) связываются следующим образом:

$$\begin{aligned} q_i(t) &= \beta_0 + \frac{d_{qI} I_i(t)}{\beta_1} + \frac{d_{qP} P_i(t)}{\beta_2} + \frac{d_{qM} M_i(t)}{\beta_3} + \varepsilon \\ c_i(t) &= \beta_0 + d_{qI} I_i(t) + d_{qP} P_i(t) + d_{qM} M_i(t) + \varepsilon \\ a_i(t) &= \beta_0 + d_{aI} I_i(t) + d_{aP} P_i(t) + d_{aM} M_i(t) + \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

Для вычисления регрессионных коэффициентов можно применять метода наименьших квадратов:

$$\hat{\beta} = (Z^T Z)^{-1} Z^T Y = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} 1 & I_1 & P_1 & M_1 \\ 1 & I_2 & P_2 & M_2 \\ 1 & I_3 & P_3 & M_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\hat{\beta} -$ это оценённый вектор регрессионных коэффициентов,

$Z -$ это мартрица наблюдений.

Статистическая значимость полученных коэффициентов проверяется с помощью t-критерия Стьюдента, который является статистическим методом, позволяющий проверять, насколько полученный результат является статистически значимым (отражает ли действительно связи между звеньями системы). Точность и адекватность построенной модели оцениваются на основе коэффициента детерминации R^2. Для устойчивой идентификации рекомендуется использование временного ряда не менее 5–7 наблюдений, однако для более точной оценки параметров предпочтительно применение годовых или квартальных данных за 10 и более периодов. За счет такой структуры уравнения (4) достигается методологическое слияние базовых индексов транспорта (спроса, мощности, доступности) с ключевыми индексами макроэкономики (инвестиций, регуляторной политики, конъюнктуры рынка).

Трансграничный характер Еврорегиона «Донбасс» предопределяет сильную взаимозависимость состояний подсистем. Предположим, что ДНР существенно наращивает объемы промышленного производства. Это мгновенно (или с учетом времени задержки) транслирует импульс изменения в Ростовскую область и ЛНР, вызывая трансформацию грузопотоков, резкий рост объемов мультимодальных

перевозок (особенно на железнодорожных стыках) и критическое повышение загрузки на терминально-складских комплексах.

Обобщая указанные взаимные влияния, сформируем систему перекрестных дифференциальных уравнений. Для Ростовской области уравнение динамики с учетом межрегиональных связей примет вид:

$$\dot{x_R} = A_R x_R + B_{DR} x_D + B_{RL} x_L + D_R u_R \, . \quad (9)$$

Соответственно, для Донецкой Народной Республики динамика запишется как:

$$\dot{x_D} = A_D x_D + B_{DR} x_R + B_{DL} x_L + D_D u_D . \quad (10)$$

В уравнениях (9) и (10) операторы $B_{ij} -$ характеризуют силу и интенсивность транспортно-экономического взаимодействия между регионами i и j. Определение природы данных матриц составляет ключевой научный вклад исследования. В отличие от стандартных пространственных моделей, в данной системе межрегиональное влияние не является зеркальным. Например, Ростовская область как распределительный хаб оказывает иное по структуре и масштабу воздействие на транспортную систему ЛНР, нежели ЛНР на инфраструктуру Дона, что обусловлено асимметрией материальных потоков и мощностей узлов перевалки.

Так как в динамической системы реакции компонентов не осуществляются мгновенно, а с минимальной задержки (для симуляции реальности поведения системы), введется следующее уравнение:

$$B_{ij} x_j(t-\tau) = \int_o^t K_{ij}(\tau) x_j(t-\tau) d\tau, \quad (11)$$

где, $K_{ij} -$ это функция распределения времени адаптации; $\tau -$ временная задержка передачи импульса. В практике, $K_{ij}(\tau)$ принимает экспоненциальную форму:

$$K_{ij}(\tau) = \frac{1}{T_{ij}} e^{-\tau / T_{ij}}, \quad (12)$$

где, $T_{ij} -$ среднее время адаптации транспортной связи между регионами.

Представленная нами модель носит научно-методический характер и предполагает идентификацию параметров на основе фактических временных рядов. Для устойчивой оценки регрессионных коэффициентов требуется сопоставимая статистическая база, как минимум на 10 лет, формирование которой по Ростовской области, ДНР и ЛНР затруднено ограниченной доступностью данных.

Поэтому для апробации модели использована сценарная калибровка: коэффициенты влияния инвестиционного, регуляторного и макроэкономического факторов приняты соответственно для Ростовской области — 0,42; 0,27; 0,18, для ДНР — 0,51; 0,34; 0,23, для ЛНР — 0,47; 0,31; 0,21. Параметр временной адаптации $\boldsymbol{T_{ij}}$ принят в диапазоне 2–3 месяцев в зависимости от направления межрегионального взаимодействия. Приведенные значения имеют калибровочный характер и используются для проверки поведения и чувствительности модели; их статистическое уточнение на основе фактических временных рядов является направлением дальнейшего исследования.

Результаты сценарной калибровки приведены в таблице 1.

Для получения комплексной оценки осуществим полную сквозную интеграцию модели. Объединим векторы состояний трех регионов в единый макровектор системы X:

$$\mathcal{X} = \begin{bmatrix} x_R \\ x_D \\ x_L \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Таблица 1

Результаты сценарной калибровки

Направление воздействие	T_{ij}, [месяц]
Ростовская область → ДНР	2,0
ДНР → Ростовская область	2,5
Ростовская область → ЛНР	2,5
ЛНР → Ростовская область	3,0
ДНР → ЛНР	3,0
ЛНР → ДНР	3,0

Регион	β_1	β_2	β_3
Ростовская Область	0,42	0,27	0,18
ДНР	0,51	0,34	0,23
ЛНР	0,47	0,31	0,21

Тогда обобщенная динамическая модель интегрированного Еврорегиона «Донбасс» примет компактную матричную форму:

$$\dot{\mathcal{X}} = \mathrm{A}\mathcal{X} + \mathrm{DU}\ , \tag{14}$$

где глобальная структурная матрица системы А, отражающая внутреннюю эволюцию и межрегиональное транспортное влияние, имеет блочную структуру:

$$A = \begin{bmatrix} A_R & B_{RD} & B_{RL} \\ B_{DR} & A_D & B_{DL} \\ B_{LR} & B_{LD} & A_L \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Элементы, расположенные на главной диагонали глобальной матрицы А (блоки $A_R A_D A_L$), полностью описывают изолированную внутреннюю динамику и эффективность функционирования каждого конкретного региона. Элементы матрицы и внедиагональные блоки определяются с помощью уравнения (11) и (12) с учетом задержки. Внедиагональные блоки математически задают масштаб и направленность трансграничного транспортного влияния внутри единого экономического пространства.

Выводы

Совмещение пространственно-географического и функционального подходов позволило рассмотреть каждый субрегион, как однородную макросистему. Данный подход обеспечил абстрагирование от внутренней топологии городов, существенно снизил размерность расчетной задачи и изолировал локальную модель от экзогенного шума внешних макроэкономических факторов. Сформулированный математический аппарат, базирующийся на векторе макросостояния и матрице внутренней эволюции, позволил математически точно описать взаимосвязь между объемами спроса на перевозки, пропускной способностью инфраструктуры и коэффициентом транспортной доступности территорий.

Научная новизна предложенного подхода заключается в оригинальной интерпретации и способе идентификации структурной матрицы параметров. В отличие от традиционных методов, данная матрица не рассчитывается на основе уравнений статического равновесия, а идентифицируется по эмпирическим данным о чувствительности транспортной подсистемы к экзогенным импульсам. За счет этого в уравнениях динамики достигнуто методологическое слияние базовых физических индексов транспорта (спроса, мощности, доступности) с ключевыми факторами макроэкономики (инвестиций, регуляторной политики, конъюнктуры рынка), что отражает реальную меру влияния внешней среды на параметры транспортного комплекса.

Проектирование новой железнодорожной хорды до Ростова-на-Дону и развитие Мариупольского порта обеспечили диверсификацию грузопотоков, прямой выход промышленности Донбасса на сеть ОАО «РЖД» и запуск эффективных мультимодальных цепей. С учетом выявленной динамической функции задержки адаптации логистических связей, разработанный инструментарий обладает высокой прогностической ценностью и рекомендован к внедрению в профильных ведомствах для стратегического планирования трансграничных потоков.

Список литературы

1. Бауэр, В. П. Стратегия развития транспортной инфраструктуры макрорегиона в условиях пространственной трансформации экономики / В. П. Бауэр, В. В. Еремин // Экономика региона. — 2024. — Т. 20, № 1. — С. 145–160.

2. Галабурда, В. Г. Единая транспортная система : учебник для вузов / В. Г. Галабурда, В. А. Персианов, А. А. Тимошин [и др.] ; под редакцией В. Г. Галабурды. — Москва : Транспорт, 2021. — 303 с.

3. Гончаров, В. И. Математическое моделирование транспортных потоков в региональных логистических сетях / В. И. Гончаров, А. С. Смирнов // Вестник транспорта. — 2025. — № 3. — С. 22–28.

4. Зайцев, А. А. Интеграция транспортных систем новых субъектов РФ в опорную сеть ОАО «РЖД» / А. А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. — 2026. — № 1. — С. 15–21.

5. Караева, М. Р. Обоснование выбора метода построения модели организации пассажирских перевозок в городских агломерациях / М. Р. Караева, Н. В. Напхоненко // Друкеровский вестник. — 2024. — № 5. — С. 112–119.

6. Миротин, Л. Б. Интегрированная логистика транспортных систем: управление цепями поставок : учебник для вузов / Л. Б. Миротин, Ы. Э. Ташбаев, А. Г. Некрасов. — Москва : Экзамен, 2023. — 560 с.

7. Российская Федерация. Законы. О транспортной безопасности : Федеральный закон № 16-ФЗ : [принят Государственной Думой 9 февраля 2007 года : одобрен Советом Федерации 21 февраля 2007 года : в редакции от 4 августа 2023 года] // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2007. — № 7. — Ст. 837.

8. Российская Федерация. Правительство. Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2024 г. № 3930-р // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения: 20.07.2026).

9. Троицкая, Н. А. Транспортная система России : учебное пособие / Н. А. Троицкая, А. Б. Чубуков. — 4-е издание, стереотипное. — Москва : КноРус, 2024. — 248 с.

10. Bhat, C. R. A comprehensive theoretical framework for analyzing spatial-temporal transportation dynamics / C. R. Bhat, R. B. Singh // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2025. — Vol. 192. — P. 104–122.

11. Rodrigue, J.-P. The geography of transport systems / J.-P. Rodrigue. — 6th edition. — New York : Routledge, 2025. — 456 p.

References

1. Bauer, V. P. Strategy for the development of transport infrastructure of a macro-region under conditions of spatial transformation of the economy / V. P. Bauer, V. V. Eremin // Economy of Region. — 2024. — Vol. 20, no. 1. — P. 145–160.

2. Galaburda, V. G. Unified transport system : textbook for universities / V. G. Galaburda, V. A. Persianov, A. A. Timoshin [et al.] ; edited by V. G. Galaburda. — Moscow : Transport, 2021. — 303 p.

3. Goncharov, V. I. Mathematical modeling of traffic flows in regional logistics networks / V. I. Goncharov, A. S. Smirnov // Transport Bulletin. — 2025. — no. 3. — P. 22–28.

4. Zaitsev, A. A. Integration of transport systems of new subjects of the Russian Federation into the core network of JSC "Russian Railways" / A. A. Zaitsev // Railway Transport. — 2026. — no. 1. — P. 15–21.

5. Karaeva, M. R. Substantiation of the choice of a method for constructing a model for organizing passenger transportation in urban agglomerations / M. R. Karaeva, N. V. Naphonenko // Drukerovsky Vestnik. — 2024. — no. 5. — P. 112–119.

6. Mirotin, L. B. Integrated logistics of transport systems: supply chain management : textbook for universities / L. B. Mirotin, Y. E. Tashbaev, A. G. Nekrasov. — Moscow : Ekzamen, 2023. — 560 p.

7. Russian Federation. Laws. On transport security : Federal Law No. 16-FZ : [adopted by the State Duma on February 9, 2007 : approved by the Federation Council on February 21, 2007 : as amended on August 4, 2023] // Collected Legislation of the Russian Federation. — 2007. — no. 7. — Art. 837.

8. Russian Federation. Government. Spatial development strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 : Order of the Government of the Russian Federation of December 24, 2024 No. 3930-r // Official Internet Portal of Legal Information. — URL: http://pravo.gov.ru (accessed: 20.07.2026).

9. Troitskaya, N. A. Transport system of Russia : textbook / N. A. Troitskaya, A. B. Chubukov. — 4th ed., stereotyped. — Moscow : KnoRus, 2024. — 248 p.

10. Bhat, C. R. A comprehensive theoretical framework for analyzing spatial-temporal transportation dynamics / C. R. Bhat, R. B. Singh // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2025. — Vol. 192. — P. 104–122.

11. Rodrigue, J.-P. The geography of transport systems / J.-P. Rodrigue. — 6th ed. — New York : Routledge, 2025. — 456 p.

Karaeva M.R.

OPTIMIZATION OF TRANSPORT AND LOGISTICS CORRIDORS PARAMETERS IN BORDER AREAS: A MULTI-LEVEL APPROACH

***Abstract**: The article presents a scientific and methodological framework for assessing and forecasting integration processes within the transport systems of the Rostov Region, the Donetsk People's Republic (DPR), and the Lugansk People's Republic (LPR). Based on the combination of spatial-geographic and functional approaches, a method for reducing the dimensionality of the computational problem is proposed by representing subregions as homogeneous macrosystems. A mathematical apparatus operating with a macrostate vector and an internal evolution matrix of the transport complex is formulated, which allowed describing the relationship between demand, infrastructure capacity, and territorial accessibility. The model is extended to the "state-input" form by introducing a structural parameter matrix and an external disturbance vector that evaluates the dynamics of investment, government regulation, and macroeconomic conditions. Taking into account the identified dynamic function of the lag delay in the adaptation of logistics links, the high predictive value of the developed tools for the strategic planning of cross-border multimodal flows has been proven.*

***Keywords**: transport systems; macro-regional integration; macrostate vector; throughput capacity; multimodal corridors; border areas; multi-level approach.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Караева Марина Руслановна Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, РФ доцент К.э.н.,доцент, e-mail: k.amigos111@yandex.ru	**Karaeva Marina R.** Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, Associate Professor , Candidate of Economics, Associate Professor, e-mail: k.amigos111@yandex.ru

УДК 004.89:656.02/.07:519.816

Karaeva M. R., Efimov A. D.

MULTI-CRITERIA DATA-DRIVEN SUSTAINABILITY ANALYSIS OF THE TRANSPORTATION SYSTEM IN THE CRIMEAN PENINSULA

Abstract. *Transportation systems are fundamental to regional sustainability, influencing economic growth, social equity, and environmental performance. This paper develops a multi-criterion, data-driven framework to analyze the sustainability of the Crimean Peninsula's transport system. Using graph theory, congestion modeling, and regression-based system identification, this paper evaluates accessibility, congestion, and travel times under dynamic passenger and cargo flows. The methodology offers mathematical modeling endorsed by simulation results to provide in-depth information about the robustness and sustainability of the Crimean regional transport network. Results highlight the central role of Simferopol as a hub, the nonlinear impact of congestion on travel times, and the importance of balancing passenger and cargo flows. The findings contribute to transport planning by identifying bottlenecks and resilience factors essential for sustainable development.*

Keywords*: Transportation sustainability, graph theory analysis, congestion modeling, system identification*

Introduction

Transport is one of the key socio-economic infrastructures of any prosperous country. It is the main stream interconnecting multi-disciplinary engineering and social strata, producing a healthy environment for prosperity and sustainability. In light of that, in regions with complex and diverse geography like the Crimean Peninsula, sustainability of transport systems becomes exclusively important. Sustainability, in this context of transportation systems, refers to the ability of the system to provide reliable accessibility, minimize congestion, and balance passenger and freight demands without compromising environmental or social goals (Rodrigue et al., 2020).

Traditional transport is often unidimensionally analyzed based on travel time or capacity. However, sustainability requires a multi-criteria approach that integrates structural properties of the network, dynamic demand fluctuations, and systemic responses. This can be done by adopting a time-series representation of statistical data allowing to study sustainability cases multi-dimensionally and at the same time reflecting reality on the ground.

Based on that, this paper proposes a data-driven methodology that combines graph theory, congestion modeling, and regression-oriented system identification to evaluate the Crimean transport system.

The contribution of this study can be devised as follows:

- Multi-layer analysis and resolution of the sustainability problem.
- Graph-theoretic analysis to capture structural accessibility.
- Dynamic congestion modeling to simulate nonlinear travel time effects.
- Regression-based system identification and data extrapolation to quantify relationships between demand, capacity, and performance.

Literature review

The evaluation and development of the transportation system in the Crimean Peninsula require a foundational understanding of regional infrastructure dynamics and macroeconomic integration. The Crimean Peninsula case study was chosen for multiple reasons including geopolitical aspects influencing periodic changes in the transport system, pushing for temporary and often incompatible non-future-proof solutions.

In [2] and [8] the authors established that expanding and modernizing transport networks in Crimea acts as a vital catalyst for regional economic growth and spatial cohesion. However, assessing these corridors demands more than traditional output metrics endorsing the fact of multi-criterial analysis. The author in [7] advocated for a comprehensive array of indicators concentrating primarily on livability and sustainability to measure the true efficacy of transport planning. Building on the same, the authors in [4] and [8] analyzed how external factors such as transit traffic impose operational strains on regional networks, proving that regional viability depends extensively on balancing throughput (i.e. the maximum amount of material, traffic, or data that can pass through a specific point or system within a given unit of time.) with systemic resilience under multi-variable constraints.

To develop and deploy this multi-criterion perspective, modern research exponentially relies on sophisticated data-driven architectures and artificial intelligence to model complex behavior. The authors in [9] demonstrated the utility of multi-graph convolutional-recurrent neural networks in capturing spatial-temporal passenger dynamics for short-term data extrapolation, while the authors in [5] validated the effectiveness of neural networks in elevating the precision of transportation volume quality forecasting. These predictive capabilities are further refined in [10], deploying a neuro-fuzzy and deep learning framework to mitigate spatial-temporal demand factors. Together, these quantitative methods provided the analytical setup required to process multi-input multi-variable data in challenging regional environments.

Pertaining to the optimization aspects of the technical task and societal integration, recent methodologies incorporate network design, simulation, and inclusive planning. In [6], the authors applied particle swarm optimization (PSO) for the joint design of conventional public transit and mobility-on-demand services, highlighting essentially the harmony of computational intelligence in multi-modal networks.

On the technological aspects, the authors in [3] highlighted the efficiency of digital twins in monitoring critical components such as mechanical and transport assets, while [1] studied and accounted for people with disabilities into transport infrastructure ensuring that optimization models need to take into consideration a broadband spectrum of socio-techno-economical pillars of the transportation system.

On the other hand, research gaps were registered in the bibliographic study that can be devised as follows:

- Most data-driven and machine learning studies especially in [9] and [10] focused intensely on the algorithmic prediction of passenger flow or demand in isolation, treating forecasting as a purely computational task disconnected from broader socio-economic and regional sustainability goals. While this approach is viable technically-speaking, it removes the deployed solution from its actual context, as the aim is not to extrapolate data, but to make use of the conclusions.

- Secondly, in the literature, we can observe macro-level disconnection from the multi-layered system. For instance, regional economic analyses in [2] and [8] diagnose high-level growth factors and infrastructure bottlenecks qualitatively or semi-quantitatively, but they rarely integrated real-time, multi-criterion data streams (like dynamic transit loads or digital-twin simulations) to evaluate true systemic sustainability.

- Lastly, it was observed the neglection of multidimensional constraints. For instance, current literature, especially [4,6,7] lacks the fusion of multi-criterion framework that with the socially equity and accessibility of infrastructure into a single evaluative model.

As a result, the analysis shows potentials for creation of randomness in the data distribution and acquisition also playing decisive role in questioning the importance and significance of high-fidelity simulation.

Additionally, the multimodal transport (flows due to sea / land/ air traffic; cargo and normal transport) if taken into account in data analysis due to the geographical diversity of the region allows for realistic reflection of the situation and potentially contributing in defining key performance indexes for sustainability.

Lastly, the relative compactness and density of the area make the frequency of randomness highly-weighted mathematically and push the simulation engine to its extreme effectiveness. This part was neglected in the studied literature, especially in [2,6,7] which is important to assess the effectiveness of the simulation model.

The aim of the manuscript

In the aforementioned analysis, the author has provided the technical justification for multi-layered, multi-dimensional analysis of the transportation system especially in a complex and multi-modal geographical environment like the Crimean Peninsula. The importance lies in the smooth fusion of the sustainability criteria in order to have high-fidelity reflection on the transportation system if one of the components of the sustainability matrix varies randomly. Ignoring such information can lead to analyzing exclusively secondary effects, that cannot be used empirically to further develop, enhance and optimize the transportation system: architecturally, and technically. Studying the transportation multi-dimensionally based on data extrapolation allows to integrate multiple science and information visually, mathematically and architecturally to create, develop and enhance sustainable, modular and adaptable solution that can be applied elsewhere taking into consideration initial conditions and data-driven analysis.

In addition, it is important to state that adopting a mono-tracked data-driven approach can lead to masquerading important factors and mathematical logic relations consisted as core of an adaptable, sustainable and resilient transportation system.

Body of the Manuscript

The methodological framework of this study integrates graph theory, congestion modeling, and system identification to evaluate the sustainability of the Crimean Peninsula's transportation system. Each component builds upon the previous, creating a layered approach that captures both the structural and dynamic aspects of transport performance. The transport system is represented as a weighted graph G=(V,E), where the set of nodes V corresponds to major cities in the Crimean Peninsula, and the set of edges E represents the primary transport connections between them. The weight of the edges is measured with reference to the travel time. Accordingly, we can compute two important criteria:

- Reachability to each edge;
- Accessibility of each edge.

Mathematically, reachability R is computed using the number of nodes that can be accessed from a given node:

$$R(i) = \sum_{j \neq i} 1_{d(i,j)<\infty}, \quad (1)$$

where, $d(i,j) -$ is the shortest path distance between nodes i and j.

Accessibility A(i), defines how efficiently a node can reach all other nodes:

$$A(i) = \frac{1}{\sum_j d(i,j)}. \quad (2)$$

The importance of these two metrics lies in the qualitative and quantitative definitions of each city within a network. For instance, Simferopol, with multiple direct connections, is expected to possess high accessibility. In contrast, peripheral cities such as Kerch would have lower qualitative expression. Hence, much information can be obtained and analyzed visually at early stage of planning sustainable transportation systems.

On the other hand, static metrics do not consider the dynamism of the transportation system. Studies such as the function carried out by the Bureau of Public Roads in 1964, considered that adjustments can be injected to travel time equation using the ratio of traffic flow or its capacity. Equation (3) introduces the aforementioned adjustment concept in mathematical form:

$$T_{i,j}(t) = T_{i,j}^{0}.\left(1 + \alpha\left(\frac{v_{i,j}(t)}{c_{i,j}}\right)^{\beta}\right), \quad (3)$$

where, $T_{i,j}^{0} -$ is the base travel time;

$v_{i,j}(t) -$ is the traffic flow at time t;

$c_{i,j} -$ is the capacity at the edge;

$\alpha = 0.15$ and $\beta = 4$ are empirically derived parameters.

While analyzing equation (3), we can come to a conclusion that the nonlinearity threshold of the function mimics the impact caused by the congestion, which is disproportional to the flow capacity thresholds. Hence, once this threshold is reached, congestion effect decreases. This would affect the accessibility metric. The weighted accessibility index can be defined as follows:

$$WA_i(t) = \sum_{j \neq i} \frac{P(t)}{d(i,j,t)} \quad (4)$$

where P(t) represents passenger demand at time t, and d(i,j,t) is the congestion-adjusted travel time between nodes i and j. While analyzing equation (4), we can clearly see the integration of demand and network performance.

It is important to note, and as a matter of fact, that the transportation graph illustrated in Figure.1 was constructed using the principal highway network connecting major cities of the Crimean Peninsula. The graph topology (geographically obtained) was derived from publicly available road maps and transport infrastructure information.

As stated earlier, in the first paragraph, the weights of the edges are estimated from the average driving time under free-flow traffic with reference to the digital mapping accessed online.

Although this fact can be considered as a constraint on the simulation, it is necessary to note that due to the geopolitical circumstances, most of the statistics cannot be disclosed or publicly accessed. At the same time, the approach adopted by the authors is scientific and reflects the minimum reality necessary to imitate the inputs for the transportation system.

In addition, the capacity of each road segment was assigned according to its functional classification within the region (primary highway, regional road, or secondary connection) using typical capacity values reported in transportation engineering literature. As this region is in the integration process in the federal standards, the same national classifications were used for this region as well.

The congestion model employs the standard Bureau of Public Roads (BPR) function with parameters α = 0.15 and β = 4, which are widely accepted default values for highway traffic analysis. The authors ensure that the coefficients were not chosen randomly, however, these approximations can be used as the official information and statistical endorsement is not publicly available.

As a result, the simulation model was calibrated and tuned manually as the data-driven high-fidelity model cannot be obtained. This justifies the authors' approach to simulate the

system as “black-box”, which is an approach widely accepted by scientific communities when the internal mathematical modeling and behavior of the system are not known. Therefore, the manual adjustment was carried out until the average relative error remained within acceptable engineering tolerance (5%). The calibrated model was subsequently validated by confirming the predicted congestion locations and accessibility ranks were consistent under different numerical variations and transportation characteristics of the region.

The next step is to define the transport and cargo demands. Those variables represent both the passengers and cargo flows. We have approximated and assigned the following functions to generate the flows:

$$P(t) = 10 + 3\sin(0.05t) \quad (5)$$
$$C(t) = 5 + 2\sin(0.03t)$$

These functions approximate daily and seasonal variations, reflecting the cyclical nature of transport demand including freight transport, which is critical to regional sustainability. As such, multiple flows and transportation purposes have been considered in our simulation.

The passenger and freight demand functions presented in Equation (5) were introduced as simplified periodic approximations intended to emulate typical temporal fluctuations rather than reproduce exact historical observations.

Passenger transport is generally impacted by stronger daily and seasonal variability due to commuting activities and tourism (especially after the geopolitical issues after 2014), whereas freight transport changes more gradually. Therefore, the passenger demand function was assigned a larger oscillation amplitude (3) than the freight demand function (2).

The frequencies (0.05 and 0.03) were selected to simulate cyclic behavior over the simulation horizon while maintaining numerical stability of the model.

The next step consists of quantitative correlation between the system inputs flows, demands and average capacity to the respective outputs such as (mean travel time, average congestion and weighted accessibility). The general model is expressed in the following equation:

$$Y(t) = \beta_1 P(t) + \beta_2 C(t) + \beta_3 \varsigma(t) + \varepsilon(t) \quad (6)$$

where, $Y(t) -$ represents the system performance indicators, $\varsigma -$ is the average capacity and $\varepsilon(t) -$ is the error term. Analyzing equation (6) allows us to estimate coefficients β_1, β_2, β_3, which quantify the relative influence of each input.

To quantify the influence of both cargo and passenger demands, and network capacity on system performance, Equation (6) was estimated using simulation-generated data comprising 240 time steps since current statistics are not available.

Ordinary Least Squares regression was applied to the simulated observations. The model results are shown below in table.1

Table.1

Parameters of the Simulated Data-Driven Model

Number of Observations	240
Predictors	3
R^2	0.979
Adjusted R^2	0.979
F-statistic	3670.0
p-value	< 0.001

Where, R^2- is the coefficient of determination. It measures how much the variation in the dependent variable is addressed properly by the regression model. It ranges between [0,1], where 0 = not addressed at all, 1 = fully addressed. The value of R^2 demonstrates that the regression model perfectly explained the variables using the flow and passenger demands as well as the capacity metric. The remaining 2.1% (100-97.9) is due to factors not included in the study (actual data and randomness in distribution).

The adjusted R^2 is considered similar in this paper, as new parameters (such as weather conditions, day of the week etc.) were not added to the simulation.

F-statistic is the parameter indicating whether the simulation is working as a whole. It tests the entire model for significance. Combined with p-value, which explains that the results have not occurred by chance.

Table.2

Regression Coefficients

Variable	Coefficient	Standard Error	t-statistic	p-value	95% confidence interval
β_1	0.711	0.009	82.94	< 0.001	[0.694, 0.728]
β_2	0.304	0.018	16.66	< 0.001	[0.268, 0.340]
β_3	-0.047	0.018	-2.70	0.007	[−0.082, −0.013]

The simulated model reflects the following:

- Passenger demand impacts the system performance ($\beta_1 = 0.711$, $p < 0.001$);
- Cargo flow has a moderate impact on the system performance ($\beta_2 = 0.304$, $p < 0.001$);
- Capacity has a minimal impact on the performance ($\beta_3 = -0.047$, $p = 0.007$). By analyzing the parameter β_3, we can conclude that increasing network capacity reduces congestion-related performance degradation, however, that does not indicate direct improved overall performance of the system.

The negative value of β_3 in context of the regression analysis does not underline that increasing capacity reduces or negatively affects transportation performance. Rather, it indicates that, when passenger demand and cargo flow are controlled, higher capacity values are associated with lower observed performance. In other terms, the capacity is increased only as a response of a stress or as a temporary solution with reference to the increased demands in cargo and passengers flow. Operational demands are often tactical and do not carry strategic planning or permanent solution.

The 95% confidence intervals confirm the statistical reliability of the estimated coefficients. The intervals for passenger demand and cargo flow (β_1 and β_2) are positive, highlighting direct and explicit contributions to system performance. Hence, we can state that by improving the values of β_1 and β_2 we can improve the sustainability of the transportation system. This conclusion can be used for strategic planning of the transportation system.

In contrast, the capacity coefficient ranges within negative interval [-0.082, -0.013], underscoring its influence has primarily statistical significance but it is relatively smaller compared with demand-related coefficients.

As it can be seen from Figure 1, there is a structural imbalance peripheral cities being more vulnerable to disruptions, which has implications on sustainability and resilience of the transportation system.

Dynamic simulations using equation (3) demonstrated how congestion quantitatively behaves over time (Figure 2). The results allow us to conclude that congestion levels fluctuate with passenger and cargo demand, producing nonlinear effects on travel times. The nonlinearity is characterized as follows:

- The peak congestion occurs when passenger demand and cargo flows are aligned, leading to significant increases in travel times.
- A minimal increase in the flow beyond capacity thresholds resulted in disproportional large increases in travel times, aligning with equation (3).
- Edges, such as Simferopol–Yalta and Simferopol–Sevastopol, suffer from higher congestion levels due to their central role in the network.

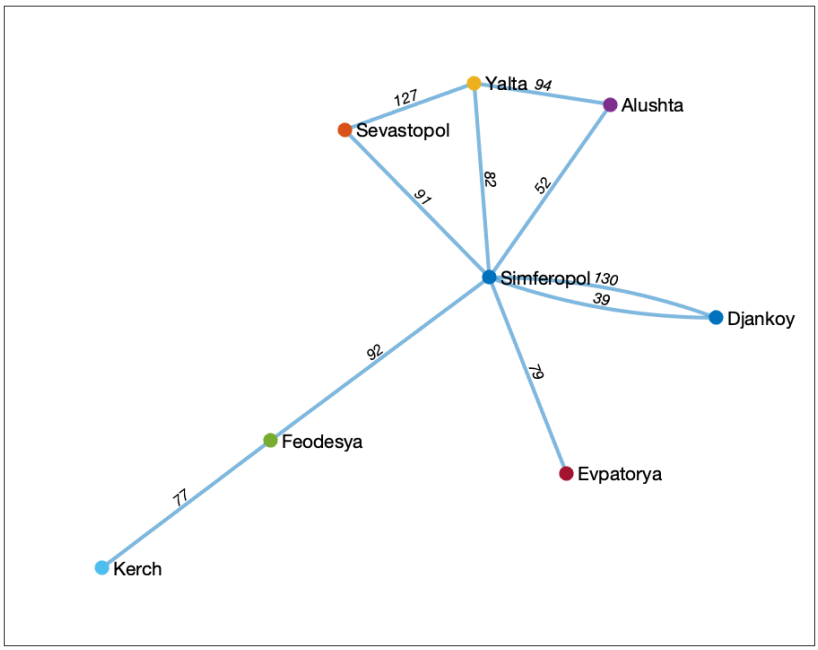


Fig.1. Graph visualization of the Crimean transport network with node centrality highlighted.

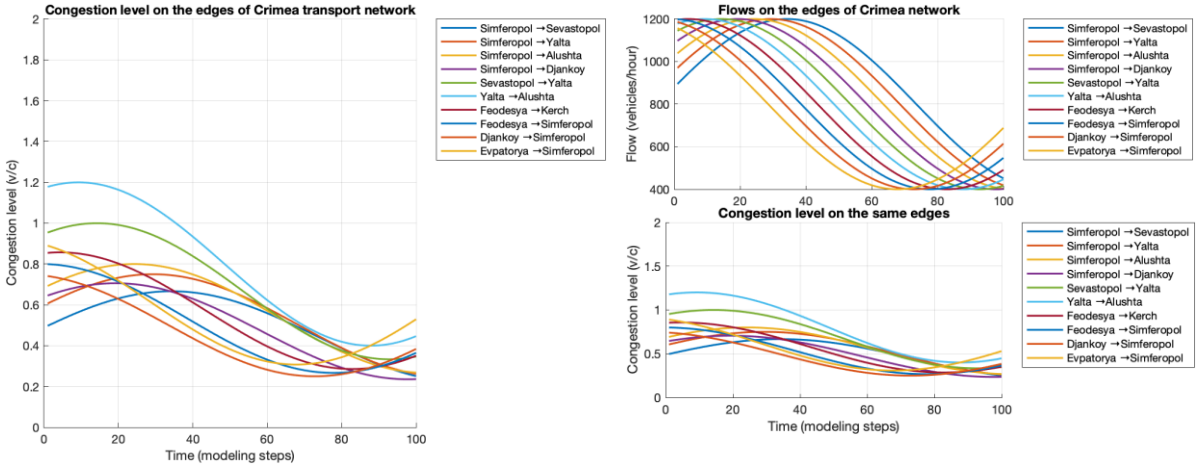


Fig.2 Time series of congestion levels (v/c ratios) across major edges.

Simulation discussion

These findings highlight the importance of capacity management in critical corridors to mitigate congestion. Weighted accessibility indices were computed for each city over time, incorporating passenger demand and congestion-adjusted travel times. The following analysis can be drawn:

- Pertaining to Simferopol, the city has maintained consistently high accessibility due to its multiple connections. This is due to its centrality in the network.

- Peripheral Cities such as Kerch and Feodosiya experienced significant drops in accessibility during peak congestion, reflecting their limited connectivity. This, as well, is based on their geographical location on the map and limited direct connections with other edges.

In addition, accessibility metric fluctuated proportionally with passenger demand, demonstrating the vulnerability of the system to demand parameter.

The results in Figure 3 reflect the need for redundancy in the transportation system. Alternative routes need to be established in order to sustain accessibility metric during peak time.

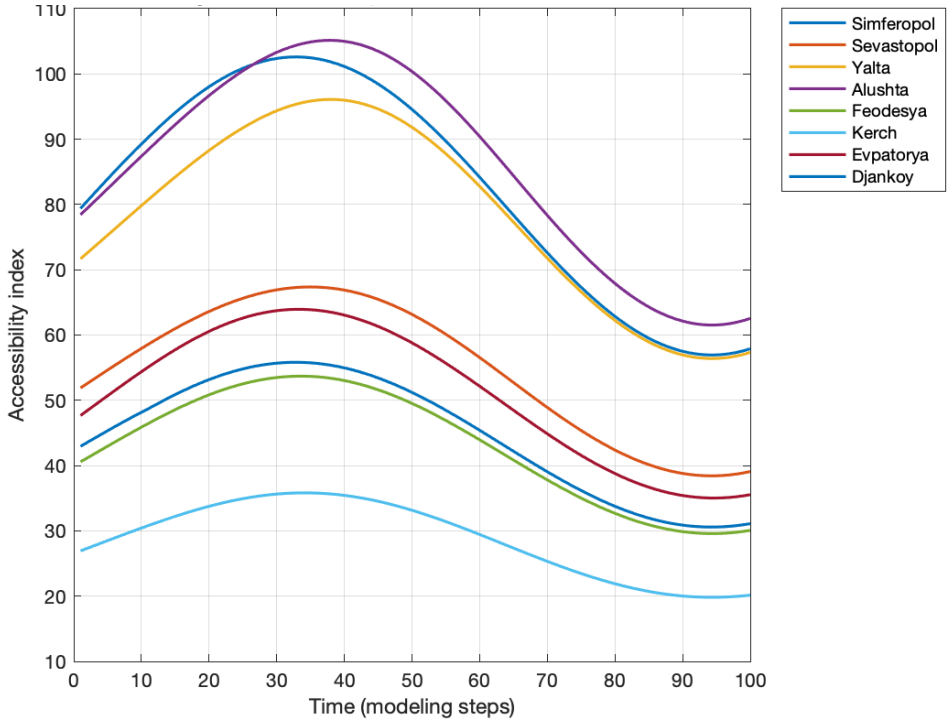


Fig.3 Time series of weighted accessibility indices for each city.

We have carried out a regression analysis to analyze the influence of passenger demand, cargo flow, and capacity on system performance indicators. The following can be drawn:

- Statistically, the mean travel time is hugely impacted by passenger demand (β1), while cargo flow (β2) exerting a moderate effect.
- The average congestion value is mainly driven by passenger demand. Cargo flow additively contributed to fluctuations.
- The weighted accessibility metrics has shown sensitivity to both passenger and cargo flows, underlining the importance of balancing passenger and freight transport.

- Practically, Figure.4 depicts regression coefficient results. We can clearly see that a 10% increase in passenger demand led to a 7% increase in mean travel time, while cargo flow contributed a 3% increase. The Capacity coefficient (β3) acted as a stabilizing factor, reducing sensitivity to demand fluctuations.
-
- Based on analysis of Figure.4, we can generate Figure.5. The bar charts represent the impact of the regression coefficients (passenger demand, cargo flow, and capacity) on system performance.

Conclusion

These visualizations not only validated the mathematical models but also provided actionable insights for policymakers. The analysis of the Crimean Peninsula's transportation system demonstrates the intricate interplay between structural connectivity, dynamic demand, and systemic resilience, all of which are central to sustainability.

The graph-theoretic results highlighted the dominance of Simferopol as the primary hub, with high reachability and accessibility values that confirm its role as the central node in the network. While this centralization ensures efficient connectivity for most cities, it also introduces vulnerability, as disruptions in Simferopol's connections could disproportionately affect the entire system.

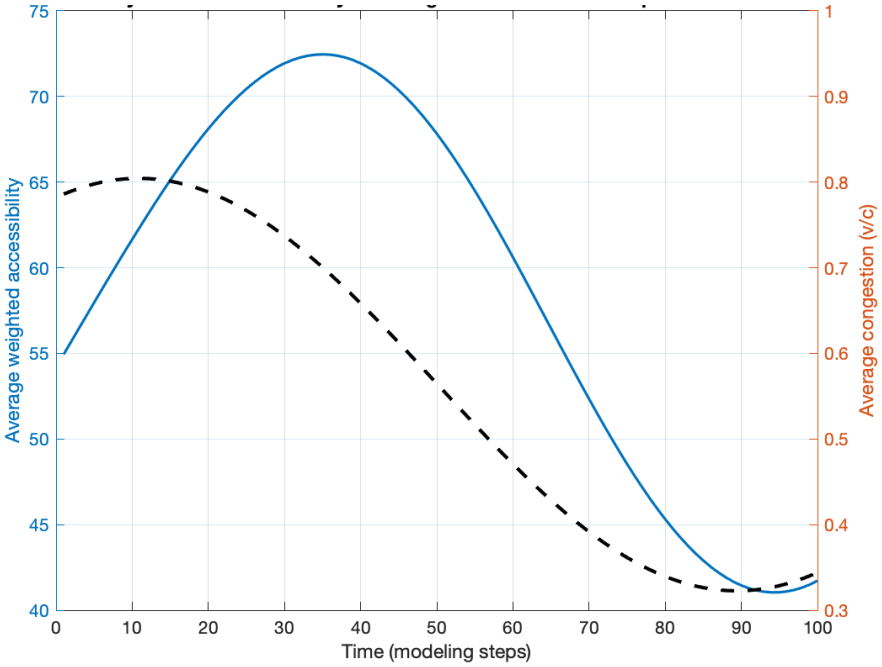


Fig.4 Regression coefficients for system identification models.

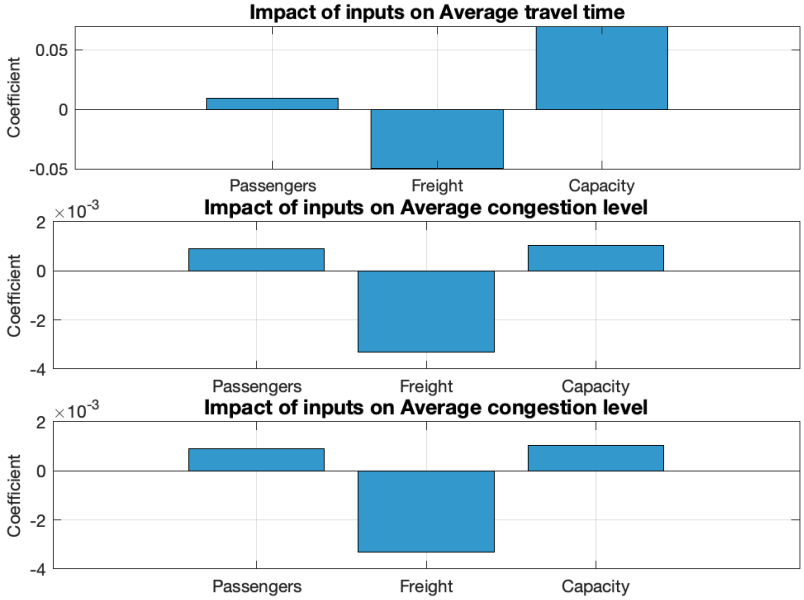


Fig 5. Bar charts of regression coefficients for travel time, congestion, and accessibility models.

Congestion modeling underlined the nonlinear dynamics of travel times, showing that minimal increases in demand beyond capacity thresholds would lead to disproportional large delays.

Weighted accessibility indices provided additional information about the dynamism and nonlinear behavior of the transportation system of Crimean Peninsula, showing that cities with multiple connections record higher accessibility during demand peak, while peripheral cities suffer from sharp declines. This underscores the need for network redundancy and alternative routes to sustain accessibility under stress or emergency scenarios.

Regression-based system identification supported those findings, confirming that passenger demand is the dominant driver impacting performance metrics such as travel time and congestion, while cargo flows impact moderately but significantly the accessibility metrics.

Capacity metrics were established as a stabilizing factor in the transportation system, reducing sensitivity to fluctuations and nonlinearity of the dynamic model.

In a conclusion and based on the mathematical findings and simulation analysis, the sustainability of the transportation system the Crimean Peninsula can be attained by establishing alternative peripheral connections and balancing demand management between passenger and cargo flows.

References

1. Baskakov, A. I. Development of architecture for connecting a system module for people with disabilities to transport infrastructure / A. I. Baskakov, A. Tarasov. — Perspective Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2023. — Vol. 23, no. 1. — P. 84–90. — DOI: https://doi.org.

2. Blokhin, A. Development of transport infrastructure of the Crimean Peninsula as a factor of economic growth / A. Blokhin, S. Kurbatova. — E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 164. — Art. 09012. — DOI: https://doi.org.

3. Fominoff, E. Digital twins in mechanical engineering and transport: efficiency assessment and implementation prospects / E. Fominoff, V. Gvindzhiliya. — Perspective Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2025. — Vol. 25, no. 1. — P. 32–42. — DOI: https://doi.org.

4. Guseinov, R. G. Analysis of the impact of transit traffic on the stability of the regional transport system / R. Guseinov, A. S. Prokhorov. — Perspective Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2024. — Vol. 24, no. 2. — P. 145–154. — DOI: https://doi.org.

5. Karaeva, M. R. Improving forecasting of volume and quality of transportation using neural networks / M. R. Karaeva, V. V. Zyryanov, E. Yu. Semchugova, A. A. Kostenko. — World of Transport and Technological Machinery. — 2024. — No. 1. — P. 81–89.

6. Kumar, A. Joint design of a conventional public transport network and on-demand mobility using particle swarm optimization / A. Kumar, M. Rahman, S. Silva. — 2024. — URL: arxiv.org (accessed: 14.06.2026). — DOI: https://doi.org.

7. Litman, T. A weighted approach: developing indicators for sustainable and liveable transport planning / T. Litman ; Victoria Transport Policy Institute. — 2023. — URL: vtpi.org (accessed: 14.06.2026).

8. Pashchenko, I. V. Current state and prospects of development of the transport system of the Republic of Crimea / I. V. Pashchenko. — Scientific Bulletin. — 2021. — No. 4 (28). — P. 45–52.

9. Zhang, L. Multi-graph convolutional-recurrent neural network for short-term transit passenger flow forecasting / L. Zhang, J. Feng, B. Du. — 2021. — URL: arxiv.org (accessed: 13.06.2026). — DOI: https://doi.org.

10. Zheng, S. A neuro-fuzzy deep learning system for accurate public transport demand prediction: leveraging spatial and temporal factors / S. Zheng, Y. Li, N. Kumar, H. Zhang. — Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2025. — Vol. 168. — Art. 104756. — DOI: https://doi.org.

Список литературы

1. Баскаков, А. И. Разработка архитектуры для подключения системного модуля для людей с ограниченными возможностями к транспортной инфраструктуре / А. И. Баскаков, А. Тарасов. — Перспективные инженерные исследования (Ростов-на-Дону). — 2023. — Т. 23, № 1. — С. 84–90. — DOI: https://doi.org.

2. Блохин, А. Развитие транспортной инфраструктуры Крымского полуострова как фактор экономического роста / А. Блохин, С. Курбатова. — E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 164. — Art. 09012. — DOI: https://doi.org.

3. Фоминофф, Э. Цифровые двойники в машиностроении и на транспорте: оценка эффективности и перспективы внедрения / Э. Фоминофф, В. Гвинджилия. — Перспективные инженерные исследования (Ростов-на-Дону). — 2025. — Т. 25, № 1. — С. 32–42. — DOI: https://doi.org.

4. Гусейнов, Р. Г. Анализ влияния транзитных перевозок на устойчивость региональной транспортной системы / Р. Г. Гусейнов, А. С. Прохоров. —Перспективные инженерные исследования (Ростов-на-Дону). — 2024. — Т. 24, № 2. — С. 145–154. — DOI: https://doi.org.

5. Караева, М. Р. Совершенствование прогнозирования объема и качества перевозок с использованием нейронных сетей / М. Р. Караева, В. В. Зырянов, Е. Ю. Семчугова, А. А. Костенко. — Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. — 2024. — № 1. — С. 81-89.

6. Кумар, А. Совместное проектирование сети обычного общественного транспорта и мобильности по требованию с использованием оптимизации роя частиц / А. Кумар, М. Рахман, С. Сильва. — 2024. — URL: arxiv.org (дата обращения: 14.06.2026). — DOI: https://doi.org.

7. Литман, Т. Взвешенный подход: разработка показателей для устойчивого и приемлемого для жизни транспортного планирования / Т. Литман ; Институт транспортной политики штата Виктория. — 2023. — URL: vtpi.org (дата обращения: 14.06.2026).

8. Пащенко, И. В. Современное состояние и перспективы развития транспортной системы Республики Крым / И. В. Пащенко. — Научный вестник. — 2021. — № 4 (28). — С. 45–52.

9. Чжан, Л. Мультиграфовая сверточно–рекуррентная нейронная сеть для краткосрочного прогнозирования транзитного пассажиропотока / Л. Чжан, Дж. Фэн, Б. Ду. — 2021. — URL: arxiv.org (дата обращения: 13.06.2026). DOI: https://doi.org.

10. Чжэн, С. Нейро-нечеткая система глубокого обучения для точного прогнозирования спроса на общественный транспорт: использование пространственных и временных факторов / С. Чжэн, Ю. Ли, Н. Кумар, Х. Чжан. - Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2025. — Vol. 168. — Art. 104756. — DOI: https://doi.org.

Караева М.Р., Ефимов А.Д.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ

Аннотация. *Транспортные системы имеют основополагающее значение для региональной устойчивости, оказывая влияние на экономический рост, социальную справедливость и экологические показатели. В данной статье разрабатывается многокритериальная система, основанная на данных, для анализа устойчивости транспортной системы Крымского полуострова. Используя теорию графов, моделирование перегруженности и идентификацию системы на основе регрессии, в данной статье оценивается доступность, загруженность и время в пути в условиях динамичных пассажирских и грузовых потоков. Методология предполагает математическое моделирование, подтвержденное результатами моделирования, для получения подробной информации о надежности и устойчивости крымской региональной транспортной сети. Результаты подчеркивают центральную роль*

Симферополя как транспортного узла, нелинейное влияние загруженности на время в пути и важность сбалансированности пассажирских и грузовых потоков. Полученные результаты способствуют транспортному планированию путем выявления узких мест и факторов устойчивости, необходимых для устойчивого развития.

Ключевые слова: *Транспортная устойчивость, анализ с помощью теории графов, моделирование транспортных заторов, идентификация систем*

Information about the authors:	**Сведения об авторах:**
Karaeva Marina R. Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, Associate Professor, Candidate of Economics, Associate Professor, e-mail: k.amigos111@yandex.ru	**Караева Марина Руслановна** Донской Государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, РФ доцент К.э.н.,доцент, e-mail: k.amigos111@yandex.ru
Efimov Artem D. South Russian State Polytechnic University named after Platova (NPI) Novocherkassk, Russia, Head of the Department of International Logistics Systems and Complexes, PhD, Associate Professor, e-mail: e1984ad@mail.ru	**Ефимов Артем Дмитриевич** Южно-Российский государственный политехнический университет (*НПИ*) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, РФ заведующий кафедрой «Международные логистические системы и комплексы» К.т.н.,доцент, e-mail: e1984ad@mail.ru

УДК 656.072.5

Кудрявцев А.А., Оленин М.В., Раковский Е.В., Филатов В.В.

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА НА КОНЕЧНЫЙ ОСТАНОВОЧНЫЙ ПУНКТ

Аннотация. *Точность прогнозирования времени прибытия общественного транспорта является критическим фактором эффективности диспетчерских систем и качества пассажирских перевозок. Цель работы — разработка модели прямого прогнозирования времени прибытия автобуса на конечный остановочный пункт на основе методов машинного обучения. Предложен метод CSTT (Cumulative Segment Travel Time), позволяющий агрегировать информацию о транспортных средствах, движущихся впереди, и сократить размерность признакового пространства. Эмпирической базой исследования выступили данные GPS-мониторинга маршрута №104 в г. Твери (549 тыс. наблюдений за три месяца). Сравнительный анализ регрессионных моделей показал преимущество градиентного бустинга CatBoost (MAE = 2,33 мин, MAPE ≈ 4,6%) над линейными методами и XGBoost. Применение CSTT позволило сократить число признаков в три раза без потери точности. Позиционные характеристики автобуса обеспечивают 73% прогностической значимости модели.*

Ключевые слова: *прогнозирование времени прибытия, ожидаемое время прибытия (ETA), общественный транспорт, машинное обучение, градиентный бустинг, CatBoost, агрегация признаков, GPS-мониторинг, организация перевозок, диспетчерское управление, пассажирский транспорт*

Постановка задачи

В рамках данного исследования решается задача повышения эффективности диспетчерского управления городским пассажирским транспортом и качества пассажирских перевозок. Для достижения этой цели разрабатывается метод прямого прогнозирования времени прибытия (Expected Time of Arrival, ETA). В отличие от традиционных сегментных расчетов, предложенный подход свободен от эффекта накопления погрешностей. Работа начинается с критического анализа существующих подходов для выявления причин неточностей и оценки вычислительной избыточности современных нейросетевых архитектур. На этой основе проектируется оригинальная модель, позволяющая вычислять ETA без последовательного суммирования интервалов и привязки к плановому расписанию. Особое внимание уделяется созданию механизма агрегации данных о транспортных средствах, движущихся впереди по маршруту, что обеспечивает сохранение информативности при минимизации размерности признакового пространства. Для практической реализации метода оптимизируется его вычислительная эффективность, позволяющая использовать исключительно доступные телематические данные и исторические треки. Завершается исследование экспериментальной проверкой на реальной дорожной сети, целью которой является

подтверждение точности разработанного алгоритма и его превосходства над существующими аналогами.

Анализ последних исследований

Точность оценки времени прибытия автобуса имеет критическое значение для эффективного управления пассажирскими перевозками. Диспетчерским системам необходимо заранее знать время прибытия транспортного средства на конечную остановку для корректной работы систем поддержки принятия решений и своевременного принятия управленческих воздействий [1]. Однако существующие системы прогнозирования ETA нередко характеризуются заметной погрешностью. Например, в системе MTA Bus Time (Нью-Йорк) средняя относительная ошибка прогноза составляет около 14–15% MAPE (Mean Absolute Percentage Error) [2].

Современные подходы к прогнозированию времени прибытия общественного транспорта основаны на использовании различных источников данных и методов обработки. В Google Maps для прогнозирования ETA применяются графовые нейронные сети, использующие представление дорожной сети в виде суперсегментов — последовательностей смежных сегментов дорожной сети, соответствующих устойчивым траекториям движения транспорта. Такой подход позволяет снизить эффект накопления ошибки, возникающий при суммировании прогнозов времени движения по отдельным сегментам маршрута [3]. В системе iBus (Transport for London) прогноз формируется на основе GPS-данных, расписания движения и статистических оценок времени стоянок на остановках [4]. Коммерческий сервис Uber использует комбинированный подход, при котором базовый ETA рассчитывается как сумма времен движения по сегментам маршрута, а затем корректируется с помощью моделей машинного обучения [5].

Современные исследования ETA-прогнозирования активно используют классические методы машинного обучения и ансамблевые алгоритмы в качестве базового уровня сравнения. В работе [6] рассматривается применение как одиночных моделей (LSTM, линейная регрессия, KNN, XGBoost и GRU), так и ансамблевых подходов, включая Random Forest, AdaBoost и стекинг. Экспериментальные результаты показывают, что ансамблевые модели обеспечивают более высокую точность по сравнению с одиночными алгоритмами, при этом Random Forest демонстрирует наилучшие показатели качества. Отмечается также, что простые модели, такие как линейная регрессия, сохраняют конкурентоспособность при существенно меньших вычислительных затратах, что делает их применимыми в ресурсно-ограниченных сценариях.

Аналогично в работах [7; 8] рассматриваются градиентные бустинговые методы, включая XGBoost, LightGBM и CatBoost, которые демонстрируют высокую эффективность на табличных телематических данных и остаются сильными конкурентами в задачах ETA-прогнозирования.

Дополнительно в работе [9] применяется XGBoost для прогнозирования времени движения между остановками с последующим анализом факторов влияния, что подтверждает эффективность бустинговых моделей как устойчивого базового подхода.

Помимо выбора моделей, значительное влияние на точность ETA оказывает качество и структура входных данных. В работе [10] предлагается декомпозиция автобусного маршрута на сегменты с перекрестками и без них, для каждого из которых строится отдельная модель прогнозирования на основе XGBoost. Такой подход позволяет учитывать локальные особенности дорожной инфраструктуры и повышает точность прогноза при ограниченном наборе входных данных.

Схожий подход к структурированию информации представлен в работе [11], где предложен метод Bus Flow Centrality Analysis (BFC). Он основан на агрегировании

потоковой информации в транспортной сети и позволяет эффективно снижать размерность признакового пространства при сохранении его информативности. Данный подход демонстрирует важность извлечения структурных пространственно-временных признаков для повышения качества прогнозирования.

Развитие нейросетевых методов привело к применению моделей глубокого обучения для захвата сложных временных зависимостей. В работе [12] предложена модель Geo-conv LSTM, которая объединяет сверточные нейронные сети (1D CNN) для извлечения пространственных признаков и LSTM для моделирования временных зависимостей. Результаты экспериментов показывают, что учет характеристик дорожной инфраструктуры оказывает более значительное влияние на точность прогнозирования по сравнению с внешними факторами, такими как погода или пассажиропоток.

Отдельное направление исследований связано с промышленными системами прогнозирования ETA. В работе [13] представлена модель BusTr, используемая в системе Google Maps для прогнозирования задержек общественного транспорта на основе данных о дорожном трафике. Модель построена на последовательной нейросетевой архитектуре и демонстрирует снижение ошибки MAPE примерно на 30% по сравнению с базовыми подходами, такими как DeepTTE, а также улучшенную устойчивость к изменяющимся условиям дорожного движения.

В последние годы активно развивается направление графовых нейронных сетей (GNN), позволяющих учитывать топологическую структуру транспортных систем. В работе [14] предложен региональный подход к прогнозированию времени движения автобусов на основе GNN, который учитывает информацию о структуре маршрутной сети.

Более сложная архитектура представлена в исследовании [15], где используется гибридная модель GNN с механизмом временно-частотного внимания (temporal-frequency attention). Такой подход позволяет учитывать как краткосрочные, так и долгосрочные временные зависимости, обеспечивая более гибкое моделирование динамики транспортных процессов.

Data-driven подходы на уровне отдельных остановок рассмотрены в работе [16], где показано, что даже при ограниченном объеме телематических данных возможно выявление устойчивых пространственно-временных закономерностей движения.

Анализ существующих решений показывает, что при прогнозировании времени прибытия транспортных средств на фиксированных городских маршрутах наибольшую информативность имеют признаки, характеризующие текущее положение транспортного средства на маршруте, а также информация о сегментах маршрута. В отличие от “сегментных” подходов, основанных на последовательном прогнозировании времени прохождения отдельных участков маршрута, в настоящей работе рассматривается задача непосредственного прогнозирования времени прибытия автобуса на конечную остановку.

На основе существующих систем прогнозирования ETA было сделано предположение, что для фиксированного городского маршрута применение классических алгоритмов машинного обучения является достаточным для получения высокой точности прогноза без использования более сложных нейросетевых архитектур.

Цель работы

Целью настоящей работы является повышение эффективности диспетчерского управления и организации пассажирских перевозок на городских маршрутах за счёт разработки модели прогнозирования времени прибытия транспортного средства (ТС) на конечный остановочный пункт (ОП). В отличие от распространённых сегментных подходов, в работе применяется прямой метод прогнозирования на основе машинного

обучения, использующий исторические данные движения, текущее местоположение и информацию о транспортных средствах, идущих впереди, что позволяет избежать накопления ошибок при последовательном суммировании участков маршрута.

Основная часть

Задача прогнозирования времени прибытия транспортного средства относится к классу задач регрессии, поскольку целевая переменная представляет собой непрерывную величину — время в минутах [17]. В рамках современных подходов к анализу данных для решения подобных задач применяются как параметрические модели, основанные на явном задании функциональной зависимости, так и непараметрические методы машинного обучения, способные выявлять сложные нелинейные закономерности в данных [18].

Базовым инструментом регрессионного анализа является линейная модель, предполагающая аппроксимацию зависимости целевой переменной от признаков линейной комбинацией параметров. Несмотря на интерпретируемость и вычислительную эффективность, такие модели ограничены в способности описывать нелинейные взаимодействия признаков. Расширением линейного подхода является полиномиальная регрессия, позволяющая учитывать нелинейные эффекты низкой степени, однако при увеличении размерности пространства признаков она склонна к переобучению и ухудшению обобщающей способности.

Особое место в анализе структурированных (табличных) данных занимают методы, основанные на решающих деревьях. Дерево решений формирует прогноз путём последовательного разбиения пространства признаков на области по правилам вида «если–то» с минимизацией функции потерь в каждом узле [19]. Для регрессионной задачи в листьях дерева вычисляется среднее значение целевой переменной. Вместе с тем одиночные деревья характеризуются высокой дисперсией и чувствительностью к изменениям обучающей выборки, что может приводить к нестабильности результатов [20].

С целью повышения устойчивости и точности прогнозирования применяются ансамблевые методы, объединяющие множество базовых моделей. В подходе случайного леса (Random Forest) используется бэггинг: деревья обучаются на различных подвыборках исходных данных, а итоговый прогноз формируется путем усреднения их выходов, что позволяет снизить дисперсию модели [19].

Альтернативный подход, градиентный бустинг, предполагает последовательное построение деревьев, каждое из которых минимизирует ошибку предыдущей композиции моделей посредством оптимизации функции потерь [20].

На практике наибольшее распространение получили реализации градиентного бустинга XGBoost и CatBoost. Алгоритм XGBoost включает механизмы регуляризации, оптимизацию структуры деревьев и процедуры ранней остановки, что обеспечивает контроль переобучения и высокую вычислительную эффективность [21]. Алгоритм CatBoost ориентирован на работу с категориальными признаками и использует симметричные (oblivious) деревья, что повышает устойчивость модели и упрощает настройку гиперпараметров [22]. Результаты сравнительных исследований свидетельствуют о том, что ансамблевые методы на основе деревьев демонстрируют высокую конкурентоспособность на структурированных данных [23]. Эти методы также широко применяются в прикладных задачах интеллектуальных транспортных систем [24].

С учетом специфики рассматриваемой задачи — прогнозирования времени прибытия автобуса на конечную остановку по данным GPS-мониторинга — в работе были выбраны несколько моделей для сравнительного анализа. В качестве основного

алгоритма использован CatBoost Regressor, обеспечивающий эффективную обработку категориальных и числовых признаков при сохранении высокой точности. Для сопоставления применён XGBoost как альтернативная реализация градиентного бустинга. Линейная регрессия использовалась в качестве базовой модели, позволяющей оценить вклад линейной составляющей зависимости, а полиномиальная регрессия — для проверки наличия нелинейных эффектов, описываемых полиномами невысокой степени.

Все эксперименты выполнены в среде Python 3.11.14. Использованы библиотеки: CatBoost 1.2.8, XGBoost 3.1.2, LightGBM 4.6.0, scikit-learn 1.8.0, а также NumPy 2.4.1, pandas 2.3.3.

Объектом исследования является городская транспортная система (на примере маршрута №104 в г. Твери), а именно процесс движения автобусов и его параметры, влияющие на точность прогнозирования времени прибытия. Рассматривалось движение в прямом направлении (код направления 00AB). Протяжённость маршрута составляет 15 км, среднее время рейса — 51 минута.

В работе использовались GPS-треки из системы мониторинга транспорта, данные которой хранятся в базе данных ClickHouse. Сбор информации выполнялся в течение трех месяцев – с сентября по ноябрь 2025 года. После фильтрации общий объём подготовленных данных составил 549 305 записей. Фильтрация заключалась в удалении рейсов с аномальной длиной маршрута: если фактическая длина отклонялась от плановой (15 км) более чем на 5%, такой рейс исключался. Это позволило очистить 17,7 % исходных записей.

Для обучения и тестирования моделей применено временное разделение (TSCV - Time Series cross-validator): данные сентября и октября вошли в обучающую выборку, а данные ноября – в тестовую. Такой подход гарантирует отсутствие «утечки» будущей информации в прошлое.

На следующем этапе была проведена проверка независимости каждого отдельного рейса от предыдущих рейсов, выполненных в предыдущие месяцы с использованием группированной кросс-валидации (Group K-Fold), при которой целые рейсы последовательно исключались из обучающих выборок. Это позволило оценить устойчивость модели к возможной автокорреляции между последовательными рейсами и подтвердить обобщающую способность алгоритма при сокращении объема обучающих данных в процессе кросс-валидации.

Формирование признакового пространства осуществлялось поэтапно. На первом этапе использовалась полная схема признаков, включающая характеристики текущего автобуса и информацию о пяти ближайших автобусах впереди по маршруту. Базовые признаки текущего транспортного средства представлены в таблице 1.

Таблица 1

Базовые признаки текущего автобуса

№	Признак	Описание
1	bus_id	Идентификатор автобуса
2	mr_id	Идентификатор маршрута
3	race_type	Направление движения (00AB)
4	last_status_distance_km	Позиция на маршруте, км
5	km_left	Остаток пути до конечной, км
6	final_dist	Длина маршрута, км
7	t_hour	Текущий час
8	t_minute	Текущая минута
9	t_start_hour	Час начала рейса
10	t_start_minute	Минута начала рейса
11	t_start_day_of_week	День недели
12	t_start_week_number	Номер недели

Информация о каждом из пяти ближайших автобусов впереди формировалась по единой структуре, приведенной в таблице 2. Для каждого порядкового номера N (от 1 до 5) формировался аналогичный набор признаков.

Таблица 2

Признаки для каждого идущего впереди автобуса (N = 1…5)

№	Признак	Описание
1	ahead_N_exists	Наличие автобуса впереди (0/1)
2	ahead_N_bus_distance_km	Расстояние до данного автобуса, км
3	ahead_N_last_status_distance_km	Его позиция на маршруте, км
4	ahead_N_km_left	Остаток пути до конечной, км
5	ahead_N_final_dist	Длина маршрута данного рейса, км
6	ahead_N_t_hour	Час последнего сигнала
7	ahead_N_t_minute	Минута последнего сигнала

Таким образом, 5 автобусов × 7 признаков = 35 признаков, которые совместно с 12 базовыми характеристиками (таблица 1) формировали 47 признаков исходной модели. Данная структура обеспечивает детализированное описание дорожной обстановки, однако высокая размерность усложняет интерпретацию модели и увеличивает риск переобучения.

При расчете использовалось программное обеспечение Visual Studio Code и Jupyter Notebook.

Для снижения размерности признакового пространства предложен метод CSTT (Cumulative Segment Travel Time), основанный на агрегировании информации о транспортных средствах, движущихся впереди по маршруту. На рис. 1 схематично представлен принцип вычисления временных интервалов, используемых для прогнозирования времени прибытия ТС.

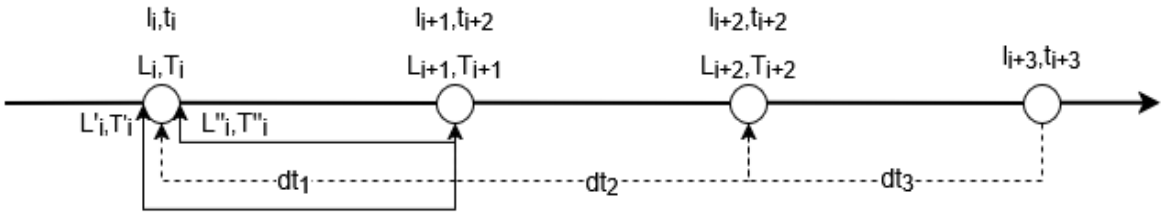


Рис 1. Схема вычисления времени прохождения участков маршрута идущих впереди транспортных средств

Пусть текущее положение целевого автобуса обозначено как l_i,t_i, где l_i — координата на маршруте, t_i — момент наблюдения. Автобус, идущий впереди i+1, ранее проходил данную позицию маршрута. В архивных данных для него выбираются две соседние точки траектории L'_i,T'_i и L''_i,T''_i, пространственно ближайшие к координате l_i и для которых выполняется условие $L'_i < l_i < L''_i$. Поскольку GPS-наблюдения дискретны, момент времени фактического прохождения позиции T_i определяется методом линейной интерполяции между этими точками. Таким образом восстанавливается оценка времени нахождения, идущего впереди транспортного средства в позиции l_i.

Временной сдвиг между текущим автобусом и автобусом i+1 на рассматриваемом участке определяется как

$$dt_1 = T_i - T_{i+1},$$

где T_i — интерполированное значение времени прохождения позиции l_i автобусом i+1.

Аналогичная процедура выполняется для последующих транспортных средств i+2, i+3 и т.д., что приводит к формированию величин dt_2, dt_3, …, как показано на рисунке 1.

В рамках метода CSTT указанные временные интервалы агрегируются в суммарный показатель:

$$sum_travel_time_seconds = \sum_{i=1}^{m} dt_i,$$

где m — число учитываемых транспортных средств, идущих впереди ($0 \leq m \leq 5$);

sum_travel_time_seconds — суммарное время прохождения участков автобусами, идущими впереди.

Таким образом, вместо использования набора разрозненных временных интервалов dt_1, dt_2, dt_3 и т.д., применяется интегральная характеристика состояния транспортного потока, отражающая накопленный эффект движения идущих впереди автобусов на рассматриваемом участке маршрута. Это позволяет сократить размерность признакового пространства при сохранении информативности модели и обеспечить более устойчивую процедуру прогнозирования времени прибытия.

В результате вместо 35 «сырых» признаков рассчитывались три интегральных показателя (таблица 3).

Таблица 3

Агрегированные признаки метода CSTT

Признак	Описание
sum_travel_time_seconds	Суммарное время прохождения участков автобусами, идущих впереди
max_ahead_distance_km	Позиция наиболее удалённого автобуса, идущего впереди
ahead_buses_count	Количество автобусов впереди (0–5)

После агрегации общее число признаков сократилось с 47 до 15 (12 базовых + 3 агрегированных), что позволило уменьшить размерность пространства признаков более чем в три раза без потери качества прогноза.

Дополнительно сформированы признаки, отражающие динамические характеристики движения (таблица 4).

Таблица 4

Скоростные и интервальные признаки

Признак	Формула расчета	Интерпретация
current_speed	last_status_distance_km / time_elapsed_hours	Пройденное расстояние от начала маршрута ÷ время с начала рейса (км/ч)
ahead_speed	max_ahead_distance_km − last_status_distance_km) / (sum_travel_time_seconds / 3600)	Расстояние до самого дальнего ТС, идущего впереди ÷ суммарное время CSTT (км/ч)
speed_ratio	current_speed / ahead_speed	Отношение нашей скорости к скорости потока впереди. Ограничено от 0.1 до 10
avg_headway_seconds	sum_travel_time_seconds / ahead_buses_count	Суммарное время CSTT ÷ количество автобусов впереди (секунды)
is_isolated	ahead_buses_count == 0	Флаг: 1, если впереди нет ни одного автобуса, иначе 0

В модель также включены временные признаки (час, минута, день недели, номер недели), тип дня (рабочий, час пик, выходной, праздничный) и погодные параметры (температура, наличие дождя и снега), полученные через Open-Meteo API [25].

В процессе формирования признакового пространства была проведена дополнительная проверка на наличие потенциальной утечки данных. Особое внимание было уделено переменным final_dist и km_left, отражающим длину маршрута и остаток пути до конечной остановки. Первоначально данные показатели рассчитывались на основе фактически зафиксированной длины завершенного рейса, что теоретически могло приводить к использованию информации, доступной только после окончания поездки.

С целью исключения возможной утечки обе переменные были приведены к плановой длине маршрута, равной 15 км, установленной в соответствии с официальной трассировкой маршрута №104. Таким образом, при расчёте остатка пути использовалось фиксированное нормативное значение длины маршрута, одинаковое для всех наблюдений. Проверка влияния данной корректировки показала незначительное изменение качества модели: значение MAE увеличилось с 2,33 до 2,35 минуты, что соответствует относительному приросту порядка 0,9%. Проведенная корректировка обеспечивает методологическую строгость исследования и исключает использование постфактум информации.

В качестве основной модели использован алгоритм CatBoost Regressor. Для сравнения применены XGBoost, линейная регрессия и полиномиальная линейная регрессия. Качество оценивалось по метрике MAE (Mean Absolute Error) в минутах.

Оценка качества моделей прогнозирования выполнялась по метрике средней абсолютной ошибки (MAE), выраженной в минутах, что позволяет непосредственно интерпретировать результат в прикладном контексте диспетчерского управления. Сравнительный анализ алгоритмов представлен в таблице 5.

Таблица 5

Сравнение моделей прогнозирования ETA (с использованием метода TSCV)

Модель	MAE, мин	Отклонение относительно CatBoost
CatBoost Regressor	2,33	—
XGBoost	2,58	+11%
Linear Regression	3,17	+36%
Linear Regression + Polynomial	3,74	переобучение

Минимальное значение MAE (2,33 мин) получено при использовании CatBoost Regressor. Алгоритм XGBoost уступает по точности на 11%, а линейная регрессия — на 36%. Полиномиальная регрессия продемонстрировала ухудшение качества, что свидетельствует о переобучении при увеличении степени полинома. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения градиентного бустинга для учета сложных зависимостей между агрегированными и производными признаками, сформированными на этапе, описанном в разделе «Материалы и методы».

На рисунке 2 показано, что использование Group K-Fold для обучения позволило получить лучшие результаты на всех типах моделей (Weighted Avg, CatBoost, XGBoost, LightGBM, Liner) в сравнении с TSCV.

Анализ линейности зависимости времени до конечной остановки от положения автобуса на маршруте показал коэффициент детерминации $R^2 = 0,889$ (расчёт выполнен на подвыборке из 50 тыс. наблюдений). Средний наклон регрессионной зависимости составляет около 235 секунд на километр, что эквивалентно приблизительно 4 минутам на 1 км пути. Это подтверждает близость задачи к линейной модели в первом приближении. Однако наличие нелинейных эффектов, связанных с часами пик, взаимодействием транспортных средств и изменением дорожной обстановки, обусловливает преимущество CatBoost над линейными методами.

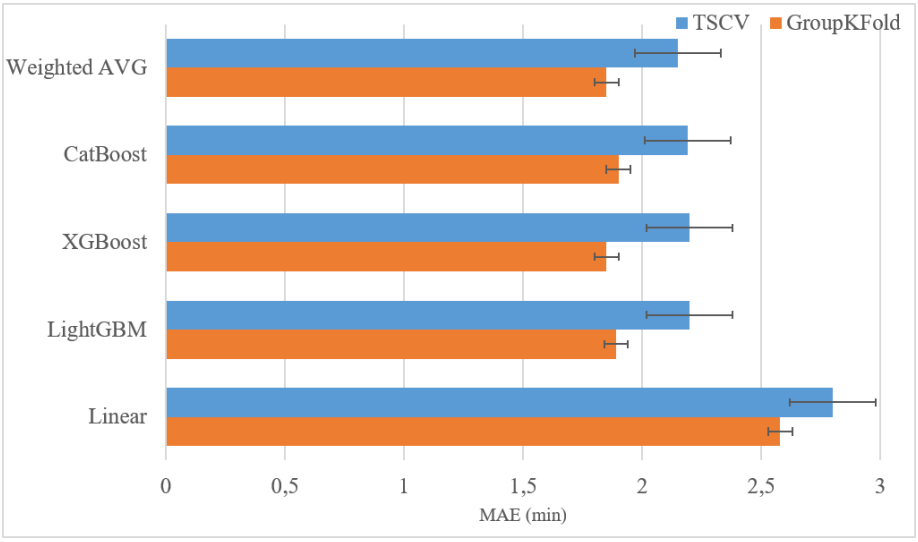


Рис. 2. Сравнение MAE при использовании метода TSCV и Group K-Fold

Отдельно проанализировано влияние агрегирования признаков методом CSTT и добавления производных характеристик (таблица 6).

Таблица 6

Влияние структуры признакового пространства на MAE

Этап формирования модели	MAE, мин	Изменение
Базовая модель (CSTT, 15 признаков)	2,41	—
+ скоростные признаки	2,37	−1,7%
+ интервальные признаки (avg_headway_seconds, is_isolated)	2,33	−1,7%

Сокращение размерности с 47 до 15 признаков за счет агрегирования не привело к ухудшению качества, что подтверждает достаточность интегрального описания дорожной ситуации. Дополнительные скоростные и интервальные признаки обеспечили суммарное снижение MAE на 3,3% (с 2,41 до 2,33 мин), что демонстрирует их вклад в уточнение прогноза.

Проверка гипотезы о влиянии погодных условий выполнена путем стратификации тестовой выборки (таблица 7).

Таблица 7

Ошибка модели в зависимости от погодных условий

Погодные условия	MAE, мин	Доля наблюдений
Снег	5,72	2,6%
Дождь	2,91	0,4%
Благоприятные условия	2,15	97%

При снегопаде ошибка возрастает более чем в 2,5 раза по сравнению со средним значением, что указывает на высокую чувствительность модели к редким экстремальным условиям. Однако из-за малой доли таких наблюдений включение погодных признаков не привело к снижению общего MAE (2,43 мин против 2,41 мин для модели без погодных параметров).

Аналогичный анализ выполнен для различных типов дней (таблица 8).

Таблица 8

Ошибка модели по типу дня

Тип дня	MAE, мин
Выходные	1,73
Час пик	2,10
Рабочий (не пик)	2,96

Наименьшая ошибка наблюдается в выходные дни, что объясняется меньшей вариативностью трафика. Однако добавление бинарных признаков типа дня не привело к улучшению итоговой метрики, поскольку соответствующая информация уже частично кодируется переменной day_of_week, входящей в базовый набор признаков.

Зависимость точности прогноза от расстояния до конечной остановки представлена в таблице 9.

Таблица 9

Зависимость MAE от остатка пути

Остаток пути до конечной, км	MAE, мин
0	0,55
5	1,69
10	3,90
15	12,12

По мере удаления от конечной остановки неопределенность прогноза возрастает, что отражает накопление потенциальных внешних воздействий (изменения трафика, остановки, задержки). Минимальная ошибка достигается на завершающем участке маршрута.

Анализ важности признаков, полученный встроенными средствами CatBoost, приведён в таблице 10.

Таблица 10

Относительная важность признаков

Признак	Важность, %
last_status_distance_km	45
km_left	28
sum_travel_time_seconds	7
t_start_hour	7
t_hour	5

Позиционные признаки формируют совокупно около 73% вклада в модель, что подтверждает доминирующее влияние текущего положения автобуса на прогнозируемое время прибытия. Агрегированный показатель CSTT (7%) обеспечивает дополнительную информацию о состоянии транспортного потока впереди, а временные характеристики отражают систематические суточные колебания скорости движения.

Таким образом, выполненные расчёты подтверждают обоснованность перехода от детализированного описания пяти транспортных средств, идущих впереди к агрегированной модели с ограниченным числом признаков, и демонстрируют преимущество градиентного бустинга при решении задачи прямого прогнозирования ETA.

Выводы

Сравнительный анализ алгоритмов (таблица 5) показал устойчивое преимущество CatBoost Regressor (MAE = 2,33 мин) над XGBoost и линейными моделями.

Преимущество градиентного бустинга ожидаемо, учитывая способность данного метода выявлять нелинейные зависимости и взаимодействия между признаками. Хотя первичный регрессионный анализ выявил высокую линейную связь между временем до конечной и пройденным расстоянием ($R^2 = 0,889$), учёт таких факторов, как час пик или взаимодействие с автобусами, идущими впереди, требует более сложных моделей. Полиномиальная регрессия, напротив, продемонстрировала переобучение, что подтверждает нецелесообразность принудительного усложнения линейных моделей без регуляризации.

Достигнутая точность прогноза (MAPE ≈ 4,6%) значительно превосходит показатели, характерные для некоторых зарубежных систем (например, MTA Bus Time с ошибкой ~14–15% MAPE). Это позволяет предположить, что предложенный подход может быть эффективно масштабирован на другие маршруты. Важно отметить, что высокая точность была достигнута без использования данных о плановом расписании и идентификаторах водителей, что открывает перспективы для дальнейшего улучшения.

Вместе с тем ряд факторов не оказал ожидаемого положительного влияния на качество прогноза. Включение погодных параметров (температура, осадки) не привело к снижению общей ошибки MAE. Анализ стратифицированной выборки (таблица 7) объясняет этот результат: доля наблюдений в условиях снега (2,6%) и дождя (0,4%) крайне мала. При этом резкое возрастание ошибки во время снегопада (MAE = 5,72 мин) указывает на то, что при накоплении исторических данных за зимний период учёт погоды станет критически важным. Аналогичная ситуация сложилась с признаками, идентифицирующими тип дня (выходной, час пик): их информация оказалась избыточной на фоне уже имеющихся календарных признаков (день недели, час), что привело к отсутствию прироста точности.

Анализ важности признаков (таблица 10) подтвердил, что позиционные характеристики (положение на маршруте и остаток пути) являются фундаментальными для задачи прогнозирования ETA.

Несмотря на высокие результаты, работа имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации выводов и планировании будущих исследований. Во-первых, выборка ограничена тремя месяцами наблюдений (осень), что не позволяет моделировать сезонные колебания транспортных потоков, характерные для зимнего периода. Во-вторых, данные получены только для одного маршрута (№104) и одного направления, что ставит вопрос о генерализуемости метода на всю маршрутную сеть с её разнообразием характеристик (длина, наличие выделенных полос, интенсивность трафика). В-третьих, в модели не использовались потенциально значимые признаки, такие как отклонение от расписания. Данный показатель аккумулирует информацию как о внешних факторах (загруженность дорожной сети), так и о тактике водителя (стремление к нагону или замедлению для соблюдения графика), и идентификатор водителя, позволяющий учесть индивидуальный стиль вождения. Включение этих данных, а также расширение периода сбора информации являются наиболее очевидным направлением дальнейшей работы для повышения робастности и точности прогнозирования.

Разработанная модель может быть интегрирована в системы диспетчерского управления городским пассажирским транспортом для повышения точности прогнозов прибытия, оперативного регулирования интервалов движения и минимизации отклонений от графика, что позволит повысить качество транспортного обслуживания населения.

Список литературы

1. ПНСТ 991–2024. Интеллектуальные транспортные системы. Подсистемы диспетчерского управления городским пассажирским транспортом. Команды диспетчерского управления, порядок применения. – М.: Российский институт стандартизации, 2025. – 12 с.

2. Geen M., Li H. Predicting MTA Bus Arrival Times in New York City [Электронный ресурс] / M. Geen, H. Li; Stanford University. – Stanford, 2017. – URL: https://cs229.stanford.edu/proj2017/final-reports/5229496.pdf (дата обращения: 09.03.2026)

3. Derrow-Pinion A., She J., Wong D., Lange O., Hester T., Perez L., Nunkesser M., Lee S., Guo X., Wiltshire B., Battaglia P. W., Gupta V., Li A., Xu Z., Sanchez-Gonzalez A., Li Y., Veličković P. ETA Prediction with Graph Neural Networks in Google Maps // Proceedings of the 30th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM '21). – Virtual Event, Queensland, Australia, Nov. 1–5, 2021. – P. 3767–3776 – DOI:10.1145/3459637.3481916.

4. Wong A., Hounsell N. Using the iBus System to Provide Improved Public Transport Information and Applications for London [Электронный ресурс] // World Conference on Transport Research (WCTR). – Lisbon, 2006. – URL: https://www.wctrs-society.com/wp-content/uploads/abstracts/lisbon/01753.pdf (дата обращения: 09.03.2026).

5. DeepETA: How Uber Predicts Arrival Times Using Deep Learning [Электронный ресурс] // Uber Engineering Blog. – 2020. – URL: https://www.uber.com/en-FR/blog/deepeta-how-uber-predicts-arrival-times/ (дата обращения: 09.03.2026).

6. Huang H., Huang L., Song R., Jiao F., Ai T. Bus Single-Trip Time Prediction Based on Ensemble Learning // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 6831167. – DOI: 10.1155/2022/6831167.

7. Savithramma R. M., Ashwini B. P., Aparna B. P., Pai J. U., Suhas S. P., Khan A. A. Machine Learning Based Public Transit Bus Arrival Time Prediction System // 2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS). – New York: IEEE, 2024. – DOI: 10.1109/ICUIS64676.2024.10866233.

8. Antypas E., Spanos G., Lalas A., Votis K., Tzovaras D. Estimated Time of Arrival in Autonomous Vehicles Using Gradient Boosting: Real-life case study in public transportation // IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). – New York: IEEE, 2022. – DOI: 10.1109/ISC255366.2022.9921853.

9 Zhu L., Shu S., Zou L. XGBoost-based travel time prediction between bus stations and analysis of influencing factors // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022. – Article ID 3504704. – DOI: 10.1155/2022/3504704.

10. Ashwini B. P., Sumathi R., Sudhira H. S. A Dynamic Model for Bus Arrival Time Estimation based on Spatial Patterns using Machine Learning [Электронный ресурс] // arXiv.org: preprint server. – 2022. – arXiv:2210.00733. – URL: https://arxiv.org/abs/2210.00733 (дата обращения: 09.03.2026).

11. Lee C., Yoon Y. A Novel Bus Arrival Time Prediction Method Based on Spatio-Temporal Flow Centrality Analysis and Deep Learning // Electronics. – 2022. – Vol. 11, No. 12. – Art. 1875. – DOI: 10.3390/electronics11121875

12. Lee G., Choo S., Choi S., Lee H. Does the Inclusion of Spatio-Temporal Features Improve Bus Travel Time Predictions? A Deep Learning-Based Modelling Approach // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, № 12. – Art. 7431. – DOI: 10.3390/su14127431.

13. Barnes R., Buthpitiya S., Cook J., Fabrikant A., Tomkins A., Xu F. BusTr: Predicting Bus Travel Times from Real-Time Traffic [Электронный ресурс] // arXiv.org: preprint server. – 2020. – arXiv:2007.00882. – URL: https://arxiv.org/abs/2007.00882 (дата обращения: 09.03.2026)

14. Li Y., Zhang M., Chen B., Wu W., Shi M. Regional bus travel time prediction using graph neural networks // Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. – 2026. – DOI: 10.1061/JTEPBS.TEENG-9006.

15. Zhai H., Liu X., Cui L., Wang C., Wang Y., Liu Y. Bus arrival time prediction using graph neural networks with hybrid temporal-frequency attention // Proceedings of the 2026 5th International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN ’26). – New York : ACM, 2026. – DOI: 10.1145/3801228.3801266.

16 Yusuf O., Rasheed A., Lindseth F. Data-driven predictive modelling of stop-level public transit patterns // Transportation. – 2025. – DOI: 10.1007/s11116-025-10689-4

17. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. – New York: Springer, 2013. – 426 p.

18. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York: Springer, 2006. – 738 p.

19. Breiman L. Random forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32. – DOI: 10.1023/A:1010933404324.

20. Friedman J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // Annals of Statistics. – 2001. – Vol. 29, № 5. – P. 1189–1232. – DOI: 10.1214/AOS/1013203451.

21. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — New York: ACM, 2016. – P. 785–794. – DOI: 10.1145/2939672.2939785.

22. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A. V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2018. – Vol. 31. – P. 6638–6648. – DOI: 10.48550/arXiv.1706.09516.

23. Fernández-Delgado M., Cernadas E., Barro S., Amorim D. Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – Vol. 15. – P. 3133–3181.

24. Moreira-Matias L., Mendes-Moreira J., de Sousa J. F., Gama J. Improving mass transit operations by using AVL-based systems: a survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 16, № 4. – P. 1636–1653. – DOI: 10.1109/TITS.2014.2376772.

25. Open-Meteo [Электронный ресурс]: free weather API. – 2026. – URL: https://open-meteo.com/ (дата обращения: 09.03.2026).

References

1. PNST 991-2024. Intellektual'nye transportnye sistemy. Podsistemy dispetcherskogo upravleniya gorodskim passazhirskim transportom. Komandy dispetcherskogo upravleniya, poryadok primeneniya [Intelligent transport systems. Subsystems of dispatching control of urban passenger transport. Dispatching control commands, order of application]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii, 2025. 12 p. (in Russian).

2. Geen M., Li H. Predicting MTA Bus Arrival Times in New York City. Stanford University, 2017. URL: https://cs229.stanford.edu/proj2017/final-reports/5229496.pdf (accessed: 09.03.2026).

3. Derrow-Pinion A., She J., Wong D., Lange O., Hester T., Perez L., Nunkesser M., Lee S., Guo X., Wiltshire B., Battaglia P. W., Gupta V., Li A., Xu Z., Sanchez-Gonzalez A., Li Y., Veličković P. ETA Prediction with Graph Neural Networks in Google Maps. Proceedings of the 30th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM '21), Virtual Event, Queensland, Australia, Nov. 1-5, 2021, pp. 3767-3776. DOI: 10.1145/3459637.3481916.

4. Wong A., Hounsell N. Using the iBus System to Provide Improved Public Transport Information and Applications for London. World Conference on Transport Research (WCTR), Lisbon, 2006. URL: https://www.wctrs-society.com/wp-content/uploads/abstracts/lisbon/01753.pdf (accessed: 09.03.2026).

5. DeepETA: How Uber Predicts Arrival Times Using Deep Learning. Uber Engineering Blog, 2020. URL: https://www.uber.com/en-FR/blog/deepeta-how-uber-predicts-arrival-times/ (accessed: 09.03.2026).

6. Huang H., Huang L., Song R., Jiao F., Ai T. Bus Single-Trip Time Prediction Based on Ensemble Learning. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, vol. 2022, Article ID 6831167. DOI: 10.1155/2022/6831167.

7. Savithramma R. M., Ashwini B. P., Aparna B. P., Pai J. U., Suhas S. P., Khan A. A. Machine Learning Based Public Transit Bus Arrival Time Prediction System. 2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS), New York: IEEE, 2024. DOI: 10.1109/ICUIS64676.2024.10866233.

8. Antypas E., Spanos G., Lalas A., Votis K., Tzovaras D. Estimated Time of Arrival in Autonomous Vehicles Using Gradient Boosting: Real-life case study in public transportation. IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), New York: IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ISC255366.2022.9921853.

9 Zhu L., Shu S., Zou L. XGBoost-based travel time prediction between bus stations and analysis of influencing factors. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, Article ID 3504704. DOI: 10.1155/2022/3504704.

10. Ashwini B. P., Sumathi R., Sudhira H. S. A Dynamic Model for Bus Arrival Time Estimation based on Spatial Patterns using Machine Learning. arXiv preprint arXiv:2210.00733, 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2210.00733 (accessed: 09.03.2026).

11. Lee C., Yoon Y. A Novel Bus Arrival Time Prediction Method Based on Spatio-Temporal Flow Centrality Analysis and Deep Learning. Electronics, 2022, vol. 11, no. 12, Art. 1875. DOI: 10.3390/electronics11121875.

12. Lee G., Choo S., Choi S., Lee H. Does the Inclusion of Spatio-Temporal Features Improve Bus Travel Time Predictions? A Deep Learning-Based Modelling Approach. Sustainability, 2022, vol. 14, no. 12, Art. 7431. DOI: 10.3390/su14127431.

13. Barnes R., Buthpitiya S., Cook J., Fabrikant A., Tomkins A., Xu F. BusTr: Predicting Bus Travel Times from Real-Time Traffic. arXiv preprint arXiv:2007.00882, 2020. URL: https://arxiv.org/abs/2007.00882 (accessed: 09.03.2026).

14. Li Y., Zhang M., Chen B., Wu W., Shi M. Regional bus travel time prediction using graph neural networks. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2026. DOI: 10.1061/JTEPBS.TEENG-9006.

15. Zhai H., Liu X., Cui L., Wang C., Wang Y., Liu Y. Bus arrival time prediction using graph neural networks with hybrid temporal-frequency attention. Proceedings of the 2026 5th International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN '26), New York: ACM, 2026. DOI: 10.1145/3801228.3801266.

16. Yusuf O., Rasheed A., Lindseth F. Data-driven predictive modelling of stop-level public transit patterns. Transportation, 2025. DOI: 10.1007/s11116-025-10689-4.

17. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. New York: Springer, 2013. 426 p.

18. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer, 2006. 738 p.

19. Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, vol. 45, no. 1, pp. 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

20. Friedman J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. Annals of Statistics, 2001, vol. 29, no. 5, pp. 1189-1232. DOI: 10.1214/AOS/1013203451.

21. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, New York: ACM, 2016, pp. 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.

22. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A. V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. Advances in Neural Information Processing Systems, 2018, vol. 31, pp. 6638-6648. DOI: 10.48550/arXiv.1706.09516.

23. Fernández-Delgado M., Cernadas E., Barro S., Amorim D. Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? Journal of Machine Learning Research, 2014, vol. 15, pp. 3133-3181.

24. Moreira-Matias L., Mendes-Moreira J., de Sousa J. F., Gama J. Improving mass transit operations by using AVL-based systems: a survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 1636-1653. DOI: 10.1109/TITS.2014.2376772.

25. Open-Meteo: free weather API, 2026. URL: https://open-meteo.com/ (accessed: 09.03.2026).

Kudryavtsev A. A., Olenin M.V., Rakovsky E.V., Filatov V.V.

MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING THE ARRIVAL TIME OF LAND-BASED URBAN PASSENGER TRANSPORT AT THE FINAL STOP

Abstract*. The accuracy of predicting the arrival time of public transport is a critical factor in the efficiency of dispatch systems and the quality of passenger transportation. The aim of the work is to develop a model for direct prediction of the bus arrival time at the final stop based on machine learning methods. The CSTT (Cumulative Segment Travel Time) method is proposed, which allows aggregating information about vehicles moving ahead and reducing the dimension of the feature space. The empirical basis of the study was the GPS monitoring data of route No. 104 in Tver (549 thousand observations in three months). A comparative analysis of regression models showed the advantage of CatBoost gradient boosting (MAE = 2.33 min, MAPE ≈ 4.6%) over linear methods and XGBoost. The use of CSTT made it possible to reduce the number of features by three times without loss of accuracy. The positional characteristics of the bus provide 73% of the predictive significance of the model.*

Keywords: *arrival time prediction; ETA; public transport; machine learning; gradient boosting; CatBoost; feature aggregation; GPS monitoring*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Кудрявцев Александр Александрович ООО«ТранснавиСофт» Адрес: Россия, 115114, Москва, Летниковская ул., 10с4 руководитель управления разработки систем планирования и мониторинга kudryavtsevaa@trnsoft.ru	**Kudryavtsev Alexander Alexandrovich** TransnaviSoft Address: 115114, Russia, Moscow, Letnikovskaya str., 10bld4, Head of the Planning and Monitoring Systems Development Department kudryavtsevaa@trnsoft.ru
Оленин Максим Владимирович ООО«ТранснавиСофт» Адрес: Россия, 115114, Москва, Летниковская ул., 10с4 Исполнительный директор	**Olenin Maxim Vladimirovich** TransnaviSoft Address: 115114, Russia, Moscow, Letnikovskaya str., 10bld4 Executive Director

oleninmv@trnsoft.ru **Раковский Егор Владимирович** ООО«ТранснавиСофт» Адрес: Россия, 115114, Москва, Летниковская ул., 10с4 Аналитик данных degor1997@gmail.com **Филатов Виталий Викторович** ООО«ТранснавиСофт» Адрес: Россия, 115114, Москва, Летниковская ул., 10с4 инженер-программист в отделе разработки систем диспетчеризации для транспорта f.v.v.2000@rambler.ru	oleninmv@trnsoft.ru **Rakovsky Egor Vladimirovich** TransnaviSoft Address: 115114, Russia, Moscow, Letnikovskaya str., 10bld4, Data Analyst degor1997@gmail.com **Filatov Vitaly Viktorovich** TransnaviSoft Address: 115114, Russia, Moscow, Letnikovskaya str., 10bld4, Software Engineer in the Department of Dispatching Systems Development for Transport f.v.v.2000@rambler.ru

УДК 656.07 : 629.36 : 004.8

Смирнов А.С., Филиппова Н.А., Мельник А.А., Бур А.Н.

РАЗВИТИЕ АРКТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕВОЗОК ТЕХНИКОЙ ВЫСОКОЙ ПРОХОДИМОСТИ И ТЕХНОЛОГИЙ АВТОНОМИИ

Аннотация. *Данная статья посвящена обоснованию способов изменения и развития транспортных систем Арктической зоны Российской Федерации. В условиях глобального потепления, деградации вечной мерзлоты и изменения сроков эксплуатации сезонных автозимников, традиционные логистические решения демонстрируют снижение эффективности [2, 10]. Чтобы рассмотреть варианты возврата к высоким показателям, в работе проанализированы современные подходы к формированию новых мультимодальных цепей поставок на территории Трансарктического транспортного коридора [7, 11]. Авторами обосновано применение инновационных вездеходов-амфибий как безальтернативного решения для наземной логистики. Также предложена интеграция технологий автономного вождения и искусственного интеллекта в технику высокой проходимости [1, 3, 4]. Описана ее адаптация к условиям отсутствия дорожной разметки, сложным климатическим условиям, геомагнитным аномалиям, искажающим сигналы GPS [3, 17]. Представлена экспериментальная модель оценки эффективности таких решений.*

Ключевые слова*: Арктическая зона России, Трансарктический транспортный коридор, техника высокой проходимости, вездеходы-амфибии, машинное обучение, логистическая оптимизация.*

Постановка задачи

Являясь обширной ресурсной базой и ключевым геополитическим рубежом, Арктическая зона Российской Федерации играет стратегическую роль в национальной экономике [7, 16]. От состояния ее транспортно-инженерной инфраструктуры напрямую зависит пространственное развитие Арктики [13]. При этом, как показывает многолетний опыт изучения автомобильной вездеходной техники в условиях Севера, сложившаяся за многие годы транспортная система региона зачастую сталкивается с настоящими вызовами как природы, так и технологий [6].

Сегодня главная проблема сводится к очаговому характеру освоения территорий, а также сложной структуре транспортной доступности и зависимости связанности отдельных районов от сезонных и погодных условий [11]. Так, например, восточная часть Арктики (Якутия и Чукотка) практически лишена круглогодичных сухопутных магистралей. Их транспортная логистика опирается на короткую летнюю речную навигацию и зимники.

Однако глобальные изменения климата ведут к таянию вечной мерзлоты, что сокращает период действия ледовых переправ и автозимников [10]. А тяжелые грузовые автомобили классической компоновки становятся менее проходимыми и, как следствие, менее рентабельными. Малая авиация, активно применяемая в данном регионе (такая,

как самолеты Ан-2 или вертолеты Ми-8), характеризуется высокой себестоимостью перевозок, а также ограничена погодными условиями [11].

Развитие и совершенствование системы логистики Трансарктического транспортного коридора как глобального транзитного узла и основы системы Северного завоза позволит решить проблему доставки грузов до арктических портов [7, 16]. И хотя все еще останется критическая проблема «последней мили», а именно доставка грузов от порта или торгово-логистических центров до изолированных поселений и промышленных объектов вглубь материка, разработка даже первого этапа доставки значительно сократит сроки и финансовые затраты [10, 11].

Решение данной задачи требует объединения таких блоков, как массовое внедрение инновационной техники сверхвысокой проходимости, в первую очередь вездеходов-амфибий на шинах сверхнизкого давления, и интеграция в представленную технику технологий автономного управления [4, 15].

Переходя к научной новизне, можно отметить то, что авторами разрабатывается оригинальная архитектура мультимодальных перевозок, которая подразумевает интеграцию амфибийной вездеходной техники, включая применение модифицированных алгоритмов автономного вождения. Личный вклад авторов состоит в математическом обосновании экономической эффективности вездеходов-амфибий через введение расчетного коэффициента сезонной доступности, адаптации расширенного фильтра Калмана (EKF SLAM) к условиям арктической сенсорной деградации, проведении первичного имитационного моделирования комплексной эффективности предлагаемых решений.

Анализ последних исследований и публикаций

Проблематика арктической логистики активно исследуется уже много лет. В современной науке данный вопрос рассмотрен с разных сторон. Авторы говорят о системе транспортного каркаса и макроэкономики, об использовании техники высокой проходимости, а также о применении технологий автономного вождения в экстремальных условиях.

В рамках разработки системы арктического транспортного каркаса и макроэкономики выделяются работы В.Н. Филиной [16], К.А. Митрюковой [11] и П.А. Иванкина [8]. Авторы определяют основные положения, посвященные арктическому транспортному каркасу, и изучают макроэкономическое влияние в регионе. Они сходятся во мнении, что интеграция арктического региона в единое экономическое пространство страны невозможна без соединения Северного морского пути с наземными магистралями и без создания мультимодальных узлов. В работах Т.С. Осьминой [13] подчеркивается, что развитие северных территорий носит очаговый характер. Сегодня требуется внедрение инновационных подходов, например, эстакадных конструкций магнитолевитационного транспорта и использование беспилотных систем для связи удаленных поселений.

При обсуждении вопросов использования техники высокой проходимости нужно ориентироваться на мнение И.В. Зырянова, П.И. Тарасова и М.Л. Хазина [7, 15]. В своих работах они обосновывают высокую экономическую эффективность наземного транспорта для развития арктического региона. Однако упор делается авторами на сочлененные карьерные автопоезда, что не всегда применимо на территории АЗРФ. Н.А. Филлипова и ее соавторы [17, 18] делают ставку на амфибийную вездеходную технику с использованием шин сверхнизкого давления. В их работах представлен глубокий сравнительный анализ применения инновационных вездеходов-амфибий, на примере машин «ЗВЕЗДА», в сравнении с тяжелыми грузовиками и авиацией. Их исследования

доказывают абсолютное превосходство вездеходной техники для обеспечения круглогодичного Северного завоза.

Технологии автономного вождения в экстремальных условиях – тема активно изучаемая зарубежными коллегами, так A. Rahim et al. [4] и D. Agarwal [1] осуществляют исследования технологических барьеров для беспилотного транспорта (AV) в условиях Арктики, сложных климатических условиях, при заснеженности дорог. D. Agarwal доказывает, что применяемые сегодня классические алгоритмы, которые привыкли ориентироваться на дорожную разметку для успешного беспилотного вождения в Арктике – абсолютно бесполезны. Автор настаивает на использовании сверточных нейронных сетей (CNN) и обучения с подкреплением (Actor-Critic), чтобы беспилотный автомобиль ориентировался по сугробам и краям расчищенной дороги, а не по классическим элементам автодорожной разметки. A. Rahim et al отмечают проблемы с сенсорной деградацией, а именно работы датчиков, лидаров и камер, во время снегопада, а также ошибки при работе GPS в высоких широтах, связанные с движением тектонических плит, геомагнитными бурями и иными внешними помехами. Невозможность применения этих технологий локализации повышает уязвимость системы [3, 4].

Проведенный авторами анализ существующих научных источников позволяет сделать выводы о том, что большинство существующих исследований рассматривают либо макроэкономическую сторону логистики, либо делают упор на программную часть применения беспилотного транспорта, иногда без ориентации на реальные физико-климатические ограничения в Арктике. В научной литературе еще не сформирован подход, который объединяет механическую базу высокой проходимости транспорта с применением программ искусственного интеллекта (ИИ). Данный пробел обуславливает необходимость проводимого исследования.

Цель работы

Целью данного исследования является разработка комплексной теоретической модели и проведение первичного имитационного моделирования развития арктических транспортных систем на территории Трансарктического транспортного коридора (ТТК), которая будет основываться на совершенствовании и развитии процессов перевозок. В качестве главного инструмента модернизации системы рассматривается круглогодичное применение амфибийных транспортных средств высокой проходимости и внедрение систем беспилотного автономного вождения, устойчивого к нестабильной работе сенсоров и экстремальным климатическим условиям северных регионов.

Основная часть

Как уже упоминалось ранее, ключевым вектором пространственного развития северных территорий на сегодняшний день является формирование Трансарктического транспортного коридора [7, 11]. ТТК – это комплексная мультимодальная система, призванная обеспечить сквозную логистику на протяжении всей российской Арктики. В отличие от фрагментированных локальных систем, ТТК предполагает создание непрерывных логистических цепей, которые будут связывать крупные транспортные узлы, промышленные кластеры по добыче полезных ископаемых и удаленные вглубь материков территории в единую сеть [10, 16].

Однако именно эффективное функционирование сухопутных частей данного коридора зачастую сталкивается с критическими ограничениями как климатического, так и инфраструктурного характера [2, 13]. В условиях деградации вечной мерзлоты, почв и сокращения сроков действия автозимников традиционная тяжелая грузовая автомобильная техника теряет свою рентабельность. В частности, полноприводные

автомобили 6х6 не могут применяться или применяются с большими ограничениями в подобных условиях [6]. Для периода межсезонья, включающего в себя осеннюю распутицу, весенний паводок, наземные грузоперевозки на обширных ответвлениях арктического транспортного коридора практически полностью останавливаются. В связи с чем грузы простаивают, дожидаясь оптимальных условий для транспортировки, либо возникает необходимость привлечения малой авиации. И то, и другое решение является экономически невыгодным [11].

Соответственно, с точки зрения организации работы транспортных систем, в первую очередь оптимизация процесса доставки грузов должна ориентироваться на минимизацию сроков простоя техники и грузов, обеспечивать круглогодичную поставку и исключать применение экономически затратных решений [15]. В формуле (1) рассматривается расчет целевой функции минимизации удельных логистических затрат на сухопутных сегментах коридора:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{n} *((E_i * L_i)/(Q_i * V_i^{avg} * K_{seas}^i)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где E_i – эксплуатационные затраты транспортного средства на i-м участке коридора (руб./ч);

L_i – протяженность сухопутного участка (км);

Q_i – полезная грузоподъемность (т);

V_i^{avg} – средняя техническая скорость движения по пересеченной местности (км/ч);

K_{seas}^i – коэффициент сезонной доступности маршрута ($K_{seas} \in (0,1]$), отражающий долю дней в году, пригодных для безопасной эксплуатации техники.

Для практического применения описанной формулы необходимо определить коэффициент сезонной доступности (K_{seas}^i) эмпирическим путем, а именно как отношение фактического количества суток безопасной эксплуатации трассы к общей продолжительности календарного года (365 дней). При этом срок безопасной эксплуатации берется согласно данным метеорологических наблюдений и региональных нормативов толщины льда.

В данном блоке важно проговорить об использовании вездеходов-амфибий на шинах сверхнизкого давления. Их применение радикально оптимизирует параметры знаменателя в ранее приведенной целевой функции [17]. Когда осуществляется переход от тяжелых грузовиков к технике сверхвысокой проходимости, также увеличивается и период активной эксплуатации сухопутного транспортного пути от минимальных значений в 100 дней до максимальных значений около 330 дней в год [6]. Такой скачок коэффициента сезонности позволяет полностью компенсировать меньшую грузоподъемность вездеходов-амфибий относительно других видов транспортных средств в Арктике. А также он превращает сезонные маршруты в полноценные постоянно действующие сухопутные ответвления Трансарктического транспортного коридора [16].

Также, чтобы оценить эффективность сверхпроходимого транспорта, необходимо, опираясь на агрегированные статистические данные реальной эксплуатации автомобильной и авиационной техники транспортными операторами арктических субъектов России, в период с 2020 по 2023 годы, провести технико-экономическое сравнение видов транспорта на маршрутах, например, Нижний Бестях – п.г.т. Черский, расстояние 2500 км [15].

Таблица 1

Сравнительный анализ эффективности транспортных средств в условиях АЗРФ [9]

Показатель	Тяжелый грузовик (6х6)	Вертолет (Ми-8)	Вездеход-амфибия (8х8)	Многозвенный автопоезд
Грузоподъемность, т	15	4	4	До 130
Средняя скорость, км/ч	13	220	45	25
Зависимость от сезона	Абсолютная (только зима)	Метеозависимость	Отсутствует (круглый год)	Низкая (подготовленные трассы)
Расход топлива	85 л/100 км	~ 800 кг/час	40 л/100км	~ 120л/100 км
Требования к инфраструктуре	Зимник	ВПП/Площадка	Отсутствует	Грунтовая насыпь
Удельная стоимость, руб/т*км)	5,78 (в сезон)	>150,00	10,20 (круглогодично)	3,15

Источник: [9].

Сравнительный анализ эффективности в таблице 1 показывает, что, несмотря на различие в метриках учета расхода топлива, килограммы в час для авиации и литры на 100 км. для наземной техники, приведение затрат к общему знаменателю через удельную стоимость перевозки (руб./т*км) доказывает, что вездеходы-амфибии, по сравнению с тяжелым грузовиком или вертолетом, являются более выгодным видом транспорта с экономической точки зрения [9]. У вездеходной техники более высокая средняя скорость на пересеченной местности, а также высокий уровень экономии топлива, что снижает удельную стоимость перевозки в перерасчете на круглогодичный цикл [18].

Безусловно, нельзя отказываться от мысли о том, что автопоезда более целесообразны для использования при вывозе материалов с промышленных карьеров. Тогда как амфибии лучше подходят для распределенной логистики на Трансарктическом транспортном коридоре [7].

На сегодняшний день существуют различные технологические решения для транспорта, применяемого в арктической зоне. Уже есть и механическая база, представленная гусеничными и пневмоколесными платформами низкого давления, но все еще не разработана интеллектуальная надстройка для Арктики. Модели и использования искусственного интеллекта в АЗРФ находятся в стадии зарождения и далеки от применяемых в комфортных условиях регионов. Так, например, классические SAE Level 4/5 автопилоты, чье обучение осуществляется в Калифорнии или европейских странах, неработоспособны в арктическом регионе [1, 3].

Технологические барьеры для беспилотной техники в Арктике связаны с рядом определенных факторов. В первую очередь, стоит обратить внимание на отсутствие визуальной разметки и однородного пейзажа. Визуальная разметка по снежному покрову не наносится, а его однообразие скрывает дороги, не позволяя создавать постоянные ориентиры на местности [4].

Следующий фактор – деградация сенсора. Налипание снега на камеры и лидары создает невозможность формирования 3D-облака точек для ориентации транспортного средства в пространстве. В метели возникает эффект так называемой «сенсорной

слепоты», когда отраженный от снежинки луч лидара воспринимается как дополнительное препятствие, создавая ошибки и помехи [3, 4].

И третий, наиболее значимый, блок – ошибки геопозиционирования. В высоких широтах GPS и ГЛОНАСС имеют плохую геометрию спутников. Также дополнительные помехи создаются полярным сиянием, в связи с ионосферными возмущениями, которые приводят к потере сигнала. А тектонические сдвиги плит делают старые HD-карты неактуальными. Так погрешность может доходить до 0,5 м [3].

Конечно, разрабатываются различные способы оптимизации искусственного интеллекта, развития алгоритмических решений. Как описывается в исследованиях, использование сверточных нейронных сетей в связке с алгоритмами обучения с подкреплением позволит в будущем переориентировать искусственный интеллект с поиска полос разметки на поиск краев уплотненного снега и теней от снежных бровок. Соответственно, ИИ будет ориентироваться на края дорожного полотна, а не на дополнительные точки пейзажа [12].

Сегодня прорабатывается математическая модель сенсорного слияния для арктического беспилотника [9]. Ее основная идея в том, что она должна отдавать приоритет радарам и низкочастотным акустическим датчикам, а не оптике. Уравнение достоверности позиции P(x) рассчитывается с использованием расширенного фильтра Калмана (EKF SLAM):

$$\mu_t = \bar{\mu}_t + K_t(z_t - H_t\bar{\mu}_t), \quad \Sigma_t = (I - K_tH_t)\,\bar{\Sigma}_t, \tag{2}$$

где в условиях пурги коэффициент доверия K_t (Kalman Gain) к оптическим датчикам (z_t^{opt}) искусственно занижается, а вес одометрии шасси вездехода и инерциальных систем (IMU) увеличивается. Для компенсации слепоты GPS внедряется технология V2X (Vehicle-to-Infrastructure) – использование умных вешек-транспондеров вдоль зимников, передающих радиосигналы автономному вездеходу [14].

В приведенной модели μ_t представляет собой обновленный вектор состояния системы, а именно координат и скорости вездехода, $\bar{\mu}_t$ – это предсказанный вектор состояния на основе встроенной одометрии, Kt же – коэффициент усиления (Kalman Gain), z_t – вектор фактических измерений от имеющихся датчиков, например радаров, лидаров или акустики, H_t – матрица наблюдений, которая связывает измерения с текущим состоянием, а Σ_t и $\bar{\Sigma}$ представляют обновленную и предсказанную ковариационную матрицу ошибок.

Предлагаемая экспериментальная модель

Безусловно, для подтверждения приведенных ранее тезисов необходимо проведение апробации и исследований в суровых арктических условиях. Однако ввиду высокой стоимости, логистической и организационной сложности проведения полномасштабных натурных испытаний техники в экстремальных условиях арктического региона авторами предложена прогностическая экспериментальная модель на базе программного имитационного моделирования. Такая модель представляет собой научно обоснованную методику апробации, которую можно реализовать на одном из следующих этапов исследований, при появлении опытных прототипов автономных амфибий и достаточного финансирования [9].

Подходя к содержанию эксперимента, отметим, что в стандартных условиях городской среды алгоритмы автономного вождения тестируются на распознавании пешеходов и разметки, в условиях арктического региона необходимо изучение трех специфических блоков проблем, которые не могут быть представлены в городской среде:

1.Устойчивость сенсорного комплекса и алгоритма машинного зрения к погодным условиям и деградации.

2.Энергоэффективность и физическая проходимость в условиях сверхнизких температур.

3.Качество, эффективность и согласованность кооперативного управления.

В рамках первого блока должно проводиться исследование того, как именно поведет себя алгоритм слияния данных при попадании транспортного средства в условия «белой мглы» и снегопада. При этом самое главное, что необходимо, – замерить процент потери пакетов данных от оптических камер и лидаров из-за обледенения и налипшего снега, а также оценить способность радаров миллиметрового диапазона и использование тепловизоров как основного инструмента для навигации [1, 3].

Второй блок предполагает изучение влияния температур ниже -45 С на деградацию аккумуляторных батарей, питающих вычислительные блоки ИИ (GPU-кластеры). Также необходимо оценить, насколько предиктивное управление тягой, которое осуществляется нейросетью, снизит пробуксовку шасси в глубоком рыхлом снегу в сравнении с человеком-водителем, знающим и умеющим управлять транспортным средством в сложных условиях [5, 9].

Завершающий блок будет посвящен изучению процесса передачи управления (handoff) от автопилота к человеку-водителю при возникновении нештатных ситуаций, например, при пересечении динамичных ледовых торосов на реках или провалах под лед, при потере контроля. Необходимо измерить задержку сигналов, скорость реакции и осознание искусственным интеллектом ситуаций, которые он не может решить самостоятельно. В суровых арктических условиях зачастую счет ведется на секунды. Также необходимо изучить издержки логистики при частичной потере связи, а именно отсутствие спутникового покрытия [2].

Дизайн предлагаемого эксперимента строится на нескольких ключевых факторах:

1.Маршрут (Полигон): Логистическое плечо «ТЛЦ Багатай – удаленный улус». Дистанция 300 км, пересеченная местность, тундра, русла замерзших рек. Метеорологические условия: зимний период, снежный покров 1.0-1.5 м., температура -45 С, метель, полярная ночь [6, 10].

2.Исследуемые объекты для сравнительного анализа:

– Объект А: Классический грузовой автомобиль 6х6 (пилотируемый человеком).

– Объект В: Вездеход-амфибия на шинах сверхнизкого давления (пилотируемый человеком).

– Объект С: Автономная вездеходная платформа (АВП) на базе амфибии, оснащенная модулем ИИ, радаром, IMU и тепловизионной стереокамерой.

3.Математический аппарат оценки: оценку эффективности предлагается осуществлять по комплексному критерию $E_{complex}$, который включает в себя время доставки t, затраты энергии/топлива F, показатель безопасности/удержания на трассе s и коэффициент автономности A (доля пути, которая пройдена без вмешательства водителя) [9].

$$E_{complex} = ((s*A)/(t*F))*10^3 \quad (3)$$

Проверка предлагаемых авторами алгоритмических подходов может осуществляться с помощью методов имитационного моделирования (Software-in-the-Loop) в программных средах CARLA и Vortex Studio [2, 3]. В рамках данного исследования основным инструментом была выбрана Vortex Studio. Для проведения имитационного моделирования была создана виртуальная сцена «Арктическая трасса» с настройками параметров критического снижения сцепления колес с рыхлым снегом, а также добавлена генерация визуальных помех: метели, плотных снежных частиц

(показатель 80%). Полученные в ходе моделирования данные представлены в таблице 2 в качестве результатов первичной верификации.

Таблица 2

Прогнозные показатели экспериментальной модели (целевые метрики)

Исследуемый параметр	Объект А	Объект В	Объект С
Время прохождения	24,5	7,5	8,2
Расход топлива, л	255	120	115 (за счет оптимизации тяги ИИ)
Коэффициент удержания на маршруте	0,85 (высок риск застревания)	0,95	0,98
Ожидаемая степень автономности	0	0	Не менее 85%
Комплексная эффективность	0,0	0,0	~ 0,9

Источник: составлено авторами

Ожидаемая интерпретация результатов

Согласно гипотезе авторов и полученным результатам моделирования, в ходе физического эксперимента ожидается незначительное снижение средней скорости автономной версии (для объекта С: расчетные 8,2 часа против 7,5 часов у человека). Такие показатели связаны с алгоритмическим ограничением скорости, которое активируется искусственным интеллектом в условиях около нулевой видимости [1, 4].

Однако данные показатели могут нивелироваться за счет того, что алгоритм предиктивного управления шасси позволит сгладить кривую расхода топлива, и мы получим экономию до 5% горючего за счет устранения микропробуксовок, которые происходят даже с живыми водителями в условиях усталости [5, 9]. Ожидаемая степень автономности в районе 85% докажет состоятельность предложенных нейросетевых моделей, опора которых будет связана с геометрией снежных бровок, а не разметки [1, 3, 4]. Оставшиеся 15% маршрута будут напрямую связаны с вмешательством человека-водителя и его включением в процесс управления транспортным средством. Такое соотношение организации самостоятельного управления и применения систем беспилотия может стать эталоном гибридной логистики АЗРФ [2, 9].

Выводы

По мнению авторов, успешное формирование Трансарктического транспортного коридора как основной логистической магистрали становится невозможным без обеспечения непрерывной транспортной доступности, особенно на его материковых сухопутных ответвлениях. На основании вышеописанного авторами делаются следующие выводы:

1.Опора сухопутных сегментов Трансарктического транспортного коридора на сезонные автозимники и традиционную тяжелую грузовую технику экономически и технологически неэффективна. Теоретический расчет целевой функции логистических затрат продемонстрировал, что внедрение всесезонных вездеходов-амфибий на шинах сверхнизкого давления позволит нивелировать климатические ограничения, и соответственно увеличить коэффициент сезонной доступности маршрутов практически в три раза. Все это компенсирует меньшую номинальную грузоподъемность машин за счет высокой оборачиваемости и круглогодичности системы грузоперевозок.

2.Необходим радикальный пересмотр классической архитектуры систем автономного вождения. Авторами доказано, что роботизация сухопутных логистических процессов в условиях Арктики возможна, но несколько иными способами, чем в других регионах мира. Вследствие отсутствия визуальной дорожной разметки и оптической непроницаемости среды, алгоритмы слияния данных должны отдавать приоритет радарам миллиметрового диапазона, тепловизионным комплексам и расширенной одометрии шасси с искусственным занижением коэффициента доверия к лидарам и камерам [14].

3.Следующим этапом дальнейшего исследования должен стать переход к натурным испытаниям. Разработанная прогностическая экспериментальная модель и первые результаты имитационного моделирования формируют необходимый научный фундамент для дальнейшей апробации. Практическая апробация автономных амфибийных платформ позволит верифицировать расчетные метрики комплексной эффективности, а также станет важнейшим шагом к созданию автоматизированных независимых от климата транспортных цепей Трансарктического транспортного коридора.

В завершение отметим, что разработка и серийное производство отечественных автономных платформ сверхвысокой проходимости является критически важным шагом для обеспечения технологического суверенитета и геополитического доминирования Российской Федерации в Арктике.

Список литературы

1.Agarwal, D. Designing Machine Learning Algorithm for Autonomous Driving in the Snow // Journal of Student Research. – 2023. – Vol. 12, No. 3.

2.IEEE Standard for Teleoperation and Remote Control in Autonomous Systems // IEEE Std 1905.1-2018. – New York : IEEE, 2018.

3.Ivan A. Rawashdeh, Bos M. Camera–Lidar sensor fusion for drivable area detection in winter weather using convolutional neural networks // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 12. – P. 1234–1245.

4.Rahim, A., Yuan, F., Barbady, J. A survey related to current technologies in Arctic region for autonomous driving // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2024. – Vol. 15, No. 11. – P. 5059–5077.

5.Smith, J., Johnson, K. Low-temperature performance of lithium-ion batteries in Arctic applications // Journal of Power Sources. – 2023. – Vol. 512. – Article 230456.

6.Sutton, R. S., Barto, A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. – Cambridge, MA : MIT Press, 2018. – 320 p.

7.Захаров, В. Н., Зырянов, И. В., Хазин, М. Л., Галкин, В. И. и др. Перспективные транспортные системы для развития Арктических и Северных территорий РФ // Горная промышленность. – 2016. – № 4 (128). – С. 52–54.

8.Иванкин, П. А. Арктический транспортный каркас России: проблемы и перспективы // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. – 2024. – № 2 (26). – С. 46–59.

9.Иванов, А. А., Петров, Б. Б. Прогностическая модель тестирования автономной техники в Арктике // Арктика: экология и экономика. – 2026. – № 2 (58). – С. 45–58. – DOI: 10.25283/2222-2790-2026-2-45-58.

10.Лёвина, А. И., Дубгорн, А. С., Фадеев, А. М., Калязина, С. Е. Цифровая и логистическая инфраструктуры Арктической зоны: современное состояние и перспективы развития // Арктика и Север. – 2024. – № 56. – С. 128–145.

11.Митрюкова, К. А. Транспортный каркас Арктической зоны Российской Федерации // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Т. 13, № 5. – С. 1371–1388.

12.Новости САФУ. В САФУ ведётся работа над интеллектуальной системой управления автономным вездеходом. – 2026. – URL: https://narfu.ru/hsitas/novosti/all/61074852/ (дата обращения: 26.07.2026).

13.Осьминина, Т. С. Подходы к проектированию инженерно-транспортных систем арктических регионов // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – № 1 (70). – С. 262–275.

14.Сидоров, В. В. Особенности разработки систем автономного управления для арктических условий // Вестник МАДИ. – 2025. – № 4. – С. 78–85.

15.Тарасов, П. И., Зырянов, И. В., Хазин, М. Л. Новые специализированные виды транспортных средств для Арктики // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 3. – С. 136–147.

16.Филина, В. Н. Транспортное обеспечение арктических территорий // Проблемы развития территории. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 24–43.

17.Филиппова, Н. А., Власов, В. М., Блохин, А. Н., Степанов, С. Ф. Модернизация арктической транспортно-технологической системы России: всесезонные инновационные решения и развитие Северного морского пути // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. – 2024. – № 2 (26). – С. 60–71.

18.Филиппова, Н. А., Власов, В. М., Блохин, А. Н., Степанов, С. Ф. Модернизация арктической транспортно-технологической системы России: всесезонные инновационные решения и развитие Северного морского пути // arctic2035.ru. – 2026. – URL: https://arctic2035.ru/n26-p60 (дата обращения: 26.07.2026).

References

1.Agarwal, D. Designing Machine Learning Algorithm for Autonomous Driving in the Snow // Journal of Student Research. – 2023. – Vol. 12, No. 3.

2.IEEE Standard for Teleoperation and Remote Control in Autonomous Systems // IEEE Std 1905.1-2018. – New York : IEEE, 2018.

3.Ivan A. Rawashdeh, Bos M. Camera–Lidar sensor fusion for drivable area detection in winter weather using convolutional neural networks // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 12. – P. 1234–1245.

4.Rahim, A., Yuan, F., Barbady, J. A survey related to current technologies in Arctic region for autonomous driving // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2024. – Vol. 15, No. 11. – P. 5059–5077.

5.Smith, J., Johnson, K. Low-temperature performance of lithium-ion batteries in Arctic applications // Journal of Power Sources. – 2023. – Vol. 512. – Article 230456.

6.Sutton, R. S., Barto, A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. – Cambridge, MA : MIT Press, 2018. – 320 p.

7.Zakharov, V. N., Zyryanov, I. V., Khazin, M. L., Galkin, V. I., et al. Promising Transport Systems for the Development of the Arctic and Northern Territories of the Russian Federation // Mining Industry. – 2016. – No. 4 (128). – Pp. 52–54.

8.Ivankin, P. A. The Arctic Transport Framework of Russia: Problems and Prospects // Arctic 2035: Current Issues, Problems, and Solutions. – 2024. – No. 2 (26). – Pp. 46–59.

9.Ivanov, A. A., Petrov, B. B. A Predictive Model for Testing Autonomous Equipment in the Arctic // Arctic: Ecology and Economics. – 2026. – No. 2 (58). – Pp. 45–58. – DOI: 10.25283/2222-2790-2026-2-45-58.

10.Lyovina, A. I., Dubgorn, A. S., Fadeev, A. M., Kalyazina, S. E. Digital and Logistic Infrastructure of the Arctic Zone: Current State and Development Prospects // Arctic and North. – 2024. – No. 56. – Pp. 128–145.

11.Mityukova, K. A. Transport Framework of the Arctic Zone of the Russian Federation // Economics, Entrepreneurship, and Law. – 2023. – Vol. 13, No. 5. – Pp. 1371–1388.

12.News from NArFU. NArFU is working on an intelligent control system for an autonomous all-terrain vehicle. – 2026. – URL: https://narfu.ru/hsitas/novosti/all/61074852/ (date of access: 26.07.2026).

13.Osminina, T. S. Approaches to the Design of Engineering and Transport Systems in the Arctic Regions // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – No. 1 (70). – Pp. 262–275.

14.Sidorov, V. V. Features of the development of autonomous control systems for Arctic conditions // Bulletin of MADI, 2025, No. 4, pp. 78-85.

15.Tarasov, P. I., Zyryanov, I. V., Khazin, M. L. New specialized types of vehicles for the Arctic // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2018. – No. 3. – Pp. 136–147.

16.Filina, V. N. Transport Support for the Arctic Territories // Problems of Territory Development. – 2021. – Vol. 25, No. 2. – Pp. 24–43.

17.Filippova, N. A., Vlasov, V. M., Blokhin, A. N., and Stepanov, S. F. Modernization of Russia's Arctic Transport and Technology System: All-Season Innovative Solutions and Development of the Northern Sea Route // Arctic 2035: Current Issues, Problems, and Solutions. – 2024. – No. 2 (26). – Pp. 60–71.

18.Filippova, N. A., Vlasov, V. M., Blokhin, A. N., and Stepanov, S. F. Modernization of Russia's Arctic Transport and Technology System: All-Season Innovative Solutions and Development of the Northern Sea Route // arctic

Smirnov A.S., Filippova N.A., Melnik A.A., Bur A.N.

DEVELOPMENT OF ARCTIC TRANSPORT SYSTEMS BASED ON OPTIMIZATION OF HIGH-AWAY VEHICLES AND AUTONOMY TECHNOLOGIES

Abstract. *This article is devoted to justifying the ways of changing and developing transport systems of the Arctic zone of the Russian Federation. In the conditions of global warming, permafrost degradation and changes in the terms of operation of seasonal winter roads, traditional logistics solutions demonstrate a decrease in efficiency. To consider options for returning to high indicators, the paper analyzes modern approaches to the formation of new multimodal supply chains in the territory of the Trans-Arctic transport corridor. The authors substantiate the use of innovative amphibious all-terrain vehicles as an alternative solution for land logistics. The article also proposes the integration of autonomous driving and artificial intelligence technologies into high-mobility vehicles. It adapts these technologies to the complex climatic conditions and geomagnetic anomalies that distort GPS signals. An experimental model is presented to assess the effectiveness of such solutions.*

Keywords*: Arctic zone of Russia, Trans-Arctic transport corridor, high-mobility vehicles, amphibious all-terrain vehicles, machine learning, and logistics optimization.*

Сведения об авторах	Information about the authors:
Смирнов Алексей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, первый заместитель начальника Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. Российская Федерация, г. Санкт-Петербург. E-mail: sas@igps.ru	**Smirnov Alexey Sergeevich** Doctor of Technical Sciences, Professor, First Deputy Head of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Russian Federation, St. Petersburg. E-mail: sas@igps.ru
Филиппова Надежда Анатольевна, доктор технических наук, профессор, кафедры «Автомобильные перевозки» и «Транспортная телематика», Руководитель инновационно-исследовательского проекта «Развитие мультимодальной мобильности в условиях Арктической зоны России», Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), заместитель генерального директора по науке Якутского научного центра СО РАН, профессор кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы» ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (г. Якутск). Российская Федерация, г. Москва. E-mail: umen@bk.ru	**Filippova Nadezhda Anatolyevna** Doctor of Technical Sciences, professor, Departments of "Automobile Transportation" and "Transport Telematics", Head of the innovation and research project "Development of multimodal mobility in the Arctic zone of Russia", Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI); Deputy Director General for Science of the Yakutsk Scientific Center SB RAS; Professor of the Department «Highways and airfields of the Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov» (Yakutsk). Russian Federation, Moscow, Yakutsk. E-mail: umen@bk.ru
Мельник Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (по научной работе). Российская Федерация, г. Санкт-Петербург. E-mail: melnik@igps.ru	**Melnik Anton Anatolyevich** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia (for Research). Russian Federation, St. Petersburg. E-mail: melnik@igps.ru
Бур Алина Николаевна преподаватель-методист отделения информатизации учебного процесса отдела технологий открытого образования института заочного и дистанционного обучения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Российская Федерация, Санкт-Петербург. E-mail: anburan22@gmail.com	**Bur Alina Nikolaevna** Teacher-Methodologist of the Department of Informatization of the Educational Process of the Department of Open Education Technologies of the Institute of Correspondence and Distance Learning, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russian Federation, St. Petersburg. E-mail: anburan22@gmail.com

УДК 656.13

Фиалкин В.В., Зырянов В.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ПО КРИТЕРИЮ ЗАДАННОГО ПЕРИОДА УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ТЕРМИНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. *В статье разработан аналитический подход к определению допустимого режима функционирования контрольно-пропускного пункта терминального комплекса по критерию заданного периода устойчивого функционирования внешней улично-дорожной сети. В отличие от распространённых постановок, ориентированных на моделирование очередей, оптимизацию назначения временных окон или имитационный анализ работы ворот терминалов, предложенная постановка позволяет непосредственно рассчитывать допустимую интенсивность входящего потока, требуемую ёмкость накопительной площадки, предельное время обработки транспортного средства и минимально необходимое число каналов обслуживания. На основе базовой зависимости периода устойчивого функционирования получены производные аналитические выражения, введены показатели резерва устойчивости, дефицита устойчивости и коэффициента устойчивости, а также выполнен локальный анализ чувствительности по входящей интенсивности, времени обработки и накопительной ёмкости. Расчётная апробация выполнена для трёх грузовых районов портового комплекса. Дополнительно предложены графическая и алгоритмическая интерпретации области допустимых и недопустимых режимов. Практическая значимость результатов состоит в возможности использовать предложенный подход для оперативного регулирования прибытия транспорта, совершенствования технологии пропуска на КПП и обоснования инфраструктурных решений в зоне влияния терминального комплекса.*

Ключевые слова: *терминальный комплекс, внешняя улично-дорожная сеть, устойчивость функционирования, контрольно-пропускной пункт, интенсивность входящего потока, пропускная способность, резерв устойчивости, многоканальная система обслуживания.*

Постановка задачи

Функционирование терминальных комплексов в современных условиях характеризуется высокой неравномерностью прибытия грузового транспорта, концентрацией входящих потоков в ограниченные интервалы времени и возрастающей чувствительностью прилегающей улично-дорожной сети (УДС) к локальным ограничениям пропускной способности. Наиболее уязвимым элементом в данной системе является контрольно-пропускной пункт, где несоответствие между

интенсивностью прибытия транспортных средств и возможностями их обслуживания приводит к формированию очереди. При недостаточной ёмкости накопительной площадки очередь выходит за пределы терминального комплекса и начинает воздействовать на внешнюю УДС, вызывая снижение скорости движения, рост задержек, увеличение длины заторовых образований и ухудшение устойчивости функционирования примыкающих участков.

Анализ современных исследований показывает, что основное внимание уделяется трём направлениям. Первое направление связано с системами назначения временных окон прибытия грузовых автомобилей, совместным планированием прибытия и оптимизацией режимов обслуживания на воротах терминалов. Второе направление ориентировано на имитационное моделирование движения в зоне терминалов и на оценку влияния портово-городских взаимодействий на транспортную сеть. Третье направление представлено работами по устойчивости и живучести транспортных сетей в условиях возмущений. Указанные исследования формируют развитую методическую базу для анализа внутренних терминальных процессов, управления прибытиями и оценки сетевой устойчивости. Однако они, как правило, либо ориентированы на внутренние эксплуатационные показатели терминала, либо требуют трудоёмкого имитационного расчёта, либо рассматривают устойчивость транспортной сети на укрупнённом уровне без прямой увязки с параметрами функционирования контрольно-пропускного пункта.

Тем самым возникает методическое противоречие. С одной стороны, для терминальных систем разработаны детальные модели обслуживания, накопления, назначения временных окон и имитационного анализа транспортных процессов. С другой стороны, в задачах организации дорожного движения и оперативного управления состоянием внешней УДС требуется компактный аналитический инструмент, позволяющий не только фиксировать последствия перегрузки, но и заранее определять границу допустимого режима функционирования системы. Иными словами, лицу, принимающему решение, необходимо знать, какую интенсивность прибытия допускает система при заданных значениях времени обработки транспортного средства, числа каналов обслуживания и ёмкости накопительной площадки, чтобы в течение установленного периода времени не допустить переноса очереди на внешнюю УДС.

Незакрытая методическая проблема состоит в отсутствии аналитической постановки, непосредственно связывающей параметры функционирования контрольно-пропускного пункта и накопительной зоны с требуемым периодом устойчивого функционирования внешней УДС. В существующих публикациях недостаточно разработан именно тот уровень описания, который позволял бы переходить от моделирования и диагностики к нормативному определению допустимого режима работы терминального комплекса в интересах сохранения устойчивого состояния прилегающей дорожной сети.

Исходя из этого, решаемая задача заключается в установлении аналитической зависимости между интенсивностью входящего потока, временем обработки транспортного средства на контрольно-пропускном пункте, числом каналов обслуживания, ёмкостью накопительной площадки и периодом устойчивого функционирования внешней УДС.

Следовательно, постановка задачи ориентирована не на последующее описание уже возникшей перегрузки, а на предварительное определение допустимых параметров функционирования терминального комплекса по критерию заданного периода устойчивого функционирования внешней улично-дорожной сети. Именно такое расширение аналитической постановки позволяет устранить методический разрыв

между моделями терминального обслуживания и задачами обеспечения устойчивого состояния прилегающей УДС.

Анализ последних исследований

Проблематика влияния терминального комплекса на состояние прилегающей внешней улично-дорожной сети и вопросы управления движением в мультимодальных транспортных узлах рассматриваются в работах [1], [2]. В указанных исследованиях показано, что режим прибытия транспортных средств, организация пропуска на въезде и параметры работы терминального комплекса непосредственно отражаются на состоянии примыкающей дорожной сети. Вместе с тем в данных публикациях задача определения допустимой интенсивности прибытия по критерию устойчивого функционирования внешней УДС в явном аналитическом виде не ставится.

Значительный массив современных исследований посвящён системам назначения временных окон прибытия грузовых автомобилей. Обобщающий обзор соответствующих моделей, ограничений и направлений их развития представлен в [3]. Для корректного описания процессов накопления очереди и изменения состояния системы во времени существенное значение имеют результаты по нестационарным системам массового обслуживания [4]. В работе [5] рассматривается совместное планирование прибытия автомобилей и работы терминала, в [6] предложены методы, основанные на анализе данных, для сокращения времени оборота внешних грузовых автомобилей, а в [7] сформулирована новая постановка системы назначения временных окон прибытия. В исследовании [8] раскрыты возможности имитационного моделирования движения транспортных средств в контейнерных терминалах, а в [9] рассмотрена задача планирования прибытия автомобилей для повышения эффективности управления контейнерными потоками.

Отдельное направление образуют исследования, посвящённые моделированию терминальных и портово-городских взаимодействий. В работе [10] предложена микромодель для оценки влияния входящих транспортных потоков контейнерного терминала, расположенного вблизи городского центра, на условия движения. В [11] проанализировано воздействие дорожного движения, формируемого портовыми территориями, на городскую транспортную сеть. В работе [12] рассматривается взаимосвязь системы «порт — город» и структуры городской дорожной сети. Эти исследования позволяют детально учитывать пространственно-временные эффекты перегрузки, однако их практическое применение, как правило, связано с подготовкой большого объёма исходных данных и выполнением вычислительно трудоёмких имитационных расчётов.

Вопросы устойчивости и живучести транспортных сетей в условиях возмущений рассматриваются в работах [13], [14]. В [13] выполнен систематический обзор методов оценки и повышения устойчивости интегрированных городских транспортных сетей, а в [14] предложен новый подход к оценке живучести транспортной сети. Данные исследования формируют важный теоретический контекст, однако не устанавливают прямой аналитической связи между параметрами функционирования контрольно-пропускного пункта терминального комплекса и допустимым режимом работы прилегающей внешней улично-дорожной сети.

Дополнительное методическое значение для рассматриваемой задачи имеют публикации [15], [16]. В работе [15] представлены статистические методы оценки эффективности транспортной инфраструктуры, а в [16] выполнен сравнительный анализ топологий и алгоритмов маршрутизации в терминальных логистических сетях. Эти исследования расширяют инструментарий анализа инфраструктурных и сетевых характеристик, однако также не содержат критерия допустимой входящей

интенсивности, одновременно учитывающего время обработки транспортных средств на КПП, число каналов обслуживания и ёмкость накопительной площадки.

Таким образом, выполненный анализ показывает, что существующие исследования ориентированы либо на организацию прибытия транспортных средств и совершенствование внутренних операций терминала, либо на детальное имитационное описание транспортных процессов, либо на общую оценку устойчивости транспортных сетей. При этом в опубликованных работах отсутствует компактная аналитическая постановка, позволяющая по заданному периоду устойчивого функционирования внешней улично-дорожной сети определить допустимую интенсивность прибытия, требуемую ёмкость накопительной площадки, предельное время обработки транспортного средства и минимально необходимое число каналов обслуживания.

Результаты анализа современных исследований и незакрытая методическая проблема обобщены в таблице 1.

Таблица 1

Современные направления исследований и незакрытая методическая проблема

Направление исследований	Представительные источники	Типичный результат	Незакрытая методическая проблема для внешней УДС
Влияние терминальных комплексов на внешнюю улично-дорожную сеть и управление движением в мультимодальных узлах	[1], [2]	Установлена связь между режимом работы терминального комплекса и условиями движения на прилегающей сети	Не получен прямой аналитический критерий допустимой интенсивности прибытия по условию устойчивого функционирования внешней УДС
Системы назначения временных окон прибытия грузовых автомобилей и совместное планирование прибытия	[3], [5], [6], [7], [9]	Снижение перегрузки ворот терминала, времени ожидания и времени оборота автомобилей	Не определяется допустимый режим функционирования внешней УДС через период её устойчивости
Нестационарные системы массового обслуживания	[4]	Классификация методов анализа систем обслуживания с переменными во времени параметрами	Отсутствует прикладная аналитическая постановка, непосредственно связывающая параметры КПП и состояние внешней дорожной сети
Имитационное моделирование движения в терминалах и портово-городских взаимодействий	[8], [10], [11], [12]	Детализация конфигурации ворот, внутренних потоков и воздействия портовой деятельности на городскую сеть	Высокая вычислительная трудоёмкость и ограниченная пригодность для оперативного нормативного расчёта
Устойчивость и живучесть транспортных сетей	[13], [14]	Развитие методов оценки устойчивости транспортных сетей при возмущениях	Недостаточная увязка показателей устойчивости с параметрами функционирования КПП терминального комплекса
Оценка транспортной инфраструктуры и маршрутизации в терминальных логистических сетях	[15], [16]	Методы статистической оценки инфраструктуры и выбора сетевой конфигурации	Нет критерия допустимой входящей интенсивности с учётом времени обработки, числа каналов обслуживания и ёмкости накопления

Цель работы

Цель исследования состоит в разработке аналитической методики определения допустимой интенсивности входящего потока транспортных средств по критерию заданного периода устойчивого функционирования внешней УДС терминального комплекса.

Научная новизна исследования заключается в получении аналитических условий определения допустимой интенсивности входящего потока, требуемой ёмкости накопительной площадки, предельного времени обработки транспортного средства на КПП и минимально необходимого числа каналов обслуживания на основе критерия заданного периода устойчивого функционирования внешней УДС. Дополнительно вводятся показатели резерва устойчивости, дефицита устойчивости и коэффициента устойчивости, а также выполняется локальный анализ чувствительности полученной зависимости.

На рисунке 1 представлена функциональная схема взаимодействия терминального комплекса и внешней УДС, которая определяет место контрольно-пропускного пункта и накопительной зоны в общей логике формирования управляющих воздействий.

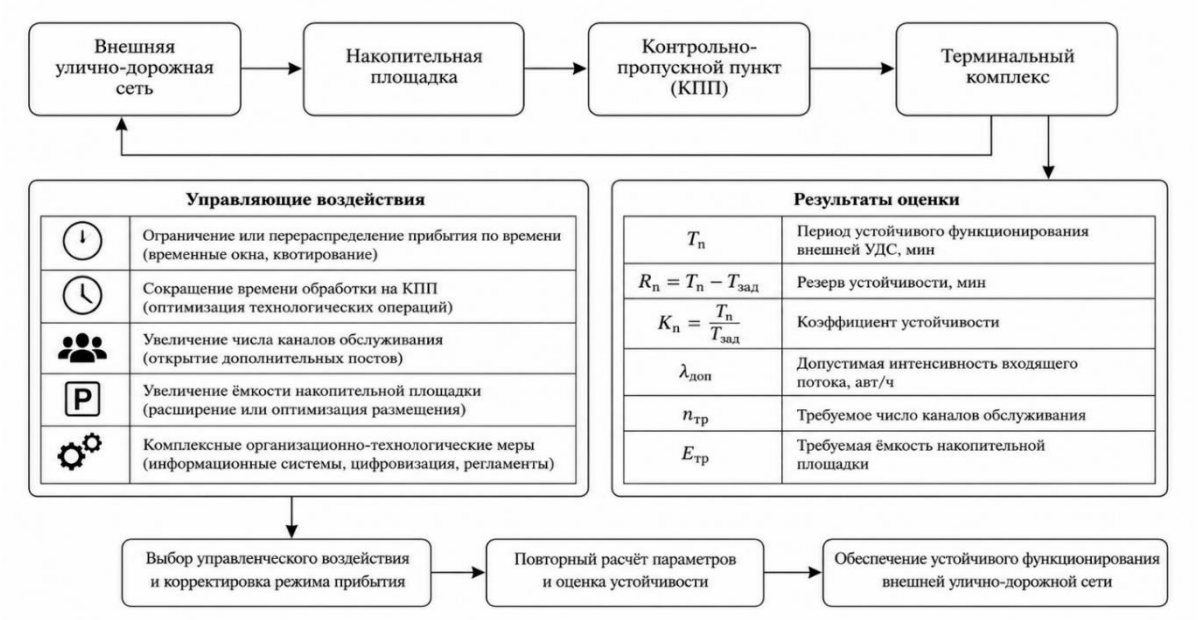


Рис. 1. Функциональная схема взаимодействия внешней УДС, накопительной площадки, КПП и терминального комплекса

Основная часть

В качестве исходной аналитической зависимости используется выражение для периода устойчивого функционирования внешней улично-дорожной сети при КПП с n каналами обслуживания. Период устойчивого функционирования рассматривается как время, в течение которого накопление очереди перед въездом не приводит к переносу неблагоприятных последствий на примыкающие участки внешней УДС.

$$T_n = \frac{E_{\text{нп}}}{\max(a_n, b_n - c_n/t_{\text{кпп}} + d_n\lambda)} \quad (1)$$

где T_n — период устойчивого функционирования внешней УДС, мин; $E_{\text{нп}}$ — ёмкость накопительной площадки, авт.; $t_{\text{кпп}}$ — среднее время обработки транспортного средства на КПП, с; λ — интенсивность прибытия транспортных средств на КПП, авт./ч; a_n, b_n, c_n, d_n — параметры зависимости для системы с n каналами обслуживания.

Коэффициенты $a_n,\ \ b_n,\ \ c_n,\ \ d_n$ являются параметрами расчетной зависимости и определяются отдельно для каждого числа действующих каналов обслуживания n. Их значения устанавливаются по данным наблюдений, включающим интенсивность прибытия λ_{i}, среднее время обработки $t_{\text{кпп, i}}$, фактическую накопительную емкость $E_{\text{нп, i}}$ и период устойчивого функционирования $T_{n,i}$. Для определения коэффициентов наблюдаемые значения преобразуются к величине $y_i = \frac{E_{\text{нп},i}}{T_{n,i}}$. Далее параметры рассчитываются методом наименьших квадратов из условия:

$$a_n, b_n, c_n, d_n = \arg\min \sum_{i=1}^{m} \left[y_i - \max\left(a_n, b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп},i}} + d_n \lambda_i \right) \right]^2 . \qquad (2)$$

При определении коэффициентов принимаются ограничения $a_n \geq 0,\ c_n > 0,\ d_n > 0$. Они обеспечивают соответствие зависимости физическому смыслу процесса: скорость накопления очереди не принимает отрицательных значений, увеличение времени обработки сокращает период устойчивого функционирования, а рост интенсивности прибытия приводит к его уменьшению. Качество полученной зависимости оценивается по среднеквадратической ошибке, коэффициенту детерминации и ошибке расчета на наблюдениях, не использованных при определении коэффициентов. Таким образом, параметры $a_n,\ \ b_n,\ \ c_n,\ \ d_n$ отражают особенности работы конкретного контрольно-пропускного пункта при заданном числе каналов обслуживания.

Для перехода от оценочной постановки к нормативной вводится заданный период устойчивого функционирования $T_{\text{зад}}$. Тогда условие допустимости режима записывается следующим образом:

$$T_n \geq T_{\text{зад}} \qquad (3)$$

Подстановка выражения (1) в неравенство (3) даёт общее ограничение на область допустимых режимов:

$$\max\left(a_n,\ b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n \lambda \right) \leq \frac{E_{\text{нп}}}{T_{\text{зад}}} \qquad (4)$$

Из (3) следует первое условие реализуемости требуемого режима:

$$a_n \leq \frac{E_{\text{нп}}}{T_{\text{зад}}} \qquad (5)$$

Если условие (4) не выполняется, то заданный горизонт устойчивости не обеспечивается даже при минимизации входящей интенсивности, а значит, требуются структурные изменения системы.

Активная часть ограничения для определения допустимых параметров режима имеет вид:

$$b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n \lambda \leq \frac{E_{\text{нп}}}{T_{\text{зад}}} \qquad (6)$$

Отсюда допустимая интенсивность входящего потока определяется как

$$\lambda_{\text{доп},n} = \frac{\frac{E_{\text{нп}}}{T_{\text{зад}}} - b_n + \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}}}{d_n} \qquad (7)$$

Требуемая ёмкость накопительной площадки для обеспечения заданного периода устойчивости записывается в виде

$$E_{\text{нп,тр},n} = T_{\text{зад}} \cdot \max\left(a_n,\ b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n \lambda \right) \qquad (8)$$

Предельное допустимое время обработки транспортного средства на КПП находится из условия

$$t_{\text{кпп,тр},n} \leq \frac{c_n}{b_n + d_n \lambda - \frac{E_{\text{нп}}}{T_{\text{зад}}}},\ \text{при}\ \ b_n + d_n \lambda > \frac{E_{\text{нп}}}{T_{\text{зад}}} \qquad (9)$$

Минимально необходимое число каналов обслуживания определяется по формуле

$$n_{\text{тр}} = \min\left\{ n: \frac{E_{\text{нп}}}{\max\left(a_n,\, b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n\lambda\right)} \geq T_{\text{зад}} \right\} \quad (10)$$

Для количественной интерпретации режима работы вводятся показатели резерва устойчивости, дефицита устойчивости и коэффициента устойчивости:

$$R_n = T_n - T_{\text{зад}} \quad (11)$$

$$D_n = \max\left(0,\, T_{\text{зад}} - T_n\right) \quad (12)$$

$$K_n = \frac{T_n}{T_{\text{зад}}} \quad (13)$$

Аналитическая интерпретация введённых показателей приведена в таблице 2.

Таблица 2

Аналитическая интерпретация производных показателей

Показатель	Расчётное выражение	Содержательная интерпретация
T_n	(1)	Период устойчивого функционирования внешней УДС при заданных параметрах КПП и накопительной зоны
$\lambda_{\text{доп},n}$	(7)	Максимально допустимая интенсивность прибытия при заданном горизонте устойчивости
$E_{\text{нп,тр},n}$	(8)	Минимально требуемая накопительная ёмкость
$t_{\text{кпп,тр},n}$	(9)	Предельное допустимое время обработки транспортного средства на КПП
$n_{\text{тр}}$	(10)	Минимальное число каналов обслуживания, обеспечивающее $T_{\text{зад}}$
R_n	(11)	Резерв устойчивости: запас времени относительно $T_{\text{зад}}$
D_n	(12)	Дефицит устойчивости: нехватка времени до достижения $T_{\text{зад}}$
K_n	(13)	Относительный критерий допустимости режима; при $K_n \geq 1$ режим допустим

В активной ветви зависимости (1), когда величина $b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n\lambda$ является определяющей, возможно получение локальных производных, характеризующих чувствительность периода устойчивого функционирования к изменению параметров режима. Соответствующие выражения записываются следующим образом:

$$\frac{\partial T_n}{\partial \lambda} = -\frac{E_{\text{нп}}\, d_n}{\left(b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n\lambda\right)^2} < 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial t_{\text{кпп}}} = -\frac{E_{\text{нп}}\, c_n}{t_{\text{кпп}}^2\left(b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n\lambda\right)^2} < 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial E_{\text{нп}}} = \frac{1}{b_n - \frac{c_n}{t_{\text{кпп}}} + d_n\lambda} > 0 \quad (16)$$

Знаки производных имеют важный прикладной смысл. Увеличение входящей интенсивности и времени обработки уменьшает период устойчивого функционирования, тогда как увеличение накопительной ёмкости действует в противоположном направлении. Следовательно, управление режимом функционирования системы должно быть ориентировано либо на снижение λ и $t_{\text{кпп}}$, либо на увеличение $E_{\text{нп}}$ и числа каналов обслуживания n.

Алгоритмическая интерпретация предложенной методики приведена на рисунке 2.

Расчётная апробация выполнена на примере трёх грузовых районов портового комплекса г. Ростова-на-Дону, характеризующихся различными интервалами фактической интенсивности прибытия транспортных средств и различной продолжительностью устойчивого функционирования внешней УДС. Данные интервальные значения использованы как эмпирическая основа для проверки содержательной применимости полученных аналитических выражений.

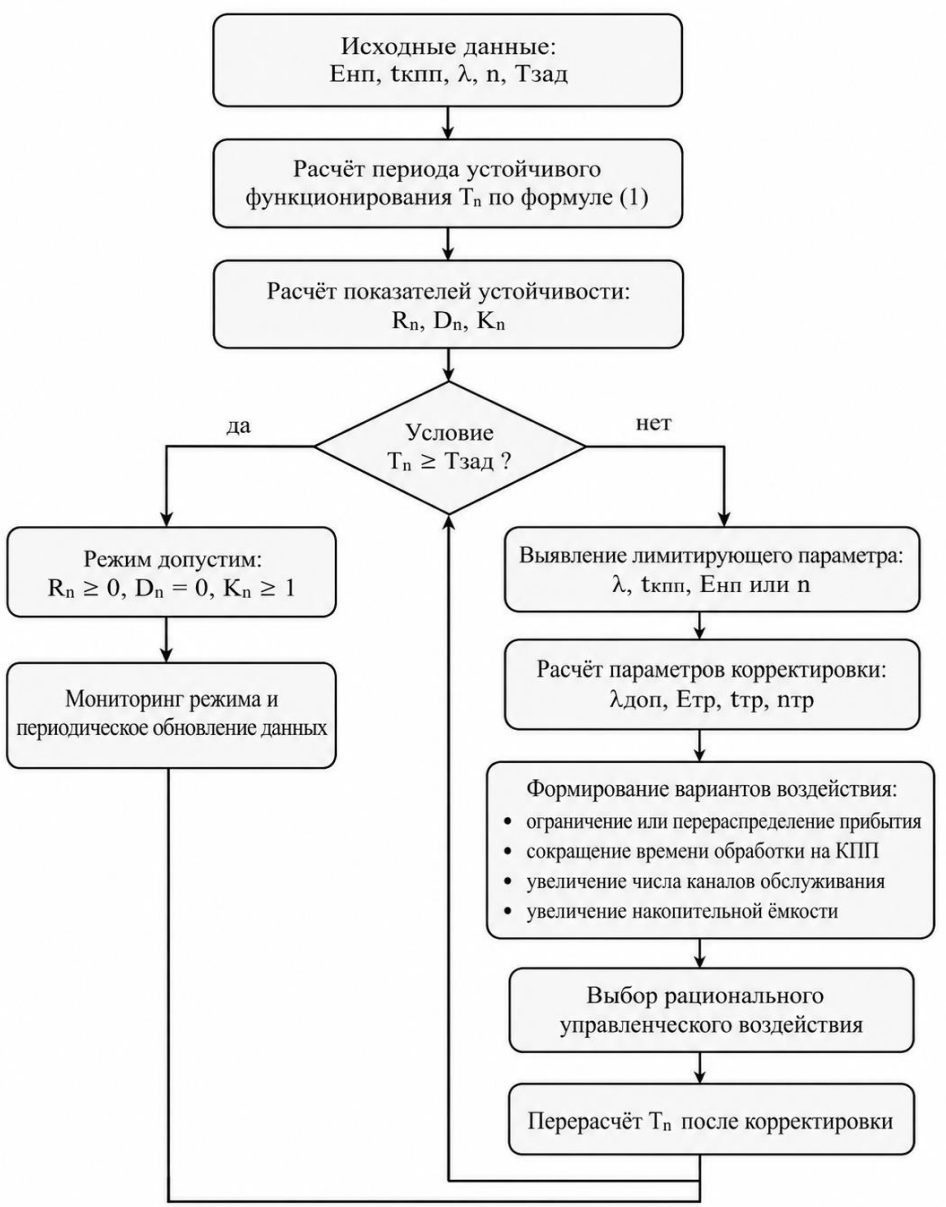


Рис. 2. Алгоритм определения допустимого режима функционирования КПП по критерию заданного периода устойчивости внешней УДС

Интервальные характеристики режимов функционирования грузовых районов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Интервальные характеристики режимов функционирования грузовых районов портового комплекса г. Ростова-на-Дону

Грузовой район порта	Норма максимальной интенсивности входящего потока, авт./ч	Текущая интенсивность входящего потока, авт./ч	Период устойчивого функционирования прилегающей УДС, мин
Первый, ул. Береговая, 30	10	1–3	постоянная устойчивость
Второй, ул. Левобережная, 17	10	12–30	24–6
Четвёртый, ул. 1-я Луговая, 42	10	6–15	1145–20

Для расчётной интерпретации принимается $T_{зад}$= 60 мин. Выбор такого горизонта соответствует минимальному временному интервалу, в пределах которого оператор терминального комплекса может реализовать корректирующие действия без переноса негативных последствий на внешнюю УДС. Тогда по формулам (11)–(13) получаются интервальные оценки резерва устойчивости УДС и коэффициента устойчивости УДС.

Оценка режимов функционирования при $T_{зад}$ = 60 мин представлена в таблице 4.

Таблица 4

Оценка режимов функционирования при $T_{зад}$ = 60 мин

Грузовой район порта	T_n, мин	$R_n = T_n - 60$, мин	$K_n = \frac{T_n}{60}$	Оценка режима
Первый, ул. Береговая, 30	постоянная устойчивость	$R_n > 0$	$K_n > 1$	допустимый
Второй, ул. Левобережная, 17	24–6	от −36 до −54	0,40–0,10	недопустимый
Четвёртый, ул. 1-я Луговая, 42	1145–20	от 1085 до −40	19,08–0,33	режимно-зависимый

Анализ результатов показывает, что в зоне первого грузового района существующие условия работы КПП и накопительной площадки позволяют внешней УДС сохранять устойчивое состояние при всех рассмотренных значениях интенсивности прибытия транспорта.

Для иллюстрации порядка расчета рассмотрим фиксированный режим, соответствующий наиболее напряженному варианту из представленных для четвертого грузового района. При интенсивности входящего потока λ=15 авт./ч период устойчивого функционирования составляет T_n=20 мин. При заданном нормативном периоде $T_{зад}$ = 60 мин резерв устойчивости определяется как:

$$R_n = T_n - T_{зад} = 20 - 60 = -40 \text{ мин}$$

Отрицательное значение резерва указывает на отсутствие необходимого запаса устойчивости. Дефицит устойчивости составляет:

$$D_n = \max(0, T_{зад} - T_n) = \max(0{,}60 - 20) = 40 \text{ мин}$$

Коэффициент устойчивости равен:

$$K_n = \frac{T_n}{T_{зад}} = \frac{20}{60} = 0{,}33$$

Полученное значение $K_n < 1$ показывает, что при заданных условиях период устойчивого функционирования меньше требуемого значения. Для достижения установленного периода устойчивости необходимо увеличить значение T_n не менее чем на 40 мин за счет изменения параметров системы, влияющих на пропускную способность и организацию обслуживания.

Иная ситуация складывается в зоне второго грузового района. Здесь даже наилучшее расчетное значение периода устойчивого функционирования составляет не более 24 мин, что существенно меньше принятого горизонта $T_{зад}$ = 60 мин. Это означает, что без корректирующих мер внешняя УДС быстро переходит в недопустимый режим. Для стабилизации состояния необходимо снижать интенсивность прибытия, сокращать время обработки транспортных средств на КПП либо увеличивать обслуживающие возможности въезда.

В зоне четвёртого грузового района состояние внешней УДС зависит от уровня входящей интенсивности. При меньших значениях интенсивности сохраняется значительный запас устойчивости, однако по мере роста прибытия транспортных средств период устойчивого функционирования сокращается до 20 мин. Следовательно, именно для этого района особенно важным становится определение предельной

интенсивности, при превышении которой система переходит из допустимого режима в недопустимый.

Графическое представление интервалов периода устойчивого функционирования УДС и соответствующего резерва устойчивости УДС при $T_{зад}$ = 60 мин приведено на рисунках 3 и 4.

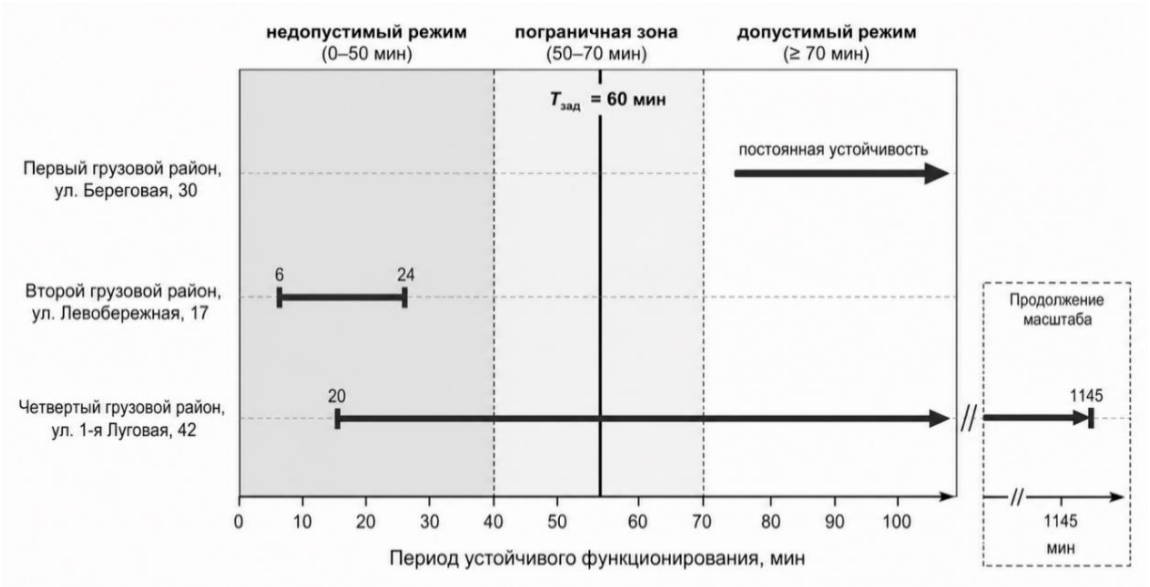


Рис. 3. Интервалы периода устойчивого функционирования внешней УДС в зоне влияния грузовых районов порта

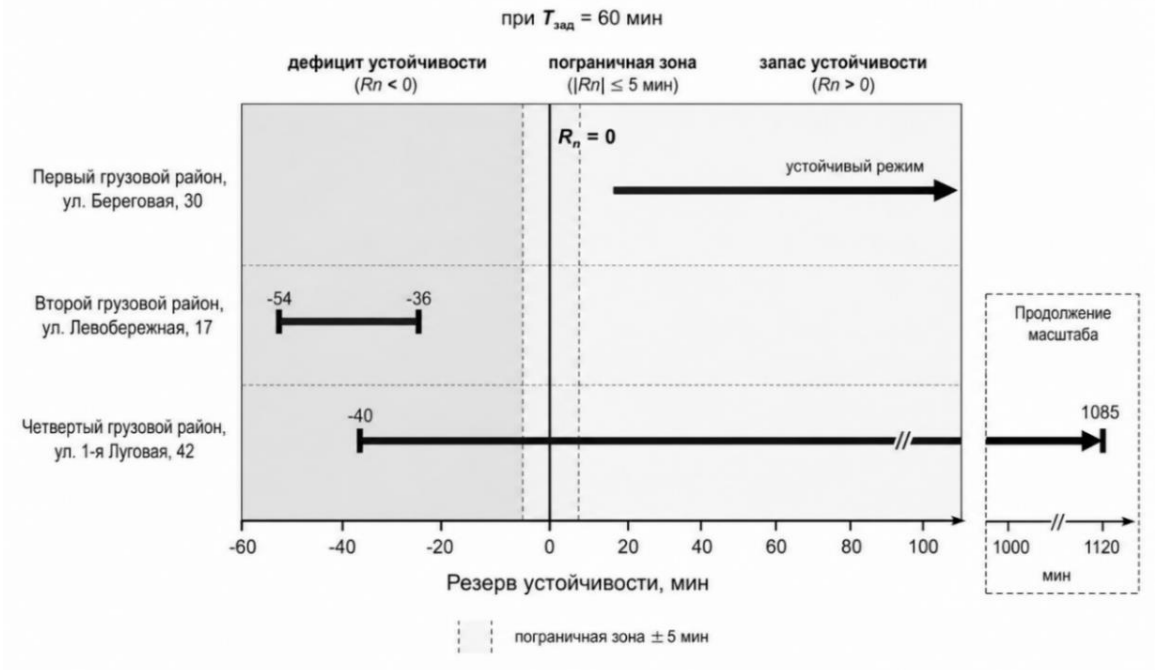


Рис. 4. Интервалы резерва устойчивости внешней УДС в зоне влияния грузовых районов порта

На рисунке 5 показано, как изменяется период устойчивого функционирования внешней УДС при росте интенсивности прибытия транспортных средств в

рассматриваемых грузовых районах портового комплекса. Даже при интервальном характере исходных данных хорошо видно основное соотношение: чем выше интенсивность прибытия, тем быстрее сокращается время, в течение которого прилегающая дорожная сеть способна сохранять допустимое состояние. При этом характер снижения неодинаков для разных участков системы, что связано с различиями в условиях обслуживания, накопления и пропуска транспортных средств через КПП.

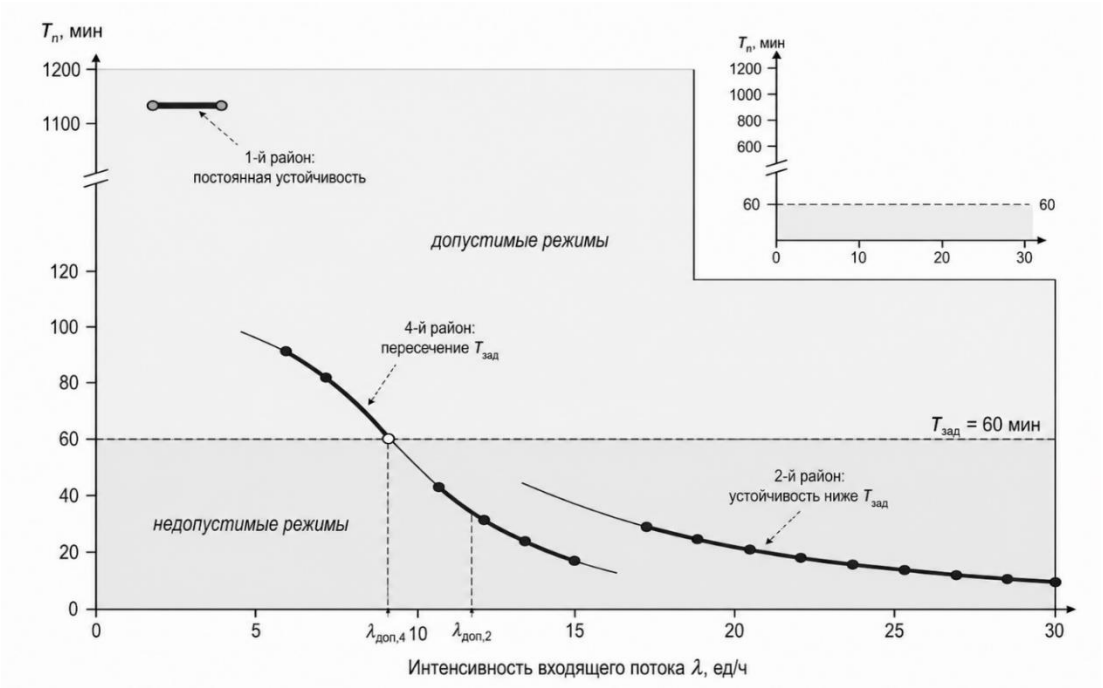


Рис. 5. Изменение периода устойчивого функционирования внешней УДС

Для внешней УДС в зоне влияния второго грузового района весь рассматриваемый диапазон значений расположен ниже заданного горизонта $T_{зад}$= 60 мин. Это означает, что при имеющихся параметрах система не обеспечивает требуемый период устойчивого функционирования. В зоне влияния четвёртого грузового района ситуация иная: часть интервала находится выше уровня $T_{зад}$, а часть — ниже него. Следовательно, здесь формируется практическая граница между допустимыми и недопустимыми режимами, что позволяет использовать расчётную зависимость для определения предельной интенсивности прибытия транспортных средств.

Для проверки аналитической зависимости выполнено сопоставление расчетного периода устойчивого функционирования с моментом достижения критического состояния в имитационной модели. Проверка проведена для пяти состояний трех грузовых районов Ростовского порта. Для каждого состояния выполнена серия из 30 вычислительных экспериментов. Для трех расчетных случаев, в которых аналитическая модель дает конечное значение периода устойчивого функционирования, сравнивались расчетное значение $T_{уст,n}^{расч}$ и среднее значение $T_{уст,n}^{им}$, полученное по результатам имитационного моделирования. Каждый расчетный случай определяется грузовым районом и фиксированной интенсивностью прибытия транспортных средств. Результаты сравнения представлены в таблице 5.

Таблица 5

Сопоставление расчетных и имитационных значений периода устойчивого функционирования

Объект и проверочный режим	$T_{\text{уст},n}^{\text{расч}}$, мин	$T_{\text{уст},n}^{\text{им}}$, мин	Абсолютное расхождение, мин	Относительное расхождение, %
Второй грузовой район Ростовского порта, $\lambda_{\text{ф}} =$ 15,5 авт./ч	24	24,15 (22,88–25,42)	0,15	0,62
Второй грузовой район Ростовского порта, $\lambda_{\text{ф}} = 30$ авт./ч	6	6,24 (5,95–6,54)	0,24	3,85
Четвёртый грузовой район Ростовского порта, $\lambda_{\text{ф}} = 15$ авт./ч	20	20,19 (18,95–21,44)	0,19	0,94

Среднее относительное расхождение между расчетными и имитационными результатами по трем расчетным случаям составило 1,80 %, максимальное расхождение достигло 3,85 %. Во всех случаях расчетное значение периода устойчивого функционирования находилось внутри интервала значений, полученного по результатам 30 вычислительных экспериментов. Это указывает на соответствие расчетной зависимости результатам имитационного моделирования для рассмотренных режимов. Предложенный метод воспроизводит момент достижения критической границы при заданных значениях интенсивности прибытия транспортных средств.

Для дальнейшего использования результатов оценки может быть сформирована связь между видом выявленного ограничения и направлением управляющего воздействия. Возможный вариант такой связи представлен в таблице 6. Предложенный подход позволяет перейти от описательной оценки потери устойчивости к нормативной постановке задачи. В отличие от имитационных моделей, которые дают детальную картину развития очереди, но требуют значительных затрат времени на подготовку и вычисления, полученные аналитические выражения позволяют непосредственно рассчитывать границу допустимого режима по критерию заданного периода устойчивости внешней УДС. Это особенно важно для задач оперативного управления, где решение должно приниматься в ограниченное время и в форме, пригодной для инженерной интерпретации.

Таблица 6

Матрица выбора управленческих воздействий

Выявленное ограничение	Расчётное условие	Интерпретация режима	Рекомендуемое воздействие
Превышение допустимой интенсивности прибытия	$\lambda > \lambda_{\text{доп},n}$	Пик прибытия превосходит возможности системы	ограничение или перераспределение прибытия по временным интервалам
Недостаточная ёмкость накопительной площадки	$E_{\text{нп}} < E_{\text{нп,тр},n}$	Очередь достигает внешней УДС слишком быстро	увеличение накопительной ёмкости, перепланировка зоны накопления
Избыточное время обработки на КПП	$t_{\text{кпп}} > t_{\text{кпп,тр},n}$	Технологические операции ограничивают обслуживание	цифровизация оформления, перераспределение функций, сокращение времени контроля
Недостаточное число каналов обслуживания	$n < n_{\text{тр}}$	Текущая конфигурация КПП не обеспечивает $T_{\text{зад}}$	открытие дополнительных каналов обслуживания
Дефицит устойчивости	$R_n < 0$ или $K_n < 1$	Режим недопустим по критерию $T_{\text{зад}}$	комбинация мер по уменьшению λ и $t_{\text{кпп}}$ либо увеличению $E_{\text{нп}}$ и n

Сопоставление полученных результатов с современными исследованиями показывает, что предложенный подход не заменяет системы назначения временных окон прибытия грузовых автомобилей и модели функционирования терминальных комплексов, а дополняет их, расширяя возможности оценки устойчивости внешней улично-дорожной сети. Работы [3], [5], [6], [8] ориентированы на снижение перегрузки ворот терминала и времени ожидания грузовых автомобилей; исследования [7], [9], [10], [11] демонстрируют возможности имитационного анализа портово-городских взаимодействий; публикации [12], [13], [14] развивают концепцию устойчивости транспортных сетей. Вместе с тем именно аналитическая связь между параметрами работы КПП и периодом устойчивого функционирования внешней УДС позволяет превратить результат в удобный инструмент транспортного планирования и нормирования режимов.

С точки зрения содержательной интерпретации наиболее важным является следующий вывод. Если фактическая входящая интенсивность прибытия превосходит $\lambda_{\text{доп},n}$, система неизбежно переходит в область недопустимых режимов относительно заданного горизонта $T_{\text{зад}}$. Если же ограничивающим фактором является не интенсивность, а время обработки на КПП, то снижение длительности контрольных и оформительских операций может оказаться более эффективным, чем увеличение числа каналов обслуживания. Следовательно, предложенная методика не только фиксирует факт перегрузки, но и позволяет выбирать направление управленческого воздействия.

Ограничением выполненной расчётной апробации является интервальный характер исходных эмпирических данных по трём грузовым районам. Поэтому количественная часть исследования демонстрирует не полное параметрическое поле для каждого значения n, а интервальную интерпретацию режимов. Вместе с тем при наличии калиброванных наборов коэффициентов a_n, b_n, c_n, d_n для конкретной конфигурации КПП выражения (6)–(9) дают прямые нормативные расчёты без дополнительного имитационного эксперимента. Это делает предложенный подход перспективной основой для дальнейшего расширения на задачи стохастической неравномерности прибытия, динамического изменения времени обслуживания и координации с системами интеллектуального транспортного управления.

Выводы

Разработана аналитическая методика определения допустимой интенсивности входящего потока транспортных средств по критерию заданного периода устойчивого функционирования внешней улично-дорожной сети терминального комплекса.

На основе базовой зависимости периода устойчивого функционирования получены аналитические условия определения допустимой интенсивности прибытия, требуемой ёмкости накопительной площадки, предельного времени обработки транспортного средства на КПП и минимально необходимого числа каналов обслуживания.

Введены показатели резерва устойчивости, дефицита устойчивости и коэффициента устойчивости, а также установлены знаки локальных производных, характеризующих чувствительность периода устойчивого функционирования к изменению входящей интенсивности, времени обработки и ёмкости накопления.

Расчётная апробация показала, что для различных грузовых районов терминального комплекса возможны устойчивые, неустойчивые и режимно-зависимые состояния. Это позволяет использовать предложенный подход для обоснования мер по ограничению прибытия транспорта, сокращению времени обработки на КПП, увеличению числа каналов обслуживания и расширению накопительной ёмкости.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения предложенной методики в задачах оперативного регулирования въездных потоков, транспортного планирования и обоснования инфраструктурных решений в зоне влияния терминальных комплексов.

Список литературы

1. Fialkin V., Veremeenko E. Characteristics of Traffic Flow Management in Multimodal Transport Hub (by the Example of the Seaport) / V. Fialkin, E. Veremeenko // Transportation Research Procedia. — 2017. — Vol. 20. — P. 205–211. — DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.053.

2. Фиалкин В. В. Оценка влияния функционирования терминального комплекса на состояние дорожного движения примыкающей улично-дорожной сети / В. В. Фиалкин. — 2020. — eLIBRARY ID: 42853607.

3. Abdelmagid A. M., Gheith M. S., Eltawil A. B. A Comprehensive Review of the Truck Appointment Scheduling Models and Directions for Future Research / A. M. Abdelmagid, M. S. Gheith, A. B. Eltawil // Transport Reviews. — 2022. — Vol. 42, No. 1. — P. 102–126. — DOI: 10.1080/01441647.2021.1955034.

4. Schwarz J. A., Selinka G., Stolletz R. Performance Analysis of Time-Dependent Queueing Systems: Survey and Classification / J. A. Schwarz, G. Selinka, R. Stolletz // Omega. — 2016. — Vol. 63. — P. 170–189. — DOI: 10.1016/j.omega.2015.10.013.

5. Phan M.-H., Kim K. H. Collaborative Truck Scheduling and Appointments for Trucking Companies and Container Terminals / M.-H. Phan, K. H. Kim // Transportation Research Part B: Methodological. — 2016. — Vol. 86. — P. 37–50. — DOI: 10.1016/j.trb.2016.01.006.

6. Reducing External Container Trucks' Turnaround Time in Ports: A Data-Driven Approach under Truck Appointment Systems / S. Sun, Y. Zheng, Y. Dong [et al.] // Computers & Industrial Engineering. — 2022. — Vol. 174. — Art. 108787. — DOI: 10.1016/j.cie.2022.108787.

7. A Novel Truck Appointment System for Container Terminals / F. Bouyahia, S. Belaqziz, Y. Meliani [et al.] // Sustainability. — 2025. — Vol. 17, No. 13. — Art. 5740. — DOI: 10.3390/su17135740.

8. Advances in Terminal Management: Simulation of Vehicle Traffic in Container Terminals / A. Carboni, F. Deflorio, C. Caballini, S. Cangelosi // Maritime Economics & Logistics. — 2025. — Vol. 27, No. 3. — P. 500–524. — DOI: 10.1057/s41278-024-00300-5.

9. Scheduling Truck Arrivals for Efficient Container Flow Management in Port Logistics / D. Baldouski, A. Marin, T. A. de Queiroz, J. P. Pedroso // Central European Journal of Operations Research. — 2025. — DOI: 10.1007/s10100-025-00976-x.

10. The Microsimulation Model for Assessing the Impact of Inbound Traffic Flows for Container Terminals Located near City Centers / N. Grubisic, T. Krljan, L. Maglić, S. Vilke // Sustainability. — 2020. — Vol. 12, No. 22. — Art. 9478. — DOI: 10.3390/su12229478.

11. Ziemska-Osuch M., Guze S. Analysis of the Impact of Road Traffic Generated by Port Areas on the Urban Transport Network—Case Study of the Port of Gdynia / M. Ziemska-Osuch, S. Guze // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, No. 1. — Art. 200. — DOI: 10.3390/app13010200.

12. Investigating Interaction between the Port-City Relationship and the Urban Road Network Structure: A Case Study of China / L. Ding, X. Wang, Y.-Y. Lau [et al.] // Maritime Policy & Management. — 2025. — Vol. 52, No. 7. — P. 1132–1155. — DOI: 10.1080/03088839.2024.2439554.

13. A Systematic Review of Resilience Assessment and Enhancement of Urban Integrated Transportation Networks / Y. Yang, H. Huang, G. Li [et al.] // Journal of Transport Geography. — 2025. — Vol. 129. — Art. 104420. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2025.104420.

14. Postorino M. N., Sarnè G. M. L. A New Approach to Assessing Transport Network Resilience / M. N. Postorino, G. M. L. Sarnè // Urban Science. — 2025. — Vol. 9, No. 2. — Art. 35. — DOI: 10.3390/urbansci9020035.

15. Королёв, М. Е. Статистические методы оценки эффективности транспортной инфраструктуры / М. Е. Королёв, Е. А. Королёв, Р. Р. Чичкан // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 2. – С. 6–17. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/statisticheskie-metody-otsenki-effektivnosti-transportnoy-infrastruktury (дата обращения: 14.08.2026).

16. Глинский, В. А. Сравнительный анализ топологий и алгоритмов маршрутизации в

терминальных логистических сетях / В. А. Глинский, А. Д. Зимирева // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 3. – С. 51–62. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-topologiy-i-algoritmov-marshrutizatsii-v-terminalnyh-logisticheskih-setyah (дата обращения: 14.08.2026).

References

1. Fialkin V., Veremeenko E. Characteristics of Traffic Flow Management in Multimodal Transport Hub (by the Example of the Seaport) / V. Fialkin, E. Veremeenko // Transportation Research Procedia. — 2017. — Vol. 20. — P. 205–211. — DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.053.

2. Fialkin V. V. Ocenka vliyaniya funkcionirovaniya terminal`nogo kompleksa na sostoyanie dorozhnogo dvizheniya primy`kayushhej ulichno-dorozhnoj seti / V. V. Fialkin. — 2020. — eLIBRARY ID: 42853607.

3. Abdelmagid A. M., Gheith M. S., Eltawil A. B. A Comprehensive Review of the Truck Appointment Scheduling Models and Directions for Future Research / A. M. Abdelmagid, M. S. Gheith, A. B. Eltawil // Transport Reviews. — 2022. — Vol. 42, No. 1. — P. 102–126. — DOI: 10.1080/01441647.2021.1955034.

4. Schwarz J. A., Selinka G., Stolletz R. Performance Analysis of Time-Dependent Queueing Systems: Survey and Classification / J. A. Schwarz, G. Selinka, R. Stolletz // Omega. — 2016. — Vol. 63. — P. 170–189. — DOI: 10.1016/j.omega.2015.10.013.

5. Phan M.-H., Kim K. H. Collaborative Truck Scheduling and Appointments for Trucking Companies and Container Terminals / M.-H. Phan, K. H. Kim // Transportation Research Part B: Methodological. — 2016. — Vol. 86. — P. 37–50. — DOI: 10.1016/j.trb.2016.01.006.

6. Reducing External Container Trucks' Turnaround Time in Ports: A Data-Driven Approach under Truck Appointment Systems / S. Sun, Y. Zheng, Y. Dong [et al.] // Computers & Industrial Engineering. — 2022. — Vol. 174. — Art. 108787. — DOI: 10.1016/j.cie.2022.108787.

7. A Novel Truck Appointment System for Container Terminals / F. Bouyahia, S. Belaqziz, Y. Meliani [et al.] // Sustainability. — 2025. — Vol. 17, No. 13. — Art. 5740. — DOI: 10.3390/su17135740.

8. Advances in Terminal Management: Simulation of Vehicle Traffic in Container Terminals / A. Carboni, F. Deflorio, C. Caballini, S. Cangelosi // Maritime Economics & Logistics. — 2025. — Vol. 27, No. 3. — P. 500–524. — DOI: 10.1057/s41278-024-00300-5.

9. Scheduling Truck Arrivals for Efficient Container Flow Management in Port Logistics / D. Baldouski, A. Marin, T. A. de Queiroz, J. P. Pedroso // Central European Journal of Operations Research. — 2025. — DOI: 10.1007/s10100-025-00976-x.

10. The Microsimulation Model for Assessing the Impact of Inbound Traffic Flows for Container Terminals Located near City Centers / N. Grubisic, T. Krljan, L. Maglić, S. Vilke // Sustainability. — 2020. — Vol. 12, No. 22. — Art. 9478. — DOI: 10.3390/su12229478.

11. Ziemska-Osuch M., Guze S. Analysis of the Impact of Road Traffic Generated by Port Areas on the Urban Transport Network—Case Study of the Port of Gdynia / M. Ziemska-Osuch, S. Guze // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, No. 1. — Art. 200. — DOI: 10.3390/app13010200.

12. Investigating Interaction between the Port-City Relationship and the Urban Road Network Structure: A Case Study of China / L. Ding, X. Wang, Y.-Y. Lau [et al.] // Maritime Policy & Management. — 2025. — Vol. 52, No. 7. — P. 1132–1155. — DOI: 10.1080/03088839.2024.2439554.

13. A Systematic Review of Resilience Assessment and Enhancement of Urban Integrated Transportation Networks / Y. Yang, H. Huang, G. Li [et al.] // Journal of Transport Geography. — 2025. — Vol. 129. — Art. 104420. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2025.104420.

14. Postorino M. N., Sarnè G. M. L. A New Approach to Assessing Transport Network Resilience / M. N. Postorino, G. M. L. Sarnè // Urban Science. — 2025. — Vol. 9, No. 2. — Art. 35. — DOI: 10.3390/urbansci9020035.

15. Korolyov M. E., Korolyov E. A., Chichkan R. R. Statisticheskie metody` ocenki e`ffektivnosti transportnoj infrastruktury` / M. E. Korolyov, E. A. Korolyov, R. R. Chichkan // Vestnik Doneczkoj akademii transporta. — 2025. — № 2. — S. 6–17. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/statisticheskie-metody-otsenki-effektivnosti-transportnoy-infrastruktury (date access: 14.08.2026).

16. Glinskij V. A., Zimireva A. D. Sravnitel`ny`j analiz topologij i algoritmov marshrutizacii v terminal`ny`x logisticheskix setyax / V. A. Glinskij, A. D. Zimireva // Vestnik Doneczkoj akademii transporta. — 2025. — № 3. — S. 51–62. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-topologiy-i-algoritmov-marshrutizatsii-v-terminalnyh-logisticheskih-setyah (date access: 14.08.2026).

Fialkin V.V., Zyryanov V.V.

DETERMINING THE ADMISSIBLE INBOUND FLOW RATE BASED ON A TARGET PERIOD OF STABLE OPERATION OF THE EXTERNAL ROAD NETWORK ADJACENT TO A TERMINAL COMPLEX

Abstract*. The article develops an analytical approach to determining the admissible operating regime of a terminal complex checkpoint based on a target period of stable operation of the adjacent external road network. Unlike common approaches focused on queue modelling, truck appointment optimisation, or simulation of terminal gate operations, the proposed framework makes it possible to directly calculate the admissible inbound flow rate, the required holding-area capacity, the maximum allowable vehicle processing time, and the minimum number of service lanes required. Based on the underlying relationship for the period of stable operation, a set of derived analytical expressions is obtained. In addition, the study introduces indicators of stability reserve, stability deficit, and the stability coefficient, and includes a local sensitivity analysis with respect to inbound flow rate, processing time, and holding-area capacity. The proposed method is applied to three freight districts of a port complex. The paper also presents graphical and algorithmic interpretations of admissible and inadmissible operating regimes. The practical significance of the results lies in the possibility of using the proposed approach for real-time regulation of vehicle arrivals, improving checkpoint processing procedures, and supporting infrastructure decisions within the terminal influence area.*

Keywords*: terminal complex, external road network, stability of operation, checkpoint, inbound traffic flow rate, capacity, stability reserve, multi-channel service system*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Фиалкин Вячеслав Владимирович Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, старший преподаватель кафедры Организация перевозок и дорожного движения, E-mail: vfialkin@donstu.ru	**Fialkin Vyacheslav Vladimirovich** Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia Senior Lecturer of the Department «Organization of Transportation and Traffic Management», DSTU E-mail: vfialkin@donstu.ru
Зырянов Владимир Васильевич Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, заведующий кафедрой «Организация перевозок и дорожного движения», E-mail: vzyryanov@donstu.ru	**Zyryanov Vladimir Vasilyevich** Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, Head of the Department «Organization of Transportation and Traffic Management» E-mail: vzyryanov@donstu.ru

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

УДК 656.13.05 : 534.83

Грязнов М.В., Пыталева О.А., Гасилова О.С., Серебряков В.М.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И СОСТАВА ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА УРОВЕНЬ ГОРОДСКОГО ШУМА

Аннотация. *Транспортный шум — один из основных факторов экологического воздействия в крупных российских городах, систематически превышающий гигиенические нормативы и формирующий хронические риски для здоровья населения. В работе представлены результаты натурных исследований уровня транспортного шума на двух характерных перекрёстках Октябрьского района г. Екатеринбурга — ул. Малышева — ул. Восточная и Сибирский тракт — пер. Базовый. По данным измерений шумомером АТЕ-9030 установлено стабильное превышение нормативного эквивалентного уровня звука в 55 дБА (СанПиН 1.2.3685-21) на 20-35 дБА. Пиковые значения достигают 126,5 дБА. На основе нормативных документов (СП 276.1325800.2016 и ОДМ 218.2.013-2011) построены и проанализированы зависимости уровня шума от интенсивности движения, средней скорости и доли тяжёлых транспортных средств. Выполнена логарифмическая регрессия натурных данных, а также количественно оценена результативность предлагаемых шумозащитных мероприятий. Показано, что только комплексное сочетание организационно-транспортных, технических и режимных мер обеспечивает суммарное снижение уровня шума до 46 дБА и приближение к санитарным нормативам. Произведён расчет капитальных и годовых эксплуатационных затрат.*

Ключевые слова: *транспортный шум, интенсивность движения, состав транспортного потока, грузовой транспорт, шумозащитный экран, пористый асфальт, рельефная разметка, акустический дискомфорт.*

Постановка задачи

Автомобильный транспорт является одним из ключевых источников акустического загрязнения городской среды. По оценкам Европейского агентства по окружающей среде, более 20 % населения Европейского союза подвергается длительному воздействию дорожного шума выше 55 дБ, причём негативные эффекты для здоровья регистрируются уже начиная с 45 дБ. Систематическое превышение гигиенических нормативов сопровождается ростом риска артериальной гипертензии, ишемической болезни сердца, нарушений сна и когнитивных расстройств, что подтверждается результатами международных эпидемиологических исследований [9, 10] и руководящими документами Всемирной организации здравоохранения [7].

Для крупных российских городов проблема осложняется отсутствием шумозащитной инфраструктуры на значительной части магистральной улично-дорожной сети, высокой долей грузовых автомобилей и пассажирского транспорта общего пользования в составе потоков, а также плотной смешанной застройкой, в

которой жилые дома соседствуют с магистралями непрерывного и регулируемого движения. По данным предыдущих исследований акустической обстановки г. Екатеринбурга [13], превышения нормативного эквивалентного уровня звука фиксируются практически на всех магистралях общегородского значения, причём наиболее напряжённые ситуации формируются на перекрёстках с регулируемым движением и плотной прилегающей застройкой. Перекрёстки Октябрьского района — ул. Малышева — ул. Восточная и Сибирский тракт — пер. Базовый — характеризуются высокой интенсивностью движения, значительной долей грузового транзита и непосредственной близостью социально значимых объектов (жилых домов, общежитий, детского сада, учебного учреждения), что определяет актуальность настоящего исследования.

Анализ последних исследований

Нормативная база Российской Федерации в области расчёта и нормирования транспортного шума представлена следующими нормативными документами: СП 276.1325800.2016 [1], ГОСТ 20444-2014 [2], ОДМ 218.2.013-2011 [5] и СанПиН 1.2.3685-21 [4]. Эти документы устанавливают единые процедуры измерений и пороговые гигиенические нормативы (55 дБА днём и 45 дБА ночью), а также базовые расчётные зависимости уровня шума от интенсивности и состава потока. Технические требования к шумозащитным экранам регламентированы ГОСТ 32957-2014 [6]. Международные подходы изложены в стандарте ISO 1996-2, адаптированном в ГОСТ 31296.2-2006 [3], в руководящих документах ВОЗ [7] и Европейского агентства по окружающей среде [8].

Современные эпидемиологические исследования Münzel T. и соавторов [9] и обновлённые обзоры в Environmental Science and Pollution Research [10] подтверждают наличие причинно-следственной связи между дорожным шумом и сердечно-сосудистыми заболеваниями. Авторы утверждают, что снижение уровня шума на 5 дБА в зонах превышения норматива ассоциировано с уменьшением риска инфаркта миокарда и инсульта на 8–12 %. Монографии отечественных учёных Иванова Н. И. [11] и Осипова Г. Л. [12] остаются методологической основой инженерной акустики и градостроительной шумозащиты.

Применительно к г. Екатеринбургу акустическая обстановка ранее исследовалась в работе Усаниной Л. В. и Вербицкой Н. О. [13], в которой зафиксированы устойчивые превышения нормативов на магистралях общегородского значения, однако без детального анализа отдельных перекрёстков и без разработки конкретного комплекса шумозащитных мероприятий. Опыт обоснования методики оценки транспортного шума на основе натурных измерений для города со сложной транспортно-климатической ситуацией представлен в диссертации Крикуна С. Н. [14]. Эффективность пористых асфальтобетонных покрытий и других технических решений детально изучена в рамках европейского проекта SILENCE [15]. Результаты анализа показывают, что несмотря на наличие нормативной и методической базы, для крупных уральских городов отсутствуют комплексные исследования, объединяющие натурные измерения, расчётно-аналитические методы и проектное обоснование шумозащитных мероприятий применительно к конкретным перекрёсткам улично-дорожной сети. Базой настоящего исследования послужили также результаты работы [16].

Цель работы

Целью настоящего исследования является установление количественных зависимостей уровня городского шума от параметров транспортного потока (интенсивности, средней скорости, доли грузового транспорта, режима движения) и разработка комплекса шумозащитных мероприятий для двух характерных перекрёстков

г. Екатеринбурга: ул. Малышева — ул. Восточная и Сибирский тракт — пер. Базовый. Достижение цели предполагает решение следующих задач: проведение натурных измерений уровня звука и интенсивности потока, обработку и аппроксимацию полученных данных, их сопоставление с нормативными значениями, разработку и экономическое обоснование комплекса шумозащитных мероприятий.

Основная часть

Объектом исследования выбраны два перекрёстка Октябрьского района г. Екатеринбурга: ул. Малышева — ул. Восточная (магистральная улица общегородского значения регулируемого движения) и Сибирский тракт — пер. Базовый (магистраль с выраженной долей грузового транзита). Выбор обусловлен сочетанием высокой интенсивности движения и непосредственной близости жилой и общественной застройки — жилых домов, общежитий, детского сада, учебного учреждения, а также проведёнными ранее на этих участках исследованиями Усаниной Л. В. и Вербицкой Н. О. [13].

Измерения уровня шума выполнены сертифицированным шумомером АТЕ-9030 в соответствии с требованиями ГОСТ 20444-2014 [2]. Микрофон устанавливался на расстоянии (7,5 ± 0,2) м от оси ближней полосы движения и на высоте (1,5 ± 0,1) м от уровня покрытия; в условиях стеснённой застройки допускалось приближение к стенам зданий не ближе 1 м. Замеры проводились в рабочие дни (понедельник, четверг) пятью сеансами длительностью 5 минут (9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00) с интервалом сэмплирования 2 с. Одновременно фиксировалась часовая интенсивность движения автомобилей с дифференциацией по категориям «лёгкие автомобили» и «тяжёлые автомобили» (граница — 3,5 тонн полной массы).

Результаты измерений сопоставлялись с нормативными уровнями, регламентированными СанПиН 1.2.3685-21 [4] (дневная норма 55 дБА, ночная 45 дБА для территорий, прилегающих к жилым домам). Расчёт шумовой характеристики транспортного потока производился по формуле, предлагаемой в СП 276.1325800.2016:

$$L_A = L_Aэкв(N) + \Delta L_A,груз + \Delta L_A,ск + \Delta L_A,ук + \\ + \Delta L_A,пер + \Delta L_A,пок + \Delta L_A,р.п., \quad (1)$$

где *LAэкв(N)* — базовый эквивалентный уровень звука, зависящий только от интенсивности движения (авт/ч), без учёта дополнительных факторов;

ΔL — коррекция на состав потока, скорость, продольный уклон, светофорное регулирование, тип покрытия и ширину разделительной полосы (по СП 276.1325800.2016, табл. 6.1–6.7);

ΔL_A,груз — поправка на долю грузовых автомобилей в транспортном потоке, учитывающая повышенную шумность тяжёлых автомобилей;

ΔLA,ск — поправка на скорость движения транспортного потока, отражающая изменение шума при росте скорости (на низких скоростях доминирует шум двигателя, на высоких — шум качения шин и аэродинамический шум);

ΔLA,ук — поправка на продольный уклон дороги (при движении на подъём увеличивается нагрузка на двигатель и уровень шума, на спусках возможен иной характер шума, включая шум торможения);

ΔLA,пер — поправка на наличие регулируемых перекрёстков, учитывающая разгоны и торможения транспортных средств, которые увеличивают шум по сравнению с равномерным движением;

ΔLA,пок — поправка на тип дорожного покрытия, зависящая от шероховатости и структуры покрытия (асфальтобетон, цементобетон и др.), с учётом того, что более грубые покрытия увеличивают шум качения.

ΔLA,р.п — поправка на ширину разделительной полосы (чем больше расстояние между встречными потоками, тем ниже уровень шума на рассматриваемой стороне).

Результаты натурных измерений (рис. 1) показывают устойчивое превышение нормативного уровня шума на обоих перекрёстках в течение всего светового дня. На перекрёстке ул. Малышева — ул. Восточная максимум 90,6 дБА зафиксирован в 12:00, минимальное значение (80,1 дБА) — в 21:00. На перекрёстке Сибирский тракт — пер. Базовый максимум составил 84,0 дБА (в 12:00), минимум — 75,4 дБА (в 21:00). Превышение норматива во всех временных точках составляет от 20 до 35 дБА, что соответствует значительному превышению по классификации СанПиН.

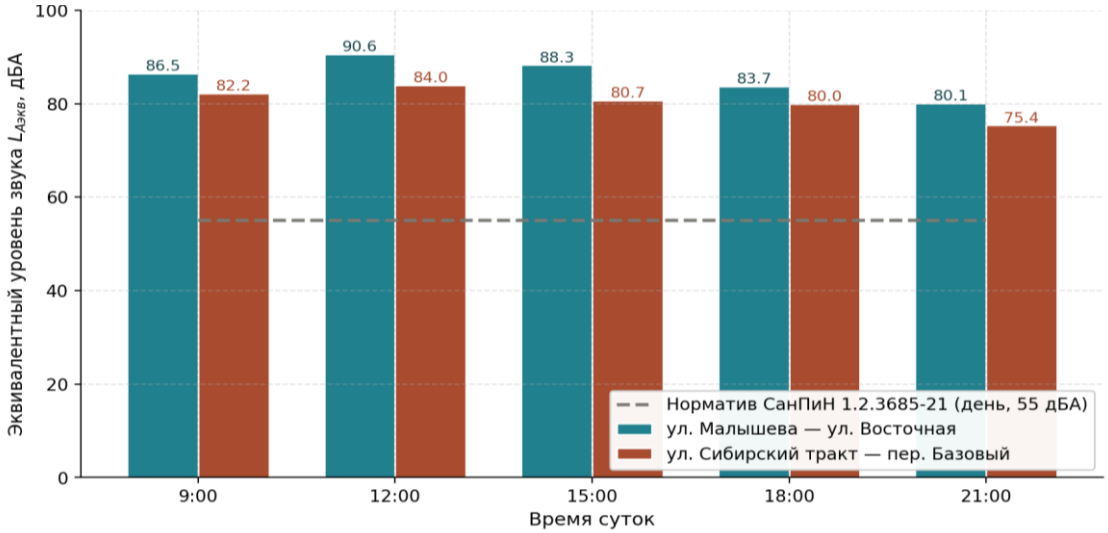


Рис. 1. Суточная динамика эквивалентного уровня звука на исследуемых перекрёстках (натурные измерения, 2025–2026 гг.)

Сопоставление данных по интенсивности движения (от 172 до 452 автомобилей/ч) и эквивалентному уровню звука даёт логарифмический тренд, характерный для шумовой характеристики транспортного потока:

$$L_A = 39{,}1 + 18{,}37 \cdot \lg(N), \quad R^2 = 0{,}26. \tag{2}$$

На рис. 2 показана зависимость эквивалентного уровня звука *LA*экв от часовой интенсивности транспортного потока по результатам натурных измерений на исследуемых перекрёстках и аппроксимирующая её логарифмическая регрессионная кривая. Коэффициент корреляции Пирсона равен 0,51, что указывает на умеренную статистическую связь. Невысокое значение R^2 объясняется тем, что уровень шума определяется не только интенсивностью, но и составом потока, режимом движения и долей «тяжёлых автомобилей». Тем не менее полученная зависимость хорошо согласуется с данными СП 276.1325800.2016 и ОДМ 218.2.013-2011, согласно которым рост интенсивности с 100 до 500 авт./ч сопровождается увеличением базового уровня шума примерно на 6–7 дБА

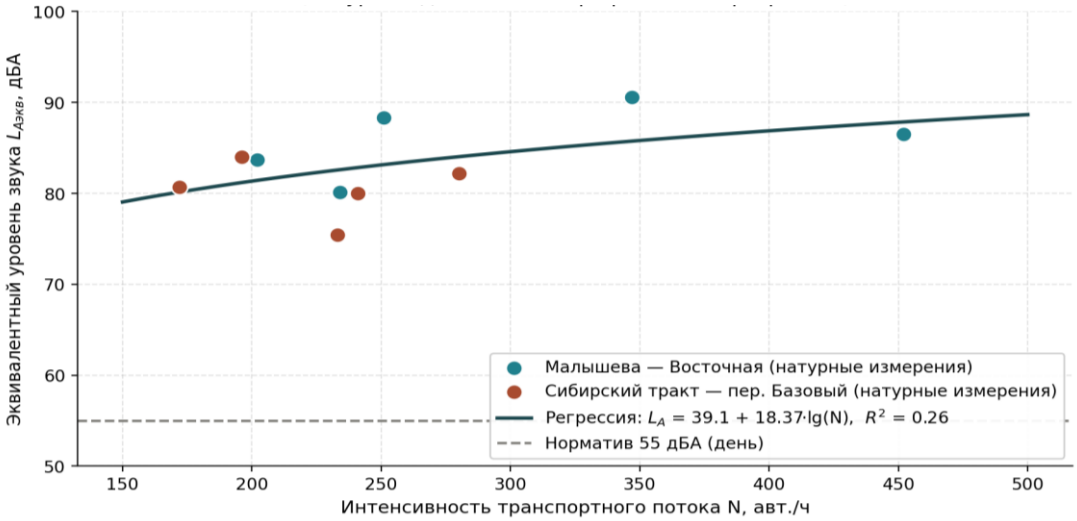


Рис.2. Зависимость эквивалентного уровня звука от интенсивности транспортного потока (натурные данные и логарифмическая регрессия)

Влияние средней скорости на уровень шума описывается через корректирующую поправку *ΔL_A,ск*. При увеличении скорости от 20 км/ч до 100 км/ч коррекция возрастает от −6,5 до +3,0 дБА (рис. 3). В городском диапазоне 40–60 км/ч поправка изменяется в пределах −2,5…0 дБА, то есть снижение скорости с 60 до 40 км/ч обеспечивает уменьшение базового уровня шума ориентировочно на 2,5 дБА. Это согласуется с инженерной практикой: ограничение скорости в населённых пунктах даёт снижение шума до 2 дБА, а в комплексе с упорядочением режима движения — до 3–4 дБА.

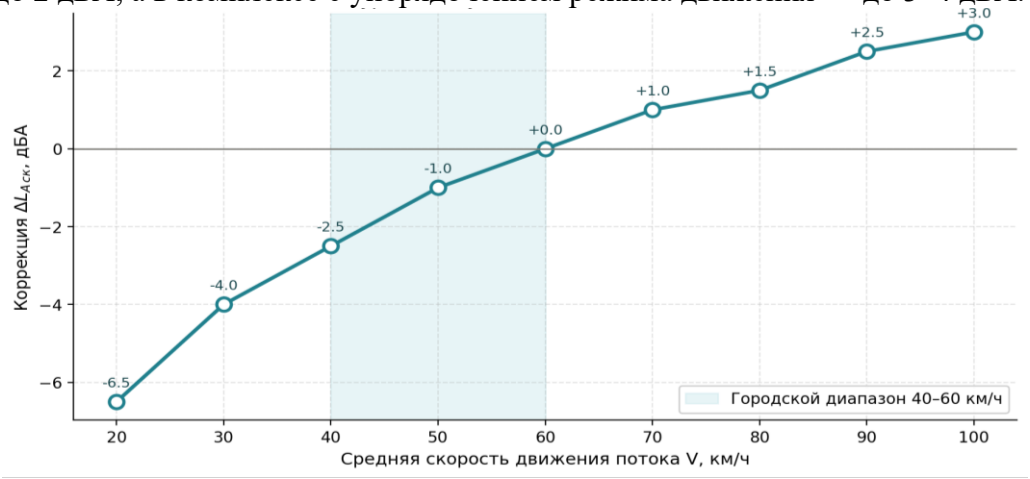


Рис. 3. Зависимость корректирующей поправки *ΔL_A,ск* от средней скорости потока [1]

Доля «тяжёлых автомобилей» в составе потока — один из самых значимых факторов шумообразования. В соответствии с СП 276.1325800.2016 и ОДМ 218.2.013-2011, при росте доли грузовых автомобилей и автобусов свыше 5 % коррекция *ΔL_A,груз* изменяется от −3 до +3 дБА (рис. 4), то есть полный диапазон влияния состава потока составляет 6 дБА. Для исследуемых участков с долей грузового движения 25–50 % коррекция близка к нулю, однако пиковые шумовые события (до 126,5 дБА) формируются именно при проходе одиночных грузовых транспортных средств в условиях разгонно-тормозного режима у светофора.

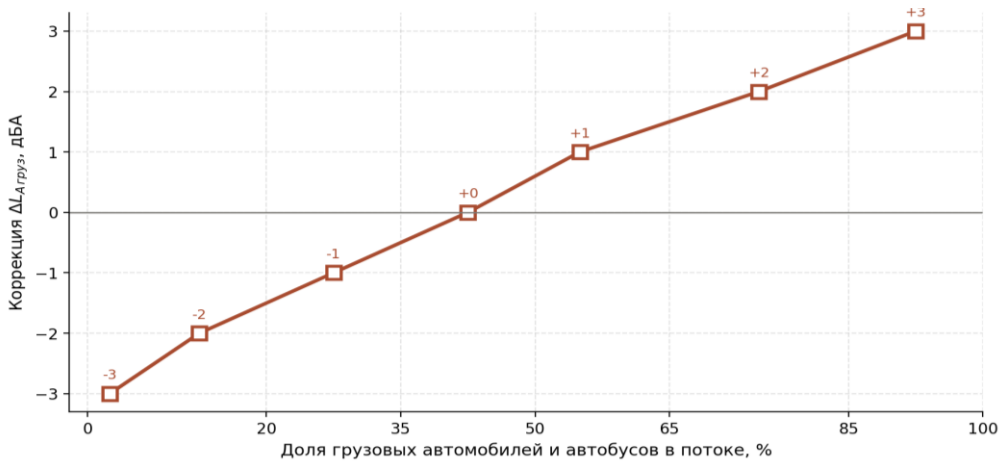


Рис. 4. Зависимость коррекции уровня шума от доли грузового движения в составе потока [1]

Анализ динамики пиковых значений уровня шума на перекрёстках по временны́м интервалам (рис. 5) показывает, что максимальные пиковые значения отличаются от средних значений на 20–40 дБА, достигая в 12:00 и 18:00 уровней 119,9–126,5 дБА. Эти пики превышают максимальный допустимый дневной уровень (70 дБА) более чем на 50 дБА и образуются от проезда «тяжёлого автомобиля» в режиме разгона или торможения. Пиковые значения в течение дня не опускаются ниже 71,6 дБА, что указывает на высокий шумовой фон, причём даже краткие «просадки» интенсивности не возвращают акустическую обстановку к норме.

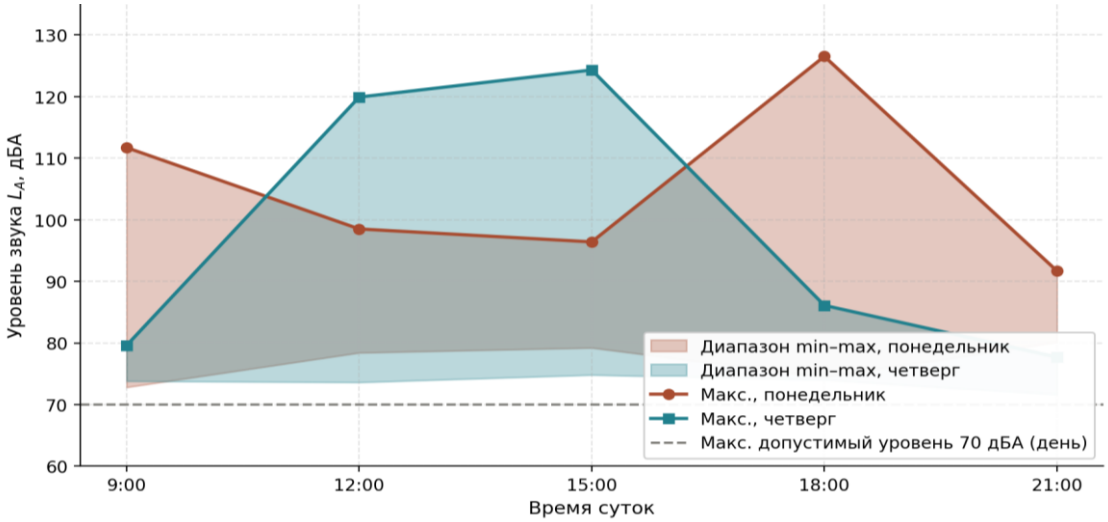


Рис. 5. Динамика пиковых значений уровня шума на исследуемых перекрёстках по результатам замеров

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 [4] территории с превышением гигиенических нормативов более чем на 10 дБА относятся к зонам значительного превышения. Поскольку фактическое превышение на исследуемых перекрёстках составляет 20–35 дБА (по средним) и до 50–60 дБА (по пиковым значениям), обе территории классифицируются как зоны выраженного акустического дискомфорта. В зоне дискомфорта расположено несколько жилых домов (ул. Малышева 93, 116, 118, 120; Сибирский тракт 22, 33а), общежития (3 объекта на Сибирском тракте), детский сад №

441 (ул. Восточная 64а) и учебное учреждение (Сибирский тракт 33а/1). Число людей, подверженных постоянному воздействию шума в этих районах выше норматива: узел ул. Малышева — ул. Восточная — около 1700 человек; узел Сибирский тракт — пер. Базовый — более 2500 человек.

С учётом данных [9] и обновлённых обзоров ЕЕА [8], даже среднесуточные уровни 40–45 дБА запускают стресс-реакции и повышают риск артериальной гипертензии, а уровни шума выше 50 дБА в ночное время достоверно ассоциированы с ростом частоты инфарктов и ишемической болезни сердца. На фоне фактических уровней от 75 до 90 дБА у населения исследуемых районов формируются хронические риски как для сердечно-сосудистой системы, так и для нейросенсорной сферы (особенно у детей дошкольного и школьного возраста). Сводные результаты натурных измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сводные результаты натурных измерений уровня шума и интенсивности движения

Перекрёсток	Период времени	Интенсивность транспортного потока, автомобилей/ч	*L_Аэкв.*, дБА	*L_Амакс.*, дБА	*ΔL* (над нормой 55 дБА)
Малышева — Восточная	9:00	452	86,5	79,6	+31,5
	12:00	347	90,6	119,9	+35,6
	15:00	251	88,3	124,3	+33,3
	18:00	202	83,7	86,1	+28,7
	21:00	234	80,1	77,7	+25,1
Сибирский тракт — пер. Базовый	9:00	280	82,2	111,7	+27,2
	12:00	196	84,0	98,5	+29,0
	15:00	172	80,7	96,4	+25,7
	18:00	241	80,0	126,5	+25,0
	21:00	233	75,4	91,7	+20,4

На основании результатов исследования и в соответствии с [1, 5] предложен комплекс мероприятий, охватывающий четыре уровня воздействия: организационно-транспортный, технико-конструктивный, режимно-нормативный и комплексный.

Организационно-транспортные меры включают: ограничение максимальной скорости с 60 до 40 км/ч на участках, примыкающих к жилой и социальной застройке (ожидаемое снижение 2–3 дБА); оптимизация светофорного регулирования и уменьшение числа точек интенсивного разгона и торможения (до 4 дБА), согласно методическим рекомендациям Минтранса; запрет ночного транзита грузового транспорта по пер. Базовый и прилегающим участкам Сибирского тракта (знак 3.4 Правил дорожного движения (ожидаемое снижение пиков до 5–10 дБА).

Технико-конструктивные меры состоят в установке стационарных прозрачных шумозащитных экранов из поликарбоната высотой 3–4 м на участках общей протяжённостью 5 км (1 км по ул. Малышева, 2 км по ул. Восточной, 2 км по Сибирскому тракту). Технические требования к экранам регламентированы ГОСТ 32957-2014 [6]. Замена существующего дорожного покрытия на пористый асфальтобетон в соответствии с [5] обеспечит снижение уровня шума по данным авторов настоящего исследования до 3 дБА. В соответствии с [15] укладка двухслойных пористых конструкций снижает шум до 10 дБА. Нанесение рельефной дорожной разметки за 50–100 м до пересечений для

принудительного снижения скорости транспортного потока позволит сократить шум до 3–5 дБА, а использование мобильных шумозащитных щитов при ведении строительных работ – до 10–15 дБА (на время проведения работ).

Ожидаемая результативность реализации предлагаемых шумозащитных мероприятий приведена в виде диаграммы на рис. 6.

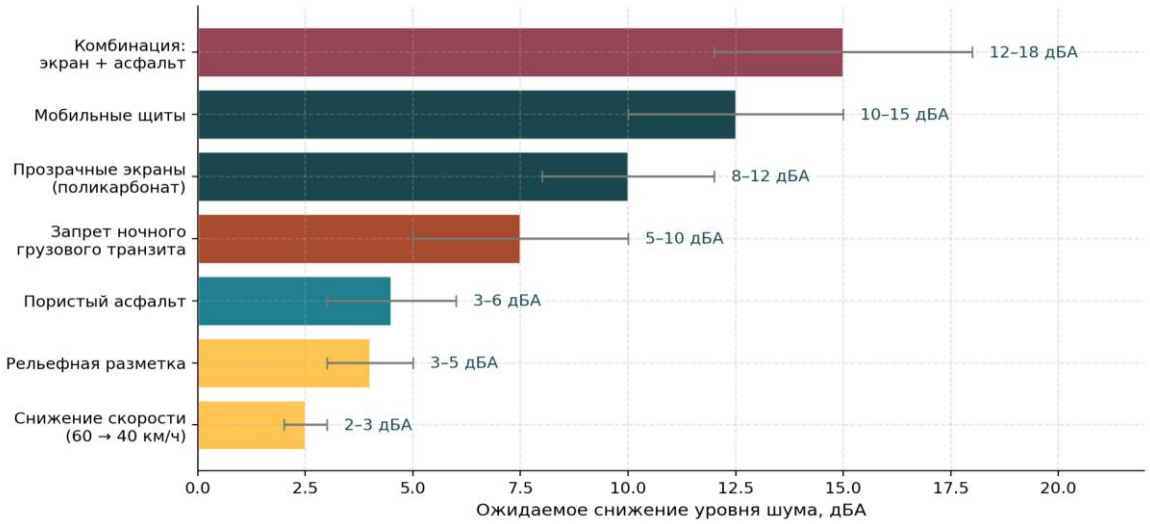


Рис. 6. Ожидаемая результативность реализации предлагаемых шумозащитных мероприятий

Результаты проведённого анализа показывают, что отдельные мероприятия обеспечивают снижение шума в диапазоне 2–18 дБА, причём наибольший вклад дают пассивные акустические сооружения (экраны до 12 дБА) и комбинированные решения (экран и пористое покрытие, до 18 дБА). Организационные меры (ограничение скорости) эффективны как «дополнение» к конструктивным решениям, но в отрыве от них дают лишь умеренный эффект.

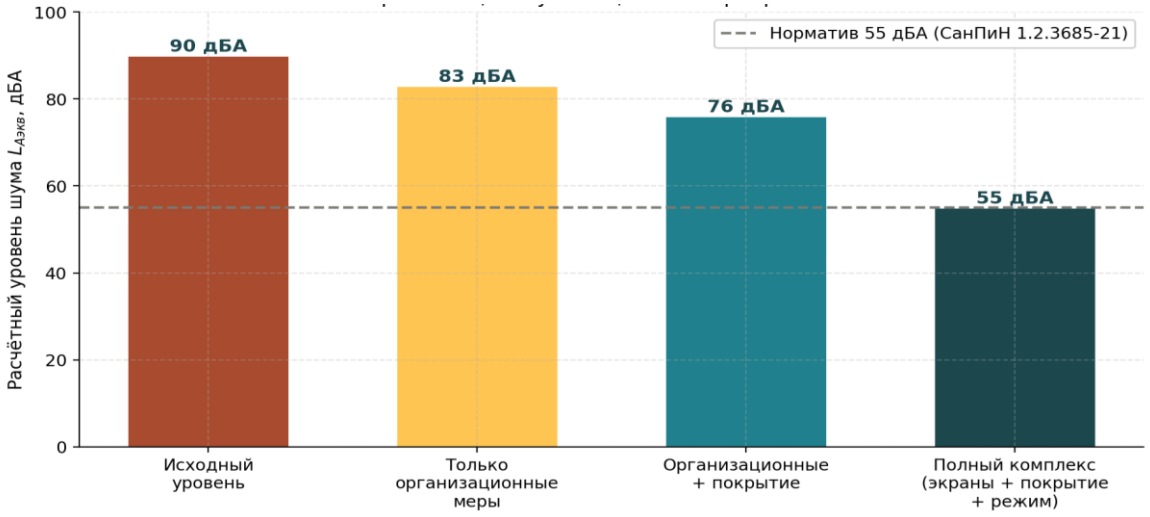


Рис. 7. Прогноз снижения эквивалентного уровня звука по сценариям реализации мероприятий

При исходном уровне 90 дБА (наиболее нагруженный перекрёсток ул. Малышева — ул. Восточная) сценарий «только организационные меры» обеспечивает уровень около 83 дБА, что не приближает обстановку к нормативу. Дополнение пористым

покрытием даёт 76 дБА. Полный комплекс (экраны, пористое покрытие, ограничение режима движения и запрет ночного грузового транзита) обеспечивает совокупное снижение порядка 46 дБА, доводя уровень шума до 55 дБА, то есть практически к санитарной норме.

В работе были рассчитаны капитальные и годовые эксплуатационные затраты на реализацию предлагаемых мероприятий (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчёта затрат на реализацию шумозащитных мероприятий (на 5 км)

Наименование затрат	Величина, тыс. рублей
1. Капитальные затраты	269 917,15
в т.ч. установка поликарбонатных шумозащитных экранов	160 000
- замена дорожного полотна на пористый асфальтобетон	109 575
- нанесение рельефной разметки	342,15
2. Годовые эксплуатационные затраты	33 812,79
в т.ч. содержание шумозащитных экранов	6 714,29
- содержание пористого покрытия	26 156,5
- содержание рельефной разметки	942,0

Капитальные затраты на полный комплекс мероприятий составляют 269 917,15 тыс. рублей, годовые эксплуатационные расходы — 33 812,79 тыс. рублей. Данные расходы компенсируются социальным эффектом в виде снижения заболеваемости (артериальная гипертензия, ИБС, нейросенсорная тугоухость, когнитивные нарушения у детей) и улучшения качества жизни более 4000 жителей и пользователей социальных объектов, расположенных в зонах акустического дискомфорта.

Выводы

1. По результатам натурных измерений на перекрёстках ул. Малышева — ул. Восточная и Сибирский тракт — пер. Базовый было установлено, что эквивалентный уровень транспортного шума устойчиво превышает санитарный норматив 55 дБА на 35 дБА (средние значения) и до 70 дБА (пиковые события), достигая 126,5 дБА.

2. Установлены количественные зависимости уровня шума от ключевых параметров потока: логарифмическая регрессия $L_A = 39{,}1 + 18{,}37 \cdot \lg(N)$ при $R^2 = 0{,}26$ для интенсивности; линейный рост коррекции $\Delta L_A,ск$ от −6,5 до +3,0 дБА в диапазоне скоростей 20–100 км/ч; полный диапазон влияния состава потока (доля «тяжёлых автомобилей») — 6 дБА.

3. В зонах акустического дискомфорта на рассматриваемых перекрёстках находится более 4000 человек, включая воспитанников детского сада, учащихся и студентов, для которых хроническое шумовое воздействие создаёт риски сердечно-сосудистых и нейросенсорных заболеваний.

4. Разработан комплекс мероприятий, обеспечивающий совокупное снижение уровня шума до 46 дБА: ограничение скорости с 60 до 40 км/ч, запрет ночного грузового транзита, установка прозрачных шумозащитных экранов из поликарбоната (5 км), замена покрытия на пористый асфальтобетон, нанесение рельефной разметки.

5. Достижение санитарных нормативов обеспечивает лишь комплексное сочетание организационно-транспортных, технических и режимных мер. Отдельные мероприятия снижают уровень шума не более чем на 15 дБА, что недостаточно для приведения обстановки к норме. Приоритетной зоной для первоочередного внедрения является

перекрёсток ул. Малышева — ул. Восточная, как самый шумонагруженный и расположенный в зоне максимальной плотности социальной застройки.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением выборки натурных измерений до 8–12 регулируемых перекрёстков различных категорий, разработкой уточнённой многофакторной регрессионной модели шума регулируемого перекрёстка и интеграцией результатов с геоинформационной системой шумового картирования г. Екатеринбурга.

Список литературы

1. СП 276.1325800.2016. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков (с Изменениями № 1, 2). – Москва : Минстрой России, 2016. – 52 с.

2. ГОСТ 20444-2014. Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 16 с.

3. ГОСТ 31296.2-2006 (ИСО 1996-2:2007). Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности. Часть 2. Определение уровней звукового давления. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 28 с.

4. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2. – Москва : Роспотребнадзор, 2021. – 469 с.

5. ОДМ 218.2.013-2011. Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. – Москва : Росавтодор, 2011. – 124 с.

6. ГОСТ 32957-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Экраны акустические. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 12 с.

7. Environmental Noise Guidelines for the European Region. – Copenhagen : WHO Regional Office for Europe, 2018. – 181 p. – ISBN 978-92-890-5356-3.

8. The health effects of transport noise and implications for future health risk assessments. – Copenhagen : European Environment Agency, 2025. – 24 p.

9. Münzel, T. Noise causes cardiovascular disease: it’s time to act / T. Münzel, O. Hahad, M. Sørensen [et al.] // Environmental Health Perspectives. – 2024. – Vol. 132, № 7. – P. 075001. – DOI 10.1289/EHP14091.

10. Hahad, O. Road traffic noise exposure and its impact on health: an updated review / O. Hahad, M. Kuntic, S. Al-Kindi [et al.] // Environmental Science and Pollution Research International. – 2024. – Vol. 31, № 32. – P. 44159–44177. – DOI 10.1007/s11356-024-33729-5.

11. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов. – Москва : Логос, 2008. – 424 с. – ISBN 978-5-98704-291-7.

12. Осипов, Г. Л. Защита от шума в градостроительстве : справочник проектировщика / Г. Л. Осипов. – Москва : Стройиздат, 1993. – 96 с.

13. Усанина, Л. В. Оценка состояния шумового загрязнения автомобильным транспортом улично-дорожной сети в г. Екатеринбурге / Л. В. Усанина, Н. О. Вербицкая // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 1066.

14. Крикун, С. Н. Обоснование методики оценки транспортного шума при определении транспортно-эксплуатационных показателей городских автомобильных дорог (на примере города Магадана) : дис. … канд. техн. наук : 05.23.11 / Крикун Сергей Николаевич. – Хабаровск : ТОГУ, 2019. – 142 с.

15. Quieter Surface Transport in Urban Areas (SILENCE) : Integrated Project, FP6 / European Commission. – Brussels, 2008. – Project № TIP4-CT-2005-516288.

16. Серебряков, В. М. Исследование влияния интенсивности и состава транспортного потока на уровень городского шума и разработка мероприятий по его снижению : выпускная квалификационная работа / В. М. Серебряков ; науч. рук. О. А. Пыталева. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. – 71 с.

References

1. SP 276.1325800.2016. Zdaniya i territorii. Pravila proektirovaniya zashchity ot shuma transportnykh potokov [Buildings and territories. Rules for designing protection against noise from traffic flows]. Moscow, Minstroy Rossii, 2016. 52 p. (in Russian).

2. GOST 20444-2014. Shum. Transportnye potoki. Metody opredeleniya shumovoi kharakteristiki [Noise. Traffic flows. Methods for determining noise characteristics]. Moscow, Standartinform, 2015. 16 p. (in Russian).

3. GOST 31296.2-2006 (ISO 1996-2:2007). Shum. Opisanie, izmerenie i otsenka shuma na mestnosti. Chast 2. Opredelenie urovnei zvukovogo davleniya [Noise. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2. Determination of sound pressure levels]. Moscow, Standartinform, 2008. 28 p. (in Russian).

4. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans]. Moscow, Rospotrebnadzor, 2021. 469 p. (in Russian).

5. ODM 218.2.013-2011. Metodicheskie rekomendatsii po zashchite ot transportnogo shuma territorii, prilegayushchikh k avtomobilnym dorogam [Methodological recommendations for protection from traffic noise of territories adjacent to highways]. Moscow, Rosavtodor, 2011. 124 p. (in Russian).

6. GOST 32957-2014. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Ekrany akusticheskie. Tekhnicheskie trebovaniya [Public motor roads. Acoustic screens. Technical requirements]. Moscow, Standartinform, 2016. 12 p. (in Russian).

7. Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2018. 181 p. ISBN 978-92-890-5356-3.

8. The health effects of transport noise and implications for future health risk assessments. Copenhagen, European Environment Agency, 2025. 24 p.

9. Münzel T., Hahad O., Sørensen M. et al. Noise causes cardiovascular disease: it’s time to act. Environmental Health Perspectives, 2024, vol. 132, no. 7, p. 075001. DOI: 10.1289/EHP14091.

10. Hahad O., Kuntic M., Al-Kindi S. et al. Road traffic noise exposure and its impact on health: an updated review. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, vol. 31, no. 32, pp. 44159–44177. DOI: 10.1007/s11356-024-33729-5.

11. Ivanov N. I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borby s shumom [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]. Moscow, Logos, 2008. 424 p. (in Russian).

12. Osipov G. L. Zashchita ot shuma v gradostroitelstve : spravochnik proektirovshchika [Noise protection in urban planning : designer’s handbook]. Moscow, Stroyizdat, 1993. 96 p. (in Russian).

13. Usanina L. V., Verbitskaya N. O. Otsenka sostoyaniya shumovogo zagryazneniya avtomobilnym transportom ulichno-dorozhnoi seti v g. Ekaterinburge [Assessment of noise pollution by motor transport of the street-road network in Yekaterinburg]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education], 2013, no. 6, p. 1066 (in Russian).

14. Krikun S. N. Obosnovanie metodiki otsenki transportnogo shuma pri opredelenii transportno-ekspluatatsionnykh pokazatelei gorodskikh avtomobilnykh dorog (na primere goroda Magadana) : dis. … kand. tekhn. nauk [Substantiation of the methodology for assessing

traffic noise in determining the transport and operational indicators of urban roads (on the example of the city of Magadan) : PhD thesis]. Khabarovsk, TOGU, 2019. 142 p. (in Russian).

15. Quieter Surface Transport in Urban Areas (SILENCE) : Integrated Project, FP6. Brussels, European Commission, 2008. Project no. TIP4-CT-2005-516288.

16. Serebryakov V. M. Issledovanie vliyaniya intensivnosti i sostava transportnogo potoka na uroven gorodskogo shuma i razrabotka meropriyatii po ego snizheniyu : vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota [Study of the influence of intensity and composition of traffic flow on the level of urban noise and development of measures to reduce it : graduate qualification work]. Yekaterinburg, USFEU, 2026. 71 p. (in Russian).

Gryaznov M.V., Pytaleva O.A., Gasilova O.S., Serebryakov V.M.

INFLUENCE OF TRAFFIC FLOW INTENSITY AND COMPOSITION ON URBAN NOISE LEVEL

Abstract. *Transport noise is one of the main environmental impact factors in large Russian cities, systematically exceeding hygienic standards and posing chronic health risks. The paper presents the results of in-kind studies of transport noise levels at two typical intersections in the Oktyabrsky District of Yekaterinburg: Malysheva Street — Vostochnaya Street and Sibirsky Trakt Street — Bazovy Lane. Measurements with an ATE-9030 sound level meter revealed a consistent excess of the standard equivalent sound level of 55 dBA (SanPiN 1.2.3685-21) by 20-35 dBA. Peak values reach 126.5 dBA. Based on regulatory documents (SP 276.1325800.2016 and ODM 218.2.013-2011), the dependences of noise level on traffic intensity, average speed, and the share of heavy vehicles were constructed and analyzed. A logarithmic regression of field data was performed, and the effectiveness of the proposed noise protection measures was quantitatively assessed. It was shown that only a comprehensive combination of organizational, transport, technical, and operational measures ensures a total noise reduction of 46 dBA and compliance with sanitary standards. Capital and annual operating costs were calculated.*

Keywords: *traffic noise, traffic intensity, flow composition, heavy vehicles, noise barrier, porous asphalt, raised pavement markings, acoustic discomfort, SP 276.1325800.2016, SanPiN 1.2.3685-21.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Грязнов Михаил Владимирович ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия Профессор каф ЛиУТС, Д.т.н., профессор, e-mail: gm-autolab@mail.ru	**Mikhail V. Gryaznov** Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia Professor, Department of Logistics and Transport Systems Management, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: gm-autolab@mail.ru
Пыталева Ольга Анатольевна ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Россия Доцент ВШТТС, К.т.н. e-mail: pitaleva_oa@mail.ru	**Olga A. Pytaleva** Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia Associate Professor, Higher School of Transport and Technological Systems, Candidate of Engineering Sciences, e-mail: pitaleva_oa@mail.ru

Гасилова Ольга Сергеевна ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Россия Директор ВШТТС, К.т.н., доцент, e-mail: gasilovaos@m.usfeu.ru	**Olga S. Gasilova** Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia Director of the Higher School of Transport and Technological Systems, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: gasilovaos@m.usfeu.ru
Серебряков Владислав Михайлович ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Россия Студент 4 курса, e-mail: dearslava33@mail.ru	**Vladislav M. Serebryakov** Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia 4th-year student, e-mail: dearslava33@mail.ru

УДК 621.432.3

Иванов В.П., Зеньков В.А.

ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Аннотация. *Обоснован принцип обеспечения безотказной работы автомобильных агрегатов, заключающийся в использовании зависимостей между структурными параметрами агрегатов и наработкой, по которым определяют момент замены деталей трущихся соединений двигателей деталями предварительно подготовленного ремонтного комплекта. Установлены границы допустимого и предельного значений структурного параметра. Определен момент производства ремонтных работ, определяющий максимальное использование потенциального ресурса агрегатов. Предлагаемая своевременная замена деталей соединений, состояние которых определяет предельное состояние агрегата, позволяет приблизить параметр потока отказов к нулю и обеспечить максимальное использование потенциального ресурса агрегатов, заложенного при их изготовлении.*

Ключевые слова: *автомобильный агрегат, техническое состояние, диагностирование, безотказность, наследственность, ресурс.*

Постановка задачи

Ресурсные отказы появляются в конце срока службы агрегатов, а устранение их связано с проведением капитального ремонта силами авторемонтного завода или специализированного сервиса. Наработки отдельных агрегатов до предельного состояния отличаются друг от друга до 4 раз. Такой характер распределения их полного ресурса обусловлен двумя причинами. Первая из них, наиболее значимая, – это «наследственность» происхождения агрегата (качество изготовления) – определяемая видами применяемых материалов деталей, процессами обработки заготовок, сборки, обкатки и контроля агрегатов. Вторая причина – влияние эксплуатационных факторов, выражаемых условиями эксплуатации, нагрузками, качеством использования, технического обслуживания и др. Обе причины весьма изменчивы, поэтому наработка агрегатов до достижения предельного состояния изменяется в больших пределах.

Выбор момента списания или направления агрегата в ремонт недостаточно обоснован в научной литературе, он имеет большое значение: раннее направление приводит к безвозвратной потере ресурса, позднее – к внезапным отказам. Практически агрегат направляют в ремонт после состоявшегося отказа (по потребности) или после регламентированной наработки. Первый случай приводит к неплановым простоям автомобилей, второй случай не учитывает остаточный ресурс агрегата, доля потери которого доходит до 40 %. Приближающееся предельное состояние агрегата и направление в ремонт необходимо выявлять путем объективного определения его технического состояния, что позволяет управлять надежностью техники.

Анализ последних исследований

Вопросам повышения надежности автомобильных агрегатов, диагностирования их технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса в последние годы

уделяется значительное внимание. Современные исследования направлены преимущественно на совершенствование методов неразборного диагностирования двигателей внутреннего сгорания, разработку новых диагностических признаков и моделей прогнозирования технического состояния. В работе [1] показана возможность определения остаточного ресурса автомобильных агрегатов по результатам виброакустического анализа на основе взаимосвязи диагностических параметров с изменением структурных параметров соединений. Исследования [2, 3, 11] посвящены развитию методов обработки вибрационных сигналов, анализу процессов сгорания и выявлению неисправностей двигателя по виброакустическим характеристикам. Работы [4, 8] рассматривают математические модели прогнозирования остаточного ресурса отдельных элементов двигателя и оценки их долговечности на основе закономерностей деградации. В публикациях [5, 10] сформированы теоретические основы надежности, долговечности и изнашивания деталей автомобильных двигателей, а в работе [7] показана необходимость совершенствования ремонтного цикла автомобильных агрегатов. Вместе с тем анализ опубликованных исследований свидетельствует, что большинство известных подходов ориентировано либо на обнаружение возникающих неисправностей, либо на прогнозирование остаточного ресурса отдельных деталей и соединений. В значительно меньшей степени исследованы вопросы практической организации безотказной эксплуатации агрегатов с учетом индивидуального темпа их изнашивания, обусловленного производственной «наследственностью» и условиями эксплуатации. Недостаточно разработаны методы определения момента предупредительной замены деталей, позволяющие одновременно предотвратить ресурсный отказ и максимально использовать потенциальный ресурс агрегата. Не получили достаточного научного обоснования вопросы формирования ремонтных комплектов, предназначенных для предупредительного восстановления агрегатов по результатам ресурсного диагностирования. Вследствие этого актуальным остается разработка принципа организации безотказной работы автомобильных агрегатов, основанного на использовании зависимостей между структурными параметрами, наработкой и моментом проведения ремонтных воздействий, что обеспечивает снижение вероятности ресурсных отказов и более полное использование ресурса, заложенного при изготовлении агрегатов.

Цель работы – обоснование принципа обеспечения безотказной работы автомобильных агрегатов при более полном использовании потенциального ресурса, заложенного при их изготовлении. Достижение цели предполагает определение вида заменяемых частей агрегата для предотвращения ресурсного отказа и установление момента принятия решения о такой замене.

Объектом исследования являлись двигатели внутреннего сгорания – самые сложные автомобильные агрегаты и процессы определения их технического состояния.

Основная часть

В работе рассматривались постепенные**,** медленно накапливающиеся по мере наработки агрегатов ресурсные отказы. Они связаны с постепенным изнашиванием деталей трущихся соединений, относятся к III группе значимости и определяют переход агрегата в предельное состояние из-за достижения недопустимых значений зазоров в соединениях.

Техническое состояние двигателей определяли структурными параметрами – зазорами между поршнем и цилиндром и в подшипниках коленчатого вала. Непосредственно определить эти параметры без разборки агрегата невозможно, поэтому

их оценивали виброакустическим способом с помощью диагностических параметров. Значения диагностических параметров (среднеквадратичного виброускорения точек стенок блока цилиндров) определяли путем регистрации вибрационного отклика при помощи акселерометров, устанавливаемых в контрольных точках: в верхней части блока цилиндров в зоне ВМТ каждого цилиндра и в нижней части блока цилиндров вблизи коренных подшипников (рисунок 1).

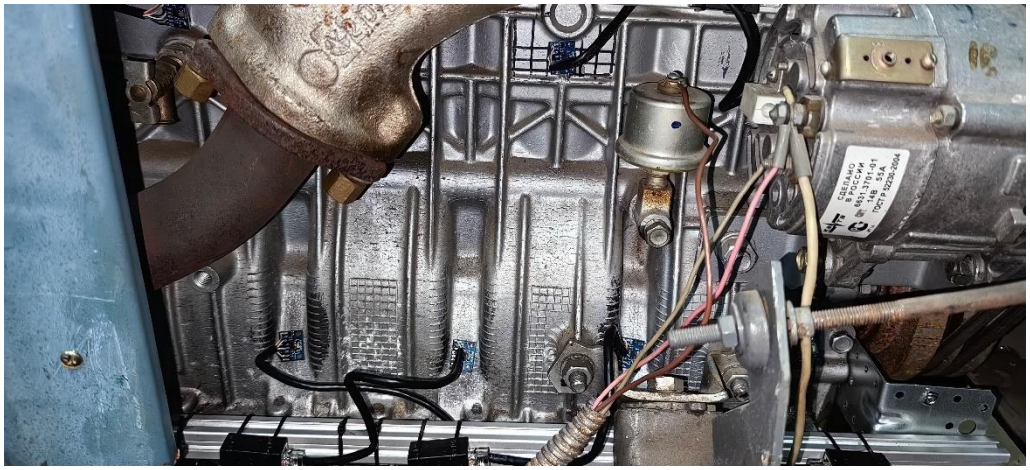


Рис. 1. Двигатель с установленными датчиками

Измерения выполняли на установившихся режимах холостого хода и под нагрузкой при фиксированной частоте вращения коленчатого вала. Регистрировали информативные составляющие в полосе частот колебаний 0,08–10 кГц. Для каждого трущегося соединения были установлены зависимости между диагностическими и структурными параметрами.

Отказ агрегата может быть предотвращен оперативным определением приближающегося предельного состояния путем диагностирования и замены изношенных элементов соединения новыми (из запасных частей) или восстановленными деталями. Для реализации этого мероприятия целесообразно использовать специально подготовленный в условиях авторемонтного предприятия ремонтный комплект деталей, который состоит из трех частей.

Первая часть комплекта (таблица 1) включает основные детали двигателя, восстановленные на авторемонтном предприятии, у которых доведены до нормативных значений параметры расположения и формы, размеры и шероховатость поверхностей.

Таблица 1

Восстановленные детали ремонтного комплекта для бензинового двухрядного восьмицилиндрового двигателя

Детали (количество в комплекте)	Объем восстановления
Гильза цилиндра (8)	Растачивание и хонингование под ремонтный размер
Поршень (8)	Шлифование юбки, восстановление канавок под кольца, развертывание отверстия под поршневой палец, нанесение приработочного покрытия
Поршневой палец (8)	Хромирование или термопластическая раздача, шлифование
Шатун в сборе (8)	Железнение поверхности отверстия в нижней головке; хонингование; замена втулки верхней головки; растачивание
Коленчатый вал (1)	Шлифование и полирование шеек под ремонтные размеры Напыление или наплавка шеек, их шлифование под номинальный размер и полирование
Клапан впускной (8) Клапан выпускной (8)	Железнение стержня, наплавка фаски, шлифование

Вторую часть ремонтного комплекта составляют детали, изготовленные на специализированных участках авторемонтного предприятия:

– стопорные кольца поршневых пальцев;

– резиновые уплотнительные прокладки заднего сальника, клапанной крышки, впускной трубы (передняя, задняя и боковая), изготовление из «сырой» резины вулканизацией в пресс-формах;

– маслоотражательные колпачки впускных клапанов;

– медные прокладки гильз цилиндров;

– паронитовая прокладка крышки распределительных шестерен.

Третья часть ремонтного комплекта – это приобретаемые изделия: прокладки головки цилиндров, комплект поршневых колец, комплекты вкладышей шатунных и коренных подшипников, набивка сальника.

По сравнению с комплектом одноименных запасных частей, приобретенных в розничной торговой сети, ремонтный комплект состоит из деталей, которые подобраны по массовым и размерным группам, образуют в соединениях нормативные замыкающие размеры, цена его при равной долговечности с запасными частями в 3–4 раза меньше. Применение ремонтного комплекта деталей определяет содержание среднего ремонта, который восстанавливает ресурс ремонтируемого изделия частично. Этот вид ремонта исключен из системы содержания парка автомобилей в исправном состоянии в течение всего срока их службы, он приобретает в настоящее время особую актуальность и его целесообразно вернуть в эту систему.

Необходимый объем ремонтных работ в виде замены деталей соединений, достигающих предельного состояния, выявляют диагностированием, используя зависимости изменения структурного параметра $П_с$ от наработки L (рисунок 2). При этом приняты следующие допущения:

– при исследовании наработки двигателей условно считалось, что они введены в эксплуатацию одновременно;

– распределение плотности вероятности начального зазора $П_{с.нач}$ в соединениях принимали гауссовским и свертывали его в одно значение, равное математическому ожиданию;

– период приработки соединения не учитывали;

– исследуемые зависимости между изменяемыми структурными параметрами и наработкой считались линейными и монотонно возрастающими;

– графики функций для отдельных агрегатов не пересекаются.

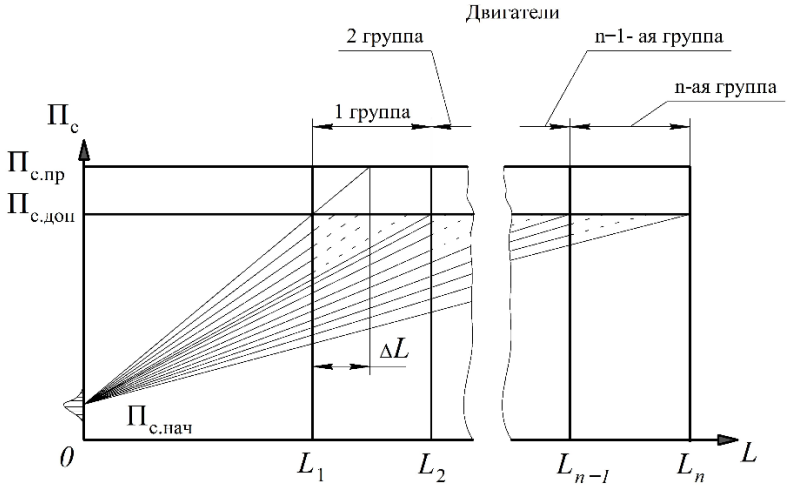


Рис. 2. Зависимости изменения структурного параметра $П_с$ от наработки L двигателей с различной «наследственностью»

Последовательность работ, обеспечивающих безотказную работу агрегатов, включает назначение периодичности диагностирования, объема и момента начала производства ремонтных работ.

Периодичность определения технического состояния двигателей (ресурсного диагностирования Д-1) совмещают с периодичностью технического обслуживания № 1 (ТО-1). Первое диагностирование агрегатов назначают при наработке L_1, равной наработке двигателя с самой слабой наследственностью до достижения им допустимого значения $П_{с.доп}$ структурного параметра.

При назначении значений допустимых и предельных значений структурных параметров (зазоров) с использованием классической зависимости изменения зазора в соединении от наработки до полного исчерпания ресурса учитывали следующее. Допустимое значение структурного параметра, которое превышать в эксплуатации не рекомендуется, определяет начало интенсивного роста зазора в соединении. Достижение предельного значения структурным параметром в соединении связано с возникновением ударных нагрузок с появлением стуков, что может привести к разрушению некоторых деталей. Например, разрыв болтов шатуна сопровождается разрушением стенок блока цилиндров. Сведения о наработке двигателей до предельного состояния получают по результатам мониторинга (наблюдений) за их использованием. Значения структурных параметров, например, двигателей ЗМЗ-402, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения структурных параметров (зазоров) в соединениях двигателей ЗМЗ-402

Соединения	Значения зазоров, мм		
	начального	допустимого	предельного
поршень-цилиндр	0,024–0,048	0,20	0,25
коренной подшипник	0,019–0,073	0,20	0,25
шатунный подшипник	0,010–0,063	0,15	0,20

Линейная форма изменения структурного параметра во время использования двигателей по назначению согласуется с классической зависимостью интенсивности изнашивания деталей соединений от наработки. Изменение структурного параметра *i*-го двигателя описывают уравнением

$$П_{ci} = П_{с.нач} + b_i L, \quad (1)$$

Где $b_i = (П_{с.тек} – П_{с.нач}) / L_{тек}$ – угловой коэффициент;

$П_{с.тек}$ и $П_{с.нач}$ – текущее и начальное значения структурного параметра;

$L_{тек}$ – текущая наработка.

Угловой коэффициент b_i уравнения (1) характеризует время пребывания двигателя в работоспособном состоянии: чем больше агрегат функционирует до достижения допустимого значения структурного параметра, тем меньшее значение этого коэффициента. В каждый момент диагностирования L_1, L_2, … $L_{n–1}$ формируют группы двигателей со схожей наследственностью. Значение углового коэффициента уравнения b_{t1} для агрегата со слабой наследственностью, снимаемый первым с эксплуатации по достижении наработки $L_1 = L_{min}$ равно

$$b_{t1} = \frac{П_{с.доп} - П_{с.нач}}{L_1}. \quad (2)$$

Значение углового коэффициента уравнения b_{t2} для первого двигателя второй группы, снимаемого с эксплуатации по достижении наработки L_2, равно

$$b_{t2} = \frac{\Pi_{\text{с.доп}} - \Pi_{\text{с.нач}}}{L_2}. \quad (3)$$

Все двигатели, уравнения состояния которых содержат угловой коэффициент в пределах $b_{t1} > b_i > b_{t2}$, после достижения наработки L_1 эксплуатируются далее до достижения структурным параметром значения $\Pi_{\text{с.доп}}$ (такие линии наработки на рисунке 2 показаны точками), после чего направляются в ремонт.

Аналогичную процедуру повторяют для всех оставшихся групп агрегатов. Последнее значение наработки $L_n = L_{max}$, слева от которого расположены значения наработки всех агрегатов, соответствует двигателю с самой лучшей наследственностью. Его снимают с эксплуатации последним при наработке L_n.

Момент снятия с эксплуатации двигателя для ремонта определяют по состоянию трущегося соединения, которое ближе к предельному состоянию, но детали ремонтного комплекта расходуют для восстановления и других трущихся соединений двигателя, оказывающих влияние на его техническое состояние.

Изменение структурного параметра $П_{\text{с}}$ за пределами его допускаемого значения (рисунок 2) описывают степенной зависимостью вида

$$\Pi_{\text{с}} = aL^c, \quad (4)$$

где a – коэффициент;

c – показатель степени.

Параметры a и c уравнения определяют из выражений

$$c = (\lg\Pi_{\text{с}} - 1) / (\lg L - 1), \quad (5)$$

$$\lg a = 1 - c. \quad (6)$$

Для группы исследованных агрегатов показатель степени c принимает значения 1,1 – 1,2. Коэффициент а, соответственно: 0,631 – 0,794. Однако уточнение характера зависимости $П_{\text{с}} = f(L)$ на отрезке значений структурного параметра $П_{\text{с.доп}}$–$П_{\text{с.пр}}$ является величиной второго порядка малости и существенного вклада в содержание расчета не вносит.

Влияние технического решения на безотказность и более полное использование ресурса двигателей выражается следующим образом. Предлагаемая своевременная замена деталей соединений, состояние которых определяет предельное состояние агрегата при достижении структурным параметром допустимого значения $\Pi_{\text{с.доп}}$, позволяет приблизить параметр потока отказов к нулю, т.е. организовать безотказную работу агрегатов и максимальное использование потенциального ресурса агрегатов, заложенного при их изготовлении. При этом объективно неиспользованный ресурс ΔL_{i} отдельного i-го агрегата за пределами допустимого значения структурного параметра можно определить из выражения

$$\Delta L_{\text{i}} = (\Pi_{\text{с.пр}} - \Pi_{\text{с.доп}}) / b_{\text{i}}. \quad (7)$$

Доля ресурса, который не может быть использован

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Pi_{\text{с.пр}} - \Pi_{\text{с.нач}}}{\Pi_{\text{с.доп}} - \Pi_{\text{с.нач}}} - 1. \quad (8)$$

Неиспользованный ресурс $L_{\text{н.р.г}}$ группы агрегатов стремится к нулю при стремлении к равенству допускаемого и предельного значений структурного параметра

$$L_{\text{н.р.г}} = \sum(\Pi_{\text{с.пр}} - \Pi_{\text{с.доп}})\, b_{\text{i}} \to 0. \quad (9)$$

при $\Pi_{\text{с.доп}} \to \Pi_{\text{с.пр}}$.

Таким образом, использование ресурса двигателей определяется разницей принятых предельного $П_{с.доп}$ и допустимого $П_{с.доп}$ значений структурного параметра. При их равенстве потенциальный ресурс двигателей будет использован полностью, но возникает риск отказа агрегатов. При прочих равных условиях неиспользованный ресурс у агрегатов с хорошей наследственностью и увеличенной наработкой превышает аналогичный показатель агрегатов с удовлетворительной наследственностью. По мере перехода к рассмотрению агрегатов с хорошей наследственностью разницу ($П_{с.пр} – П_{с.доп}$) можно уменьшить до двух раз за счет увеличения допустимого значения структурного параметра $П_{с.доп}$, что положительно скажется на повышении использования ресурса. Доля объективно неиспользуемого ресурса двигателей с учетом проведенных исследований, рассчитанного по формуле (8), в 2–3 раза меньше доли фактически теряемого в производстве остаточного ресурса.

Экономический эффект достигается заменой капитального ремонта средним при использовании предложенного метода диагностирования и ремонтного комплекта деталей.

Выводы

1) Выработаны условия, обеспечивающие безотказное использование двигателей путем выявления приближающегося допустимого значения структурного параметра и направления агрегата на замену тех деталей, которые определяют прогнозируемый отказ. Установлен момент начала производства ремонтных работ, определяющий максимально полное использование потенциального ресурса двигателей.

2) Для замены изношенных деталей предложен ремонтный комплект, предварительно подготовленный в условиях авторемонтного предприятия, что уменьшает трудоемкость и повышает качество ремонта.

3) Необходимо возвратить в систему содержания парка автомобилей в исправном состоянии в течение всего срока службы средний ремонт агрегатов, который, в отличие от капитального ремонта, восстанавливает их ресурс частично.

4) Перспективы дальнейших научных исследований заключаются в развитии бортового диагностирования, позволяющего организовать непрерывное слежение(мониторинг) за исправностью основных элементов автомобиля и остаточным ресурсом агрегатов, а также в обосновании требований к производству, способному ремонтировать технику с нормативным качеством.

Список литературы

1. Иванов, В.П. Определение остаточного ресурса автомобильных агрегатов по результатам виброакустического анализа / В.П. Иванов, В.А. Зеньков // Наука и техника. 2026. Т. 25, № 3. С. 239–245. – DOI: 10.21122/2227-1031-2026-25-3-239-245.

2. Курносов, А. Ф. Особенности и характер влияния частоты вращения коленчатого вала на величину импульса реакций опор, оцениваемых при диагностировании двигателя внутреннего сгорания / А. Ф. Курносов, Ю. А. Гуськов // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 56–62. – DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-56-62.

3. Zheng, Z. Advancements in detecting combustion events through vibration analysis in internal combustion engines: a literature review / Z. Zheng, P. Lappas, A.-M. Shamekhi, X. Wang, M. Mikulski // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2025. – Vol. 241. – Article 113539. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.113539.

4. Демидов, А. А. Разработка метода оценки состояния двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием по пусковому току стартера / А. А. Демидов, Д. Н. Автаев // Известия МГТУ «МАМИ». – 2025. – Т. 19, № 3. – С. 137–145. – DOI: 10.17816/2074-0530-689718.

5. Гоц, А. Н. Методика расчета долговечности поршней дизелей / А. Н. Гоц, А. Ю. Абаляев, В. М. Фомин // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – Т. 89, № 4. – С. 299–306. – DOI: 10.17816/0321-4443-109951.

6. Дорохов, А. С. Способ определения остаточного ресурса деталей машин: пат. RU 2733105 C1 / А. С. Дорохов, В. А. Денисов, А. А. Соломашкин ; ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. – Опубл. 29.09.2020, Бюл. № 28. – 14 с.

7. Иванов, В. П. Совершенствование ремонтного цикла автомобильных агрегатов / В. П. Иванов, Т. В. Вигерина, Л. М. Мирзатаев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Транспорт. – 2026. – № 1(53). – С. 41–45.

8. Kang, J. Remaining useful life prediction of cylinder liner based on nonlinear degradation model / J. Kang, Y. Lu, B. Zhao, H. Luo, J. Meng, Y. Zhang // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2022. – Vol. 24, No. 1. – P. 62–69. – DOI: 10.17531/ein.2022.1.8.

9. Тимашов, Е. П. Исследование температурных режимов подшипниковых узлов коробки передач автомобиля КамАЗ-5320 для обеспечения их контролепригодности / Е. П. Тимашов, А. Г. Пастухов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 45–51. – DOI: 10.31857/S023571192304017X.

10. Ждановский, Н. С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей / Н. С. Ждановский, А. В. Николаенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Колос, Ленингр. отд-ние, 1981. – 295 с.

11. Rodrigues, N. F. Misfire detection in automotive engines using a smartphone through wavelet and chaos analysis / N. F. Rodrigues, A. V. Brito, J. G. G. S. Ramos, K. D. V. Mishina, F. A. Belo, A. C. Lima Filho // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 14. – Article 5077. – DOI: 10.3390/s22145077.

12. ТКП 248-2010 ТКП 248-2010 (02190). Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения / РУП «Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника»». Минск, 2012. – 17 с.

References

1. Ivanov V.P., Zenkov V.A. Opredelenie ostatochnogo resursa avtomobil'nykh agregatov po rezul'tatam vibroakusticheskogo analiza [Determining the Residual Life of Automotive Units Based on Vibroacoustic Analysis]. Nauka i Tekhnika [Science and Technique], 2026, vol. 25, no. 3, pp. 239–245 (in Russian).

2. Kurnosov A.F., Guskov Yu.A. Osobennosti i kharakter vliyaniya chastoty vrashcheniya kolenchatogo vala na velichinu impul'sa reaktsiy opor, otsenivayemykh pri diagnostirovanii dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Features and Character of the Influence of Crankshaft Speed on the Support Reaction Impulse Estimated During Internal Combustion Engine Diagnostics]. *Agroinzheneriya* [Agricultural Engineering], 2023, vol. 25, no. 1, pp. 56–62. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-56-62 (in Russian).

3. Zheng Z., Lappas P., Shamekhi A.-M., Wang X., Mikulski M. Advancements in Detecting Combustion Events Through Vibration Analysis in Internal Combustion Engines: A Literature Review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, vol. 241, article 113539. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.113539.

4. Demidov A.A., Avtaev D.N. Razrabotka metoda otsenki sostoyaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya s iskrovym zazhiganiyem po puskovomu toku startera [Development of

a Method for Assessing the Condition of Spark-Ignition Internal Combustion Engines Using Starter Current]. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [Proceedings of Moscow State Technical University MAMI], 2025, vol. 19, no. 3, pp. 137–145. DOI: 10.17816/2074-0530-689718 (in Russian).

5. Gots A.N., Abalyaev A.Yu., Fomin V.M. Metodika rascheta dolgovechnosti porshney dizeley [Method for Calculating the Durability of Diesel Pistons]. *Traktory i Sel'khozmashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2022, vol. 89, no. 4, pp. 299–306. DOI: 10.17816/0321-4443-109951 (in Russian).

6. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Solomashkin A.A. Sposob opredeleniya ostatochnogo resursa detaley mashin [Method for Determining the Residual Life of Machine Parts]. Russian Patent RU 2733105 C1, published Sept. 29, 2020, Bull. No. 28 (in Russian).

7. Ivanov V.P., Vigerina T.V., Mirzatayev L.M. Sovershenstvovanie remontnogo tsikla avtomobil'nykh agregatov [Improvement of the Repair Cycle of Automobile Units]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Transport* [Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences. Transport], 2026, no. 1(53), pp. 41–45 (in Russian).

8. Kang J., Lu Y., Zhao B., Luo H., Meng J., Zhang Y. Remaining Useful Life Prediction of Cylinder Liner Based on Nonlinear Degradation Model. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 62–69. DOI: 10.17531/ein.2022.1.8.

9. Timashov E.P., Pastukhov A.G. Issledovanie temperaturnykh rezhimov podshipnikovykh uzlov korobki peredach avtomobilya KamAZ-5320 dlya obespecheniya ikh kontroleprigodnosti [Investigation of Temperature Regimes of Gearbox Bearing Assemblies of the KamAZ-5320 Vehicle to Ensure Their Inspectability]. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2023, no. 4, pp. 45–51. DOI: 10.31857/S023571192304017X (in Russian).

10. Zhdanovskiy N.S., Nikolaenko A.V. *Nadezhnost' i dolgovechnost' avtotraktornykh dvigateley* [Reliability and Durability of Automotive and Tractor Engines]. 2nd ed. Leningrad, Kolos Publ., 1981, 295 p. (in Russian).

11. Rodrigues N.F., Brito A.V., Ramos J.G.G.S., Mishina K.D.V., Belo F.A., Lima Filho A.C. Misfire Detection in Automotive Engines Using a Smartphone Through Wavelet and Chaos Analysis. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 14, article 5077. DOI: 10.3390/s22145077.

12. TKP 248-2010 (02190). *Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont avtomobil'nykh transportnykh sredstv. Normy i pravila provedeniya* [Maintenance and Repair of Motor Vehicles. Standards and Regulations]. Minsk, Belorusskiy nauchno-issledovatel'skiy institut transporta "Transtekhnika" [Belarusian Research Institute of Transport "Transtekhnika"], 2012, 17 p. (in Russian).

Ivanov V.P., Zenkov V.A.

ORGANIZATION OF FAILURE-FREE OPERATION OF AUTOMOBILE UNITS

Abstract. *A principle for ensuring the failure-free operation of automobile units is substantiated. It is based on the use of relationships between the structural parameters of the units and their operating time, which make it possible to determine the appropriate moment for replacing the components of the engine friction pairs with parts from a preassembled repair kit. The permissible and limiting values of the structural parameter are established. The*

moment for carrying out repair operations is determined so as to ensure the maximum utilization of the potential service life of the units. The proposed timely replacement of the components whose condition determines the limiting state of the unit makes it possible to reduce the failure flow parameter to nearly zero and to maximize the utilization of the potential service life incorporated into the units during manufacture.

Keywords: *automobile unit, technical condition, diagnostics, failure-free operation, manufacturing heredity, service life.*

Сведения об авторах:	**Information about the authors:**
Иванов Владимир Петрович УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь, профессор кафедры автомобильного транспорта, доктор технических наук, профессор, e-mail: v.ivanov@psu.by	**Vladimir P. Ivanov** Doctor of Technical Sciences, Professor Professor at the Department of Road Transport Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk Novopolotsk, Republic of Belarus e-mail: v.ivanov@psu.by
Зеньков Василий Анатольевич УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь, аспирант, старший преподаватель магистр технических наук, e-mail:v.zenkov@psu.by	**Vasili A. Zenkov** Master of Technical Sciences Postgraduate Student, Senior Lecturer Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk Novopolotsk, Republic of Belarus e-mail:v.zenkov@psu.by

УДК 656.13:656.073

Маврин В.Г.

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ПАРКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. *Статья посвящена выявлению и оценке влияния эксплуатационных факторов на технико-экономические показатели работы парка специализированных автотранспортных средств, используемых для перевозки промышленных отходов. Установлено, что данный сегмент перевозок характеризуется технико-экономическими показателями, значения которых обладают сниженной эффективностью по причине ряда факторов. Систематизированы показатели работы подвижного состава (коэффициент использования грузоподъёмности, коэффициент использования пробега, расход топлива, время оборота, производительность) и установлены их причинно-следственные связи с тремя группами эксплуатационных факторов: грузовыми, маршрутными и техническими. Разработана математическая модель, включающая прогнозные количественные зависимости для каждого из пяти показателей и целевую функцию оптимизации выбора типа автотранспортного средства и схемы маршрута. Выделены ключевые факторы эффективности, включающие дальность транспортировки, плотность и консолидацию грузопотоков, применение систем уплотнения, класс опасности отходов и цифровую оптимизацию маршрутов. Приведен расчётный пример, демонстрирующий практическое применение модели.*

Ключевые слова*: автомобильный транспорт, эксплуатация специализированных автотранспортных средств, технико-эксплуатационные показатели, промышленные отходы.*

Постановка задачи

Эксплуатация специализированного подвижного состава при перевозке промышленных отходов сопряжена с рядом специфических факторов, приводящих к низкому значению технико-эксплуатационных показателей (ТЭП) работы парка автотранспортных средств (АТС). Ключевой эксплуатационной проблемой является сочетание низкой плотности многих видов промышленных отходов со значительной удалённостью сортировочных и перерабатывающих мощностей. Следствием низкой плотности груза становится критическое снижение коэффициента использования грузоподъёмности (γ), который для АТС без систем уплотнения составляет лишь 0,3–0,5 от номинальной грузоподъёмности.

Одновременно фактор удалённости объектов переработки отходов обусловливает низкий коэффициент использования пробега (β) из-за невозможности организации обратной загрузки для специализированного транспорта и вынужденных холостых пробегов. Сложившаяся практика эксплуатации, при которой выбор типа АТС и

режимов его работы осуществляется без формализованного учёта указанных факторов, приводит к системному перерасходу топлива и необоснованно высокой себестоимости транспортного процесса. Возникает объективная необходимость в количественном анализе влияния перечисленных эксплуатационных факторов на ТЭП парка специализированных АТС для выработки обоснованных решений по выбору рационального типа АТС и параметров его работы.

Анализ последних исследований

Вопросы оценки влияния свойств груза и условий эксплуатации на ТЭП работы подвижного состава традиционно занимают центральное место в теории эксплуатации автомобильного транспорта. Классические подходы связывают производительность АТС с такими параметрами, как номинальная грузоподъёмность, коэффициент её использования, длина ездки с грузом, время погрузки-разгрузки и коэффициент использования пробега. Однако для сегмента перевозок промышленных отходов стандартные методики расчёта требуют адаптации, поскольку специфика груза накладывает существенные ограничения [1].

В научной литературе сформировался устойчивый консенсус относительно того, что транспортный сегмент является «узким горлом» экономики замкнутого цикла. Как отмечается в работе [2], именно этап перевозки генерирует наиболее высокие риски в системе обращения с отходами. Авторы подчеркивают, что применение современных технологий маршрутизации и мультимодальных схем становится необходимым условием для снижения себестоимости, однако их внедрение сдерживается высокой капиталоемкостью и нормативными барьерами.

Авторы работы [3], развивая модели задачи размещения и маршрутизации, показывают, что для промышленных и опасных отходов проблема усугубляется значительной удаленностью перерабатывающих мощностей и необходимостью жесткого соблюдения требований безопасности при пересечении селитебных территорий, что характерно как для глобального контекста, так и для стран с большой территорией, таких как Россия.

Транспортная составляющая является доминирующей в структуре затрат при обращении с отходами. По данным Российского экологического оператора, в структуре тарифов региональных операторов непосредственно на транспортирование приходится до 69% всех расходов [4].

В исследовании [5] фиксируется устойчивая тенденция роста себестоимости транспортирования отходов, обусловленная удорожанием специализированной техники, топлива и запасных частей. Однако эти данные, будучи экономическими по форме, имеют эксплуатационную природу: выбор конкретной модели АТС с определёнными параметрами расхода топлива, надёжности и стоимости обслуживания является инженерной задачей, решаемой на этапе формирования парка.

Для промышленных отходов ситуация усугубляется следующими факторами:

1. Более высокие требования к специализированному подвижному составу. Перевозка отходов I–III классов опасности требует использования сертифицированной техники, соответствующей требованиям ДОПОГ (Дорожная Перевозка Опасных Грузов) [6], стоимость которой превышает стоимость мусоровозов для твердых коммунальных отходов (ТКО).

2. Значительные транспортные плечи. В отличие от ТКО, где маршруты сбора локализованы в пределах муниципальных образований, промышленные отходы часто транспортируются на специализированные полигоны и перерабатывающие предприятия. Дефицит локальных мощностей в ряде регионов вынуждает предприятия

транспортировать отходы на значительные расстояния, что увеличивает транспортные затраты и экологические риски.

3. Необходимость сопроводительной документации и дополнительных мер безопасности. Оформление паспортов отходов, согласование маршрутов перевозки опасных грузов и страхование ответственности увеличивают транзакционные издержки по сравнению с перевозкой малоопасных ТКО.

4. Нерегулярность образования отходов. В отличие от ТКО, образующихся равномерно, промышленные отходы часто накапливаются партиями (например, при плановых ремонтах, замене оборудования, сезонных работах, колебаниях спроса на производимую продукцию), что приводит к пиковым нагрузкам на транспортную систему и неэффективному использованию парка.

Цель работы

Таким образом, имеется потребность в систематизации эксплуатационных факторов, определяющих эффективность работы парка АТС, используемого для транспортировки промышленных отходов, и в количественной оценке их влияния на ТЭП, что позволило бы принимать обоснованные решения по выбору АТС и организации работы автопарка.

Цель статьи – выявление и оценка влияния эксплуатационных факторов на технико-экономические показатели работы парка специализированных АТС при транспортировке промышленных отходов.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в систематизации и количественной оценке причинно-следственных связей между тремя группами эксплуатационных факторов (грузовые, маршрутные, технические) и технико-экономическими показателями работы парка специализированных автотранспортных средств при перевозке промышленных отходов с учётом их класса опасности, нерегулярности грузопотоков и дополнительных энергозатрат на работу систем уплотнения, что позволяет дифференцированно подходить к выбору типа подвижного состава и организации маршрутов в отличие от универсальных методик, ориентированных на твердые коммунальные отходы.

Основная часть

Для объективной оценки эффективности эксплуатации специализированного подвижного состава необходимо рассмотреть систему технико-эксплуатационных показателей, отражающих специфику перевозки промышленных отходов [7]. В таблице 1 систематизированы ключевые ТЭП, их фактические диапазоны, полученные путём обобщения данных [8, 9, 10, 11], и эксплуатационные факторы, вызывающие вариацию этих показателей.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что все ТЭП находятся в тесной взаимосвязи, а их неоптимальные значения порождаются ограниченным набором эксплуатационных факторов, которые могут быть сгруппированы в три блока.

Блок 1. Грузовые факторы. Основным фактором, вызывающим снижение коэффициента использования грузоподъёмности (γ), является низкая насыпная плотность отходов. Для таких грузов, как отходы пластмасс, древесные отходы, отходы упаковки и теплоизоляционные материалы, насыпная плотность составляет 100–300 кг/м³. При объёме кузова самосвала 15–20 м³ и грузоподъёмности шасси 15–20 тонн фактическая масса загружаемых отходов без уплотнения составит лишь 1,5–6 тонн, что соответствует $\gamma = 0{,}1\ldots0{,}4$.

Таблица 1

Технико-эксплуатационные показатели работы специализированных АТС при перевозке промышленных отходов

Показатель	Значение (диапазон)	Ед. изм.	Ключевой эксплуатационный фактор, влияющий на показатель
Коэффициент использования грузоподъёмности (γ)	0,3 – 0,7 (без уплотнения); до 0,85 – 0,95 (с уплотнением)	—	Насыпная плотность отхода; наличие/отсутствие системы уплотнения; тип кузова
Коэффициент использования пробега (β)	0,45 – 0,65	—	Дальность до объекта переработки/полигона; схема маршрутизации (маятниковый или сборный); возможность обратной загрузки
Удельный расход топлива	25 – 45 (движение); +15…25% (работа гидравлики уплотнителя)	л/ 100 км	Тип и техническое состояние двигателя; нагрузочный режим (γ); тип маршрута (город/трасса); работа доп. оборудования
Время оборота АТС	3 – 12	ч	Дальность перевозки; время погрузки-разгрузки; класс опасности → ограничения скорости и согласование маршрута
Производительность за смену	Определяется расчётным способом: зависит от грузоподъемности, коэффициента использования грузоподъёмности, времени оборота	т/смену	Интегральный показатель, аккумулирующий влияние всех вышеперечисленных факторов

Прогнозная зависимость для коэффициента использования грузоподъёмности имеет вид:

$$\gamma = min\left(\left(V_к \cdot \rho_{отх} \cdot k_{упл}\right)/q_н; 1\right), \quad (1)$$

где $V_к$ – объём кузова, м³;

$\rho_{отх}$ – насыпная плотность отхода, т/м³ (для лёгких промышленных отходов 0,1–0,3 т/м³);

$k_{упл}$ – коэффициент уплотнения (1 – без уплотнения; 2–3 – стандартное уплотнение; 4–5 – прессование с высокой степенью сжатия);

$q_н$ – номинальная грузоподъёмность АТС, т.

Эксплуатационным решением, направленным на преодоление этого фактора, является применение АТС, оснащённых системами уплотнения (прессующими механизмами), которые позволяют увеличить плотность груза в кузове в несколько раз и довести γ до значений 0,7–0,95. При этом, однако, возникает дополнительный расход топлива на работу гидравлики, что требует сопоставительного расчёта удельных затрат на тонну для обоснования выбора.

Класс опасности отходов является вторым значимым грузовым фактором. Для отходов I–II классов обязательны: герметичная тара, ограничение скорости движения, согласование маршрута, наличие лицензии у перевозчика. В эксплуатационном выражении это приводит к снижению скорости и увеличению времени оборота, что снижает суточную производительность АТС. Влияние класса опасности на время оборота учитывается через коэффициент снижения скорости $k_{огр}$ (см. формулу 7).

Блок 2. Маршрутные факторы. Удалённость перерабатывающих мощностей и полигонов от мест образования отходов определяет длину ездки с грузом, которая является прямым множителем в формуле времени оборота. Дефицит локальных

мощностей в ряде регионов вынуждает эксплуатировать АТС на плечах в 100–300 км, что увеличивает время оборота и сводит производительность к одному рейсу в сутки.

Невозможность обратной загрузки для специализированного транспорта предопределяет близкий к 0,5 коэффициент использования пробега на маятниковых маршрутах. Эксплуатационным резервом здесь является переход на сборные (кольцевые) маршруты для консолидации партий утилизируемых отходов от нескольких источников, что позволяет поднять β.

Прогнозная зависимость для коэффициента использования пробега:

$$\beta = L_{\text{гр}}/L_{\text{общ}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{гр}}$ – длина ездки с грузом (расстояние от пункта загрузки до пункта разгрузки), км;

$L_{\text{общ}}$ – общий пробег АТС за рейс, км.

Для маятникового маршрута: $L_{\text{общ}} = 2 \cdot L_{\text{гр}} \rightarrow \beta = 0{,}5$ (при отсутствии обратной загрузки).

Для сборного (кольцевого) маршрута с *n* пунктами загрузки:

$$\beta_{\text{сбор}} = \left(L_{\text{гр_посл}} + \sum \Delta L_{\text{между_точками}}\right)/\left(L_{\text{гр_посл}} + \sum \Delta L_{\text{между_точками}} + L_{\text{хол_возврат}}\right), \quad (3)$$

где $L_{\text{гр_посл}}$ – расстояние от последнего пункта загрузки до полигона, км;

$\sum \Delta L_{\text{между_точками}}$ – суммарный пробег между точками сбора, км;

$L_{\text{хол_возврат}}$ – холостой пробег от последней точки до первого пункта загрузки, км.

Выполним расчётный пример сравнения эффективности маятникового и сборного маршрутов транспортирования промышленных отходов от мест их образования до места переработки на примере Республики Татарстан. Рассмотрим три источника образования промышленных отходов: г. Казань, Арская промышленная площадка и Кукморская промышленная площадка. Отходы транспортируются на завод по переработке отходов, расположенный близ г. Набережные Челны. АТС базируется в г. Казани; после разгрузки на заводе автомобиль возвращается на базу холостым пробегом.

Расстояния между объектами следующие: Казань – Набережные Челны: 247 км; Арск – Набережные Челны: 237 км; Кукмор – Набережные Челны: 166 км; Казань – Арск: 68 км; Арск – Кукмор: 90 км.

Маятниковый маршрут (3 рейса):

$L_{\text{общ_маят}} = 2 \cdot (247 + 237 + 166) = 1300$ км,

$L_{\text{гр_маят}} = 247 + 237 + 166 = 650$ км,

$\beta_{\text{маят}} = 650/1300 = 0{,}5.$

Сборный маршрут (1 рейс по кольцу): Казань → Арск → Кукмор → Набережные Челны → Казань (холостой возврат).

$L_{\text{гр_посл}} = 166$ км,

$\sum \Delta L_{\text{между_точками}} = 68 + 90 = 158$ км,

$L_{\text{хол_возврат}} = 247$ км

$\beta_{\text{сбор}} = (166 + 158)/(166 + 158 + 247) \approx 0{,}57.$

Таким образом, переход от маятниковой схемы к сборному маршруту позволил сократить общий пробег с 1300 км до 571 км и повысить коэффициент использования пробега с 0,50 до 0,57.

Блок 3. Технические факторы. Техническое состояние парка АТС и срок его эксплуатации оказывают прямое влияние на расход топлива. Эксплуатация техники за пределами нормативных сроков службы приводит к перерасходу топлива. Кроме того, возрастная техника имеет повышенные затраты на техническое обслуживание и ремонт и время простоя в неисправном состоянии [12].

Прогнозная зависимость для удельного расхода топлива (л/100 км пробега):

$$H_{100} = H_{\text{баз}} \cdot \left(1 + \alpha_{\text{сниж}} \cdot (1 - \gamma)\right) \cdot \left(1 + \delta_{\text{упл}} \cdot I[\text{упл}]\right) \cdot \left(1 + \varepsilon_{\text{возраст}} \cdot t_{\text{экспл}}\right), \quad (4)$$

где $H_{\text{баз}}$ –линейный расход топлива по паспорту АТС при полной загрузке, л/100 км;

$\delta_{\text{упл}}$ – коэффициент дополнительного расхода на гидравлику уплотнителя;

$I[\text{упл}]$ – индикатор наличия уплотнителя (1 – есть, 0 – нет);

$\varepsilon_{\text{возраст}}$ – коэффициент роста расхода топлива на 1 год эксплуатации;

$t_{\text{экспл}}$ – срок эксплуатации АТС, лет.

На основе линейного расхода рассчитываются два удельных показателя, характеризующих эффективность использования топлива:

Удельный расход на тонно-километр (л/т·км) вычисляется как:

$$H_{\text{уд_ткм}} = H_{100}/(100 \cdot \gamma \cdot q_{\text{н}}) \quad (5)$$

Данный показатель позволяет сравнивать эффективность перевозок независимо от расстояния и показывает, сколько литров топлива требуется для перемещения 1 тонны груза на 1 км.

Удельный расход топлива на тонну перевезенного груза (л/т) для маятникового маршрута:

$$H_{\text{уд_т}} = H_{100} \cdot \left(2 \cdot L_{\text{гр}}\right)/(100 \cdot \gamma \cdot q_{\text{н}}) = H_{\text{уд_ткм}} \cdot \left(2 \cdot L_{\text{гр}}\right) \quad (6)$$

Данный показатель показывает общие затраты топлива на доставку 1 тонны груза на конкретное расстояние (с учетом пробега туда и обратно).

Для формализации процесса выбора рационального типа АТС и параметров его работы с учётом выявленных эксплуатационных факторов разработана комплексная математическая модель, объединяющая прогнозные зависимости для всех пяти ТЭП (формулы 1–6) и целевую функцию оптимизации.

Прогнозная зависимость для времени оборота АТС (ч):

$$t_{\text{об}} = \left(2 \cdot L_{\text{гр}}\right)/\left(V_{\text{ср}} \cdot k_{\text{огр}} \cdot k_{\text{проб}}\right) + \Sigma\left(t_{\text{п-р}}\right) + t_{\text{оформ}} + t_{\text{санит}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{ср}}$ – средняя техническая скорость, км/ч;

$k_{\text{огр}}$ – коэффициент снижения скорости из-за ограничений для опасных грузов (1,0 для IV–V классов; 0,75–0,85 для I–II классов);

$k_{\text{проб}}$ – коэффициент учёта дорожных заторов (0,6–1,0);

$\Sigma\left(t_{\text{п-р}}\right)$ – суммарное время погрузки-разгрузки за рейс, ч;

$t_{\text{оформ}}$ – время оформления сопроводительных документов, ч;

$t_{\text{санит}}$ – время на санитарную обработку АТС после перевозки опасных отходов, ч;

Прогнозная зависимость для производительности за смену (т/смену):

$$Q_{\text{см}} = (q_{\text{н}} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot T_{\text{см}})/t_{\text{об}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены, ч;

Целевая функция оптимизации – минимизация удельных приведённых затрат на транспортирование 1 тонно-километра промышленных отходов:

$$Z_i = \left(C_{\text{топ},i} + C_{\text{ам},i} + C_{\text{зп},i} + C_{\text{экол},i}\right)/\left(\gamma_i \cdot q_{\text{н},i} \cdot \beta_i \cdot L_{\text{гр},i}\right) \rightarrow min, \quad (9)$$

где $C_{\text{топ},i}$ – затраты на топливо за рейс для i-го варианта, руб.;

$C_{\text{ам},i}$ – амортизационные отчисления на рейс, руб.;

$C_{\text{зп},i}$ – заработная плата водителя на рейс, руб.;

$C_{\text{экол},i}$ – экологические платежи за рейс, руб.;

Ограничение задачи: $\gamma_i \cdot q_{\text{н},i} \geq q_{\text{треб}}$ – обеспечение вывоза требуемого объёма отходов, где $q_{\text{треб}}$ – требуемая масса вывозимых отходов за один рейс, т.

Результатом решения оптимизационной задачи является выбор такого варианта i^* из множества альтернатив (различные типы АТС и схемы маршрутизации), при котором $Z_i \rightarrow min$, что позволяет принимать обоснованные эксплуатационные решения с учётом выявленных факторов.

На основе проведённого анализа и разработанных прогнозных зависимостей могут быть выделены ключевые факторы, определяющие эффективность работы парка специализированных автотранспортных средств при перевозке промышленных отходов:

1. Дальность транспортировки. Зависимость транспортных затрат от расстояния близка к линейной, однако для опасных отходов необходимо ввести повышающий коэффициент, учитывающий экологические риски.

2. Плотность и консолидация грузопотоков. Объединение мелких партий отходов от различных источников в транспортные партии позволяет повысить коэффициент использования грузоподъемности и снизить удельные затраты.

3. Техническое состояние парка. Эксплуатация техники за пределами нормативных сроков службы приводит к перерасходу топлива и увеличению выбросов загрязняющих веществ.

4. Применение систем уплотнения. Использование АТС с прессующими механизмами позволяет увеличить массу перевозимых отходов за один рейс, пропорционально снижая удельные затраты и выбросы на тонну.

5. Класс опасности отходов. Перевозка отходов I–II классов опасности требует дополнительных затрат на специализированный транспорт, сопроводительную документацию, страхование и т.п., что значительно увеличивает удельную стоимость по сравнению с отходами IV–V классов.

6. Оптимизация маршрутов. Применение современных алгоритмов маршрутизации и ГИС-технологий позволяет сократить общий пробег парка и соответственно снизить затраты и выбросы.

Полученные в работе результаты согласуются с выводами других исследователей, отмечающих, что транспортная составляющая является «узким горлом» в системах обращения с отходами [13]. В частности, выявленное нами критическое снижение коэффициента использования грузоподъёмности для низкоплотных промышленных отходов подтверждает данные, приведённые в работе [14]. Однако в отличие от большинства зарубежных исследований, ориентированных на ТКО, наше исследование показывает, что для промышленных отходов ситуация усугубляется нерегулярностью грузопотоков и более высокими требованиями к безопасности. Это означает, что прямой перенос моделей из сферы ТКО на промышленные отходы без учёта их специфики приводит к завышению ожидаемой эффективности.

Выводы

Проведённое исследование позволило систематизировать ТЭП работы парка специализированных АТС в сегменте промышленных отходов и установить причинно-следственные связи между их значениями и конкретными эксплуатационными факторами. Анализ отраслевых данных показал, что ключевые ТЭП находятся в существенно неоптимальных диапазонах. Выявленные факторы, вызывающие снижение ТЭП, сгруппированы в три блока: грузовые, маршрутные и технические. Показано, что данные факторы находятся в тесной взаимосвязи, а их совокупное действие приводит к тому, что эффективность транспортировки промышленных отходов по совокупности ТЭП оказывается ниже, чем в секторе ТКО.

Для прогнозирования изменения ТЭП при варьировании эксплуатационных параметров разработана математическая модель, включающая количественные зависимости для всех пяти показателей (коэффициент использования грузоподъёмности, коэффициент использования пробега, расход топлива, время оборота, производительность), целевую функцию минимизации удельных затрат и систему ограничений.

На основе проведённого анализа и разработанных прогнозных зависимостей выделены ключевые факторы, определяющие эффективность работы парка специализированных автотранспортных средств при перевозке промышленных отходов: дальность транспортировки, плотность и консолидация грузопотоков, техническое состояние парка, применение систем уплотнения, класс опасности отходов и оптимизация маршрутов.

Список литературы

1. Borisov A.I., Andreev D.V. Organizational and economic aspects of waste management in Russia // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1327. – Art. No. 012016. – DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012016.

2. Dutta P., Talaulikar S., Xavier V., Kapoor S. Fostering reverse logistics in India by prominent barrier identification and strategy implementation to promote circular economy // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 294. – Art. No. 126241. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126241.

3. Fedotkina O., Gorbashko E., Vatolkina N. Circular economy in Russia: drivers and barriers for waste management development // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, No. 20. – Art. No. 5837. – DOI: 10.3390/su11205837.

4. Кузнецова О.В. Тарифное регулирование сферы обращения с твердыми коммунальными отходами // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 51–58. – DOI: 10.18287/2542-0461-2021-12-2-51-58.

5. Коновалова Т.В., Надирян С.Л. Влияние стоимости технических воздействий на транспортное средство на себестоимость перевозок // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2025. – № 5. – С. 231–236.

6. Radeanu C., Vasilescu G., Rus D., Miron C., Mateiu C. Technical solutions for systemic security in the transport of hazardous substances // Proceedings of the 25th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2025. – 2025. – P. 359–368. – DOI: 10.5593/sgem2025/1.1/s03.44.

7. Honma S., Hu J.-L. Cost efficiency of recycling and waste disposal in Japan // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 284. – Art. No. 125274. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125274.

8. Di Foggia G., Beccarello M. Drivers of municipal solid waste management cost based on cost models inherent to sorted and unsorted waste // Waste Management. – 2020. – Vol. 114. – P. 202–214. – DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.012.

9. Сергеев В.И. Корпоративная логистика: 300 ответов на вопросы профессионалов. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 976 с. – ISBN 5-16-001713-2.

10. Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р (ред. от 30.09.2021) «О введении в действие методических рекомендаций "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте"» // Официальный Интернет-ресурс Министерства транспорта Российской Федерации. – URL: https://www.mintrans.gov.ru/documents/2/13592 (дата обращения: 15.08.2026).

11. ИТС 52-2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Обращение с отходами I и II классов опасности : утв. Приказом Росстандарта от 22.09.2022 № 2333. – М.: Бюро НДТ, 2022. – 180 с.

12. Куминов Н.М., Рябчиков Д.С., Тимакина А.А., Чаткин М.Н., Лимаренко Н.В. Оценка влияния технического состояния подвижного состава на расход топлива и коэффициент технической готовности // Вестник РГАТУ. – 2023. – Т.15, № 3. – С. 116–122. – DOI: 10.36508/RSATU.2023.33.97.016.

13. Amir E., Ahmad W., Ullah S. Optimization of Transportation Cost in Reverse Logistics of Electrical Appliances for Sustainability // Engineering Proceedings. – 2025. – Vol. 111, No. 1. – Art. No. 15. – DOI: 10.3390/engproc2025111015.

14. Resop J.P., Cundiff J.S., Sokhansanj S. Implementation of Modular Depot Concept for Switchgrass Pellet Production in the Piedmont // AgriEngineering. – 2025. – Vol. 7, No. 6. – Art. No. 188. – DOI: 10.3390/agriengineering7060188.

References

1. Borisov A.I., Andreev D.V. Organizational and economic aspects of waste management in Russia // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1327. – Art. No. 012016. – DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012016.

2. Dutta P., Talaulikar S., Xavier V., Kapoor S. Fostering reverse logistics in India by prominent barrier identification and strategy implementation to promote circular economy // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 294. – Art. No. 126241. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126241.

3. Fedotkina O., Gorbashko E., Vatolkina N. Circular economy in Russia: drivers and barriers for waste management development // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, No. 20. – Art. No. 5837. – DOI: 10.3390/su11205837.

4. Kuznetsova O.V. Tarifnoe regulirovanie sfery obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami [Tariff regulation in the field of municipal solid waste management] // Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravlenie [Vestnik of Samara University. Economics and Management]. – 2021. – Vol. 12, No. 2. – P. 51–58. – DOI: 10.18287/2542-0461-2021-12-2-51-58. (In Russian)

5. Konovalova T.V., Nadiryan S.L. Vliyanie stoimosti tekhnicheskikh vozdeystviy na transportnoe sredstvo na sebestoimost' perevozok [The influence of the cost of technical impacts on a vehicle on the cost of transportation] // Gumanitarnye, sotsial'no-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki [Humanities, Socio-Economic and Social Sciences]. – 2025. – No. 5. – P. 231–236. (In Russian)

6. Radeanu C., Vasilescu G., Rus D., Miron C., Mateiu C. Technical solutions for systemic security in the transport of hazardous substances // Proceedings of the 25th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2025. – 2025. – P. 359–368. – DOI: 10.5593/sgem2025/1.1/s03.44.

7. Honma S., Hu J.-L. Cost efficiency of recycling and waste disposal in Japan // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 284. – Art. No. 125274. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125274.

8. Di Foggia G., Beccarello M. Drivers of municipal solid waste management cost based on cost models inherent to sorted and unsorted waste // Waste Management. – 2020. – Vol. 114. – P. 202–214. – DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.012.

9. Sergeev V.I. Korporativnaya logistika: 300 otvetov na voprosy professionalov [Corporate logistics: 300 answers to professionals' questions]. – Moscow: INFRA-M Publ., 2005. – 976 p. – ISBN 5-16-001713-2. (In Russian)

10. Rasporyazhenie Mintransa Rossii ot 14.03.2008 No. AM-23-r (red. ot 30.09.2021) «O vvedenii v deystvie metodicheskikh rekomendatsiy "Normy raskhoda topliv i smazochnykh materialov na avtomobil'nom transporte"» [Order of the Ministry of Transport of Russia dated March 14, 2008 No. AM-23-r (as amended on September 30, 2021) "On the implementation of methodological recommendations 'Fuel and lubricant consumption rates in road transport'"] // Official Internet Resource of the Ministry of Transport of the Russian Federation. – URL: https://www.mintrans.gov.ru/documents/2/13592 (accessed 15.08.2026). (In Russian)

11. ITS 52-2022. Informatsionno-tekhnicheskiy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Obrashchenie s otkhodami I i II klassov opasnosti [Information and Technical

Reference on Best Available Technologies. Management of Hazardous Waste of Classes I and II] : approved by Order of Rosstandart No. 2333 dated September 22, 2022. – Moscow: Byuro NDT Publ., 2022. – 180 p. (In Russian)

12. Kuminov N.M., Ryabchikov D.S., Timakina A.A., Chatkin M.N., Limarenko N.V. Otsenka vliyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava na raskhod topliva i koeffitsient tekhnicheskoy gotovnosti [Assessment of the influence of the technical condition of rolling stock on fuel consumption and the coefficient of technical readiness] // Vestnik RGATU [Vestnik of RSATU]. – 2023. – Vol. 15, No. 3. – P. 116–122. – DOI: 10.36508/RSATU.2023.33.97.016. (In Russian)

13. Amir E., Ahmad W., Ullah S. Optimization of Transportation Cost in Reverse Logistics of Electrical Appliances for Sustainability // Engineering Proceedings. – 2025. – Vol. 111, No. 1. – Art. No. 15. – DOI: 10.3390/engproc2025111015.

14. Resop J.P., Cundiff J.S., Sokhansanj S. Implementation of Modular Depot Concept for Switchgrass Pellet Production in the Piedmont // AgriEngineering. – 2025. – Vol. 7, No. 6. – Art. No. 188. – DOI: 10.3390/agriengineering7060188.

Mavrin V. G.

THE INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON THE TECHNICAL AND ECONOMIC PERFORMANCE OF A FLEET OF SPECIALIZED VEHICLES IN THE TRANSPORTATION OF INDUSTRIAL WASTE

Abstract*. The article is devoted to identifying and assessing the influence of operational factors on the technical and economic performance of a fleet of specialized vehicles used for transporting industrial waste. It has been established that this transportation segment is characterized by technical and economic indicators whose values exhibit reduced efficiency due to a number of factors. The performance indicators of rolling stock (load capacity utilization factor, mileage utilization factor, fuel consumption, turnaround time, productivity) are systematized, and their causal relationships with three groups of operational factors — cargo-related, route-related, and technical — are established. A mathematical model has been developed, including predictive quantitative dependencies for each of the five indicators and an objective function for optimizing the choice of vehicle type and route scheme. Key efficiency factors are identified, including transportation distance, density and consolidation of cargo flows, the use of compaction systems, waste hazard class, and digital route optimization. A calculation example demonstrating the practical application of the model is provided.*

Keywords*: automobile transport, operation of specialized vehicles, technical and operational performance, industrial waste.*

Сведения об авторе:	Information about the author:
Маврин Вадим Геннадьевич Набережночелнинский институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны, Российская Федерация, доцент, к.т.н., доцент, e-mail: vadim_mmite@rambler.ru	**Mavrin Vadim Gennadyevich** Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vadim_mmite@rambler.ru

УДК 629.113.012.5/625.7

Попков Т.Б., Евтюков С.А., Ануфриев К.А.

УВОД АВТОМОБИЛЯ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ КАК РЕЗУЛЬТАТ НЕСОВЕРШЕНСТВА ПОДСИСТЕМЫ «КОЛЕСО-АВТОДОРОГА» (НА ПРИМЕРЕ ШИН И КОЛЕСНЫХ ДИСКОВ)

Аннотация. *В статье рассмотрена проблема увода автомобиля от прямолинейного движения, обусловленного совместным влиянием несовершенств подсистемы «колесо-автодорога» и дорожной колеи. Предложена интегральная расчетно-экспериментальная модель суммарной боковой силы, объединяющей силовые факторы от взаимодействия с колеей и от шинно-дисковых факторов, таких как: разницы давлений в колесах, дисбаланса, биения дисков и неравномерности износа протектора. Экспериментально на дорогах 1-3 категорий определены геометрические параметры колеи. Установлено, что критическим фактором является угол наклона стенок колеи, а глубина колеи имеет линейную зависимость. Среди шинно-дисковых факторов доминирует дисбаланс колес, сила которого растет пропорционально квадрату скорости. Показано, что опасные сочетания крутых стенок колеи и высокой скорости могут вызывать боковые возмущения, влияющие на потерю курсовой устойчивости даже у технически исправного автомобиля.*

Ключевые слова: *безопасность дорожного движения, боковой увод, шина, колесо, Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда.*

Постановка задачи

Ежегодно на автомобильных дорогах Российской Федерации регистрируются десятки тысяч дорожно-транспортных происшествий (ДТП), значительная доля которых сопровождается человеческими жертвами и тяжелыми последствиями. По данным Госавтоинспекции, за 9 месяцев 2025 года в РФ произошло 94,8 тыс. ДТП, в которых отмечено неисправное состояние транспортных средств, что на 2,8% больше, чем годом ранее [1]. Среди всех конструктивных элементов автомобиля, влияющих на безопасность дорожного движения (БДД), особое место занимает подсистема «колесо-автодорога». Данная подсистема действует в рамках существующей системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» (ВАДС). Именно эта подсистема, включающая шины, колесные диски и зону их контакта с дорожным покрытием, определяет реализацию сил сцепления, управляемость и курсовую устойчивость автомобиля.

Анализ распространенности отказов подтверждает: неисправности ходовой части и колес стабильно входят в число самых частых поломок в России, занимая в 2023 году первое место в структуре причин ремонта [2]. Однако проблема не ограничивается только техническим состоянием автомобиля. Не менее значимым фактором является состояние дорожной инфраструктуры, а именно наличие и геометрические параметры дорожных неровностей и колеи. Дорожные неровности формируют дополнительные возмущающие воздействия на движущийся автомобиль. По данным ГИБДД-Стат, около 40% ДТП в РФ сопровождаются неудовлетворительными дорожными условиями (НДУ) [3].

Ключевая научная проблема заключается в том, что в существующих подходах эти две группы факторов – несовершенство подсистемы «колесо-автодорога» и дорожные условия – рассматриваются изолированно. Отсутствие интегрального расчетно-экспериментального метода, позволяющего количественно оценить суммарный вклад указанных факторов в увод автомобиля от прямолинейного движения, не дает возможности прогнозировать критические режимы движения и объективно ранжировать участки дорог по степени опасности.

Причины возникновения увода

Увод автомобиля от прямолинейной траектории обусловлен преимущественно дисбалансом подсистемы «колесо-автодорога», который может быть систематизирован по следующим группам факторов, приведенным в таблице 1 [4, 5].

Таблица 1

Классификация причин возникновения увода автомобиля

№ п/п	Причина	Последствия
1	Разное давление в шинах	Шина с пониженным давлением имеет больший коэффициент трения и повышенную эластичность, что создаёт тянущее усилие в её сторону.
2	Разный рисунок протектора	Разный коэффициент сцепления, различная масса и неодинаковая эластичность приводят к уводу.
3	Неравномерный износ протектора	Формирование асимметрии бокового сцепления.
4	Неправильная направленность шин	Шины, предназначенные для иного направления вращения, вызывают увод и ускоренный износ.
5	Деформация каркаса покрышки	Возникает при наезде на препятствие с низким давлением и приводит к стойкому нарушению геометрии колеса.
6	Асимметричный рисунок протектора	На неоднородном покрытии создает разность сцепления и приводит к уводу.
7	Отсутствие балансировки	Возникновение вибраций, потеря устойчивости, имитация увода при скоростном движении.
8	Неравномерное распределение массы	Формирование момента неуравновешенности, усиливающегося с ростом скорости.
9	Радиальное или осевое биение диска колеса	Нарушение прямолинейного движения. Возникают микроперемещения осей автомобиля.
10	Неправильная сборка или крепление колеса	Перекос установленного колеса создает дополнительные переменные силы увода.
11	Нарушение угла схождения передней подвески	Возникает увод в сторону большего угла схождения.
12	Существенная разница углов схождения задней и передней оси	Приводит к нестабильности на высокой скорости.
13	Нарушение угла развала передней и задней оси	Вызывает увод в сторону большего развала.
14	Продольное смещение оси	Нарушение базы колес левой и правой стороны, что провоцирует увод.
15	Нарушение геометрии кузова	Вследствие ДТП или усталостных деформаций приводит к постоянному уводу и требует стапельных работ по устранению неисправности.
16	Неисправность рулевого управления	Плавающее положение колес, неравномерный износ шин, увод, появление люфта и т.п.
17	Деформации рулевого управления	Возникновение задержки при реакции руля на поворот. Возникает значительный увод.
18	Неисправность электронного усилителя руля	Отказ датчика угла поворота руля, ошибка на панели, некорректная работа систем стабилизации *(ESP)* вызывает непредсказуемый увод.
19	Ошибки систем управления и контроля	Сбои датчиков скорости вращения колес, некорректные данные об угле поворота, нарушение калибровки систем активной безопасности, ложные воздействия на рулевое управление и тормозные механизмы, провоцирующие незапланированный увод.

Расчетная часть

В рамках системы ВАДС подсистема «колесо-автодорога» играет ключевую роль в обеспечении безопасности водителя, поскольку именно здесь формируются силы, определяющие управляемость и устойчивость автомобиля [6]. Нарушение баланса одной из составляющих системы провоцирует появление постоянной или переменной возмущающей боковой силы.

Интегральное действие перечисленных причин формирует постоянную или переменную боковую силу, требующую подруливания и снижающую курсовую устойчивость [7, 8].

Увод автомобиля от прямолинейной траектории в рамках исследования влияния подсистемы «колесо-автодорога» на систему ВАДС предполагается характеризовать суммарной боковой силой $F_{y,\Sigma}$, действующей на переднюю ось автомобиля. Модель построена с учетом отличного технического состояния автомобиля и отсутствия возмущающих действий со стороны водителя. Данная сила формируется двумя основными группами источников:

$$\boldsymbol{F_{y,\Sigma} = F_{y_road} + F_{y_wheel}}, \quad (1)$$

где F_{y_road} - боковая сила, возникающая при взаимодействии с дорожными неровностями (колеей);

F_{y_wheel} – боковая сила, обусловленная несовершенствами самого колеса (дисбаланс, биение диска, разность давлений, разность радиусов качения и т.п.).

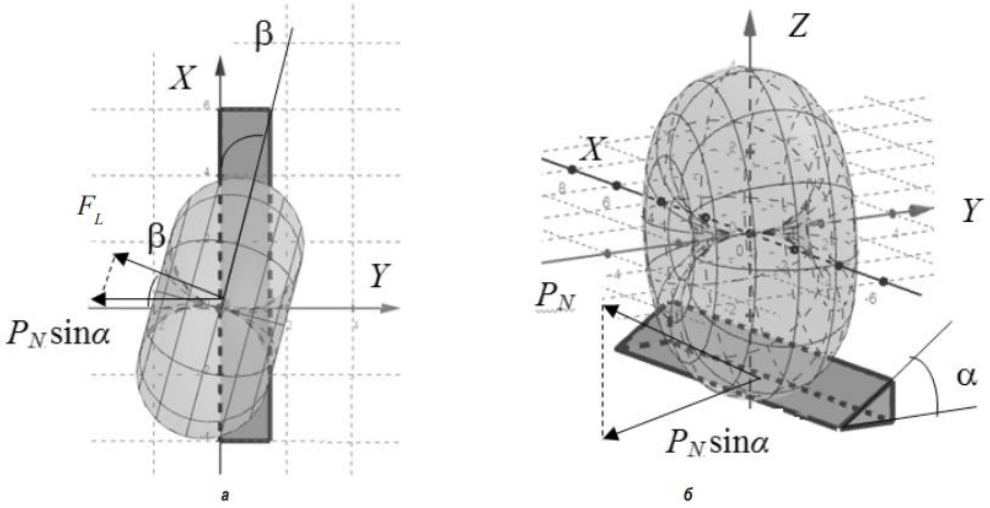


Рис. 1. Схема контакта колес с колеёй: а) вид сверху; б) изометрическая проекция

При заезде в дорожную неровность, а именно в колею, возникает поперечная составляющая нормальной реакции опоры (Рис. 1). С учетом угла наклона боковых стенок колеи и угла поворота колес боковая сила может быть определена по формуле:

$$\boldsymbol{F_{y_road} = P_N sin\alpha \cdot cos\beta \cdot k_{cont}}, \quad (2)$$

где P_N – нормальная реакция опоры на наклонной площадке, Н;

α – угол наклона стенки колеи;

β – угол въезда в колею;

k_{cont} – коэффициент, учитывающий долю пятна контакта шины, взаимодействующей со стенкой колеи.

Вертикальная нагрузка на колесо определяется за счет распределения массы автомобиля на его части опор [9]. Нормальная реакция опоры находится по формуле:

$$\boldsymbol{P_N = -k_r \delta_N}, \quad (3)$$

где k_r – коэффициент радиальной жесткости шины в модели упругого основания, определяемый как $k_r = \frac{P}{\delta_0}$;

δ_0 – деформация поверхности шины в начальном сечении, м;

δ_N – деформация в активном сечении, м.

Деформация шины при наезде на стенку колеи определяется по формуле:

$$\boldsymbol{\delta_N(t) = \frac{P}{mf}\int_0^t \sqrt{1 + (0,5h\gamma v \sin(\gamma v\tau))^2} \cdot \sin f(t-\tau)d\tau,} \quad (4)$$

P – вертикальная нагрузка на колесо, соответствующая четвертой части веса автомобиля, Н;

m – масса колеса, кг;

h – глубина колеи, м;

v – горизонтальная скорость центра колеса, м/с;

γ – коэффициент упрощения модели $\gamma = \frac{(2tg\alpha \cdot sin\beta)}{h}$;

$f = \sqrt{\frac{k_r}{m}}$ – круговая частота свободных колебаний колеса, рад/с.

В свою очередь, k_{cont} зависит от соотношения ширины колеи B и ширины профиля шины W_t, а также от глубины колеи h:

$$\boldsymbol{k_{cont} = \frac{h \cdot (W_t - B)}{A_0},} \quad (5)$$

где A_0 – площадь пятна контакта шины с дорогой на ровной поверхности.

Согласно представленной классификации, боковая сила от шинно-дисковых факторов складывается из нескольких составляющих:

$$\boldsymbol{F_{y,wheel} = F_{\Delta P} + F_{imb} + F_{runout} + F_{profile},} \quad (6)$$

где $F_{\Delta P}$ – боковая сила, возникающая при разнице давлений в шинах;

F_{imb} – переменная боковая сила из-за неуравновешенной массы колеса;

F_{runout} – боковая сила, возникающая от осевого биения дисков колеса;

$F_{profile}$ – боковая сила, возникающая от разной высоты протектора шин.

При разнице давлений между правым и левым колесом изменяется статический радиус качения, что приводит к поворачивающему моменту. Боковая сила, эквивалентная этому моменту (приведённая к передней оси), определяется по формуле:

$$\boldsymbol{F_{\Delta P} = \frac{2 \cdot F_z \cdot \Delta r}{L},} \quad (7)$$

где $\Delta r = C_p \cdot \Delta P$ – изменение радиуса, м;

C_p – экспериментальный коэффициент, принимаемый $C_p \approx 5 \cdot 10^{-8}$м/Па;

ΔP – изменение давления в шине, $\Delta P = 0{,}02$ Мпа;

L – колея автомобиля, м.

Неуравновешенная масса m_d на радиусе R при угловой скорости ω создаёт центробежную силу, проекция которой на боковое направление (при наличии биения или осевого люфта) даёт переменную боковую силу. Принимая, что амплитуда бокового перемещения оси равна величине дисбаланса, отнесённой к жёсткости подвески:

$$\boldsymbol{F_{imb} = m_d \cdot R \cdot \omega^2,} \quad (8)$$

где R – расстояние от оси вращения до центра массы (статический радиус колеса), м;

ω – угловая скорость колеса, рад/с.

Деформация каркаса шины, особенно в виде местного разрыва нитей корда, создает стойкое нарушение геометрии шины, которое воздействует на боковую силу через два механизма: изменение радиуса качения по окружности шины и нарушение прямолинейности качения. Пример деформаций шины показан на рисунке 2.



Рис. 2. Деформация каркаса покрышки

В рамках текущего исследования рассматривается стационарный увод, а именно – нарушение прямолинейности качения. Для стационарного увода (постоянная составляющая) используется среднеквадратичное значение или максимальное.

Допустимый статический дисбаланс для легкового колеса – до 10 г на радиусе 0,2 м.

Разная высота протектора на колесах одной оси приводит к разнице статического радиуса качения. Механизм аналогичен действию разности давления, т.е. возникает поворачивающий момент, эквивалентный боковой силе:

$$\boldsymbol{F_{profile}} = \frac{\boldsymbol{2 \cdot F_z \cdot \Delta R_r}}{\boldsymbol{B}}, \quad (9)$$

где ΔR_r – разница радиусов качения левого и правого колеса, м.

Также боковая сила обусловлена асимметрией сцепления левого и правого колеса или разных зон одного колеса, а также различиями в упругости и сопротивлении уводу. Виды протекторов показаны на рисунке 3.



Рис. 3. Виды протекторов шин

Симметричный ненаправленный протектор при нормальной эксплуатации создает минимальную боковую силу, которой пренебрегают в расчетах из-за её крайней малости.

Асимметричный протектор по конструкции имеет разный рисунок на внешней и внутренней стороне. При правильном монтаже это улучшает управляемость. Но если шина установлена с нарушением ориентации, то возникает разность боковых жесткостей и сцепных свойств между бортами шины. Это эквивалентно действию постоянного уводящего момента, которое можно трактовать как дополнительную боковую силу с имитацией осевого биения.

Отличительной особенностью направленного протектора является оптимизированный водоотвод и устойчивость на мокром покрытии. Однако

неправильный монтаж с перепутыванием направленности шины приводит к тому, что канавки в протекторе работают как насос, резко снижая сцепление и вызывая увод в сторону. Этот эффект не описывается простыми статическими формулами, но может быть качественно приравнен к внезапному уменьшению коэффициента сцепления на одном из колес.

Радиальное или осевое биение амплитудой A_r (мм) вызывает периодическое изменение углов развала/схождения, что порождает боковую силу [10]. Дополнительно радиальное биение может влиять на пятно контакта, но доминирует осевое. Расчет силы происходит через изменения угла схождения:

$$\boldsymbol{F_{runout} = C_c \cdot \frac{A_r}{L}}, \quad (10)$$

где C_c – коэффициент сопротивления уводу шины (Н/рад). Для типовых легковых шин $C_c \approx 5000 \ldots 15000$ Н/рад;

A_r – амплитуда осевого биения диска, м;

L – плечо обкатки (расстояние от оси поворотного колеса до центра пятна контакта), м.

На основе определенных боковых сил по формуле (6) находится суммарная боковая сила от шинно-дисковых факторов. Знаки составляющих могут различаться. Для оценки запаса безопасности используется наихудший результат, то есть арифметическая сумма модулей. Однако для технически исправного автомобиля, где отклонения находятся в пределах норм, обычно принимают, что силы складываются случайным образом, и используют квадратный корень из суммы квадратов полученных сил. Для упрощения и инженерной надежности в расчётах принята модель прямого суммирования.

Далее, по итогам определения боковой силы от взаимодействия колеса с автодорогой по формуле (1) определяется суммирующая боковая сила.

Результаты и обсуждение

Экспериментальное подтверждение ограничивается определением параметров дорожной колеи, поскольку имеется соответствующее оборудование.

Проведены измерения геометрических параметров колеи: глубина h, ширина полосы наката B, углы наклона стенок α_{in}, α_{out} на дорогах I-III категорий.

Экспериментальные исследования проведены при помощи поверенного оборудования. Полученные данные прошли корреляционно-регрессионный анализ.

Объектами исследований служат участки автодорог общего пользования Ленинградской области I-III категорий, имеющие асфальтобетонное покрытие в эксплуатационном состоянии. Для каждой категории дороги выбирается не менее 5 характерных участков, отличающихся по выражению колейности, от практически отсутствующей до максимально наблюдаемой.

Измерения проводились с помощью передвижной дорожной лаборатории КП-514 РДТ, оснащенной лазерно-оптическим сканером (ЛОС), позволяющим определять глубину (Рис. 4).

Далее производилась выборка от минимальной до максимальной величины колеи и производились измерения ширины наката, ширины колеи и углов внешнего и внутреннего наклона стенки колеи с помощью трехметровой рейки с клиньями. Углы определяются по теореме тангенса угла, за счет катетов треугольников, образующихся при опускании клиньев от рейки в нижнюю точку колеи.



Рис. 4. Передвижная дорожная лаборатория КП-514 РДТ в работе по измерению поперечного профиля автодороги

Матрица многофакторного экспериментального исследования представлена в таблице 2 и состоит из следующих факторов:

X_1 – фактор положения колеи на проезжей части (левая, правая);

X_2 – фактор глубины колеи;

X_3 – ширина полосы наката;

X_4 – угол внутренней стенки колеи;

X_5 – угол внешней стенки колеи;

X_6 – повторность измерений.

Таблица 2

Матрица экспериментального исследования по определению параметров дорожной колеи

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	ID дороги
1	левая	h_1	B_1	$\alpha_{\text{внутр}_1}$	$\alpha_{\text{внеш}_1}$	1	-
2	левая	h_2	B_2	$\alpha_{\text{внутр}_2}$	$\alpha_{\text{внеш}_2}$	2	-
3	левая	h_3	B_3	$\alpha_{\text{внутр}_3}$	$\alpha_{\text{внеш}_3}$	3	-
4	левая	h_4	B_4	$\alpha_{\text{внутр}_4}$	$\alpha_{\text{внеш}_4}$	1	-
5	левая	h_5	B_5	$\alpha_{\text{внутр}_5}$	$\alpha_{\text{внеш}_5}$	2	-
6	левая	h_6	B_6	$\alpha_{\text{внутр}_6}$	$\alpha_{\text{внеш}_6}$	3	-
7	левая	h_7	B_7	$\alpha_{\text{внутр}_7}$	$\alpha_{\text{внеш}_7}$	1	-
…	…	…	…	…	…	…	…
16	правая	h_{16}	B_{16}	$\alpha_{\text{внутр}_{16}}$	$\alpha_{\text{внеш}_{16}}$	1	-
17	правая	h_{17}	B_{17}	$\alpha_{\text{внутр}_{17}}$	$\alpha_{\text{внеш}_{17}}$	2	-
18	правая	h_{18}	B_{18}	$\alpha_{\text{внутр}_{18}}$	$\alpha_{\text{внеш}_{18}}$	3	-
…	…	…	…	…	…	…	…
30	правая	h_{30}	B_{30}	$\alpha_{\text{внутр}_{30}}$	$\alpha_{\text{внеш}_{30}}$	3	-
∑	$\sum X_1$	$\sum X_2$	$\sum X_3$	$\sum X_4$	$\sum X_5$	$\sum X_6$	-

Обработка измерений проводилась с помощью программного комплекса RDT-Line. Рабочее окно программы представлено на рисунке 5, на котором отчетливо виден

поперечный профиль автодороги. В программе производился расчет глубины колеи и делались снимки экрана профиля колеи с последующей выгрузкой снимков в программу КОМПАС 3D, в которой с учетом приведения к реальному масштабу производились измерения профилей колеи по полосам наката.

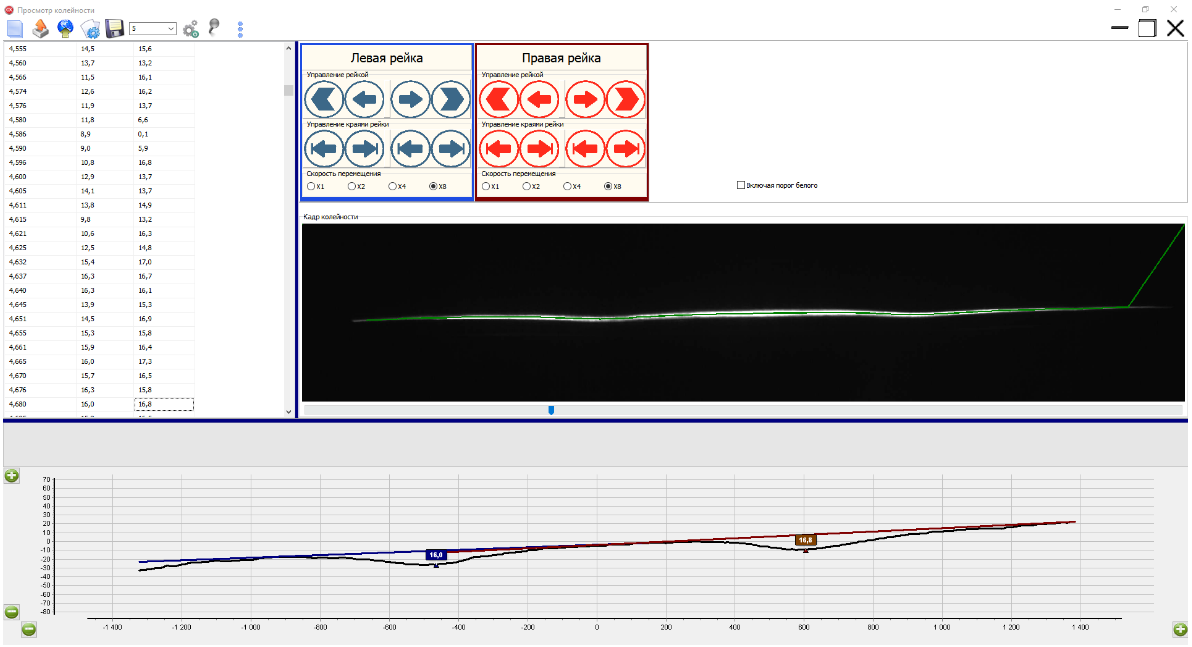


Рис. 5. Рабочее окно программы по обработке результатов измерений колеи RDT-Line

В ходе обработки экспериментальных данных установлено, что ключевыми параметрами, определяющими боковую силу взаимодействия колеса с дорожной колеёй, являются угол наклона стенки колеи α и угол въезда колеса β. Глубина колеи вносит лишь линейный вклад, пропорционально увеличивая нормальную реакцию на наклонном участке, но не изменяет характера зависимости от углов.

На рисунке 6 представлены результаты расчета боковой силы F_{y_road} от угла наклона стенки колеи при фиксированных значениях угла поворота колеса β. Каждая кривая на рисунке соответствует одному значению β. Видно, что с ростом угла α боковая сила возрастает нелинейно, причем темп роста увеличивается с повышением угла β. Наблюдается, что чем больше угол наклона стенок колеи, тем выше разница между боковыми силами в разных положениях поворота колеса. Например, при $\alpha = 5°$ разница между боковыми силами при повороте колес 5º и 30º составляет 2,45 Н. А при $\alpha = 32°$ разница составляет 73,4 Н, что в 30 раз выше.

Важно отметить, что варьирование глубины колеи в диапазоне 10…35 мм при постоянных углах α и β изменяет боковую силу не более чем в 15-20%, тогда как изменения угла наклона стенки с 10º до 25º увеличивает силу в 2,5-3 раза. Таким образом, определяющим фактором является не столько глубина колеи, сколько крутизна ее боковых стенок, выраженных через углы наклона.

Суммарная боковая сила от шинно-дисковых факторов рассчитывалась как сумма её составляющих, описанных в формуле (6). Выполненные расчеты показали, что сила от разницы высоты протектора имеет тот же порядок, что и сила при разнице давлений в шинах и ей можно пренебречь из-за её малости. Сила разности давлений, показанная на рисунке 7 – а) и 7 – б), при типовых отклонениях давлений дает силу 0,2-2 Н, что также не является критической.

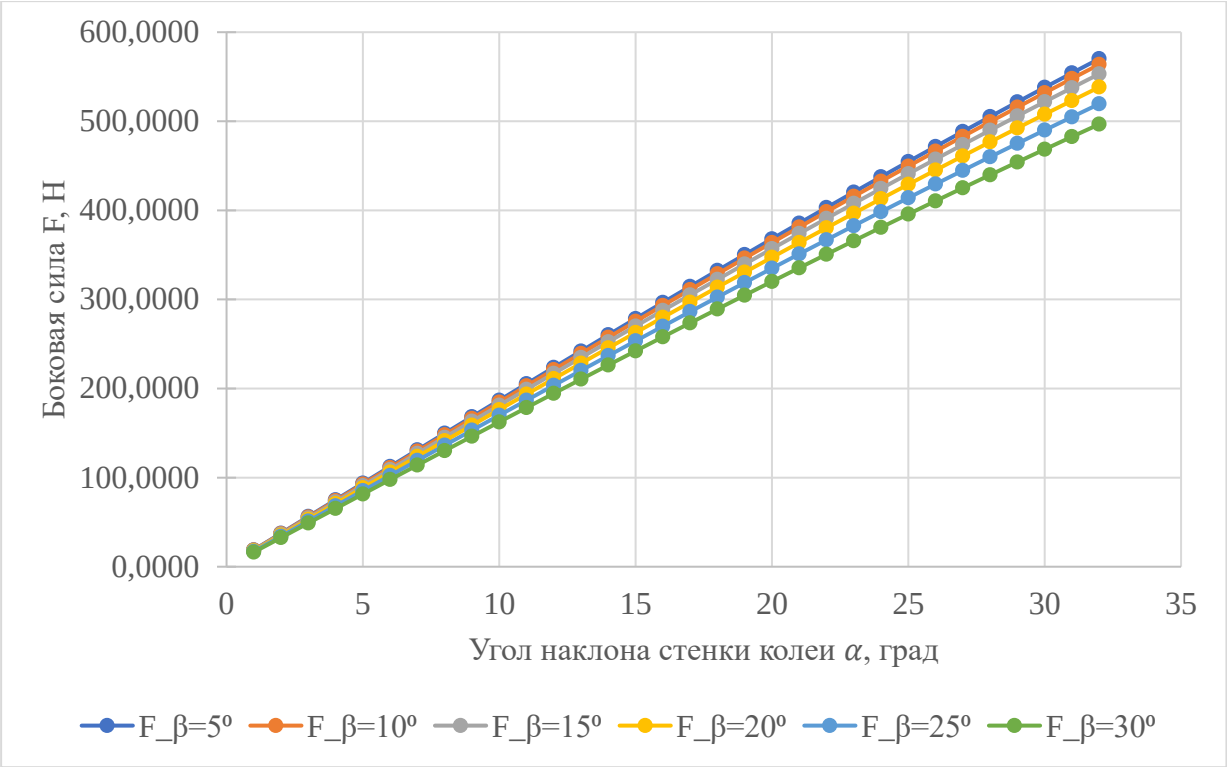


Рис. 6. График зависимости боковой силы взаимодействия колеса автомобиля с автодорогой при выезде из дорожной колеи от угла наклона стенки колеи α, при различных углах поворота β ведущих колес

Боковая сила из-за фактора биения диска при амплитуде 0,5 мм создает боковую силу в пределах 20-35 Н.

Наибольший вклад вносит боковая сила дисбаланса колеса F_{imb}, значение которой на порядок выше других составляющих при движении на больших скоростях. Зависимость от скорости движения представлена на рисунке 7 - г). При фиксированной неуравновешенной массе боковая сила возрастает по степенному закону, пропорционально квадрату угловой скорости. При скорости 60 км/ч сила составляет около 15 Н, при 90 км/ч – уже 35 Н, а при 120 км/ч превышает 60 Н. Это означает, что на высокоскоростных участках даже остаточный дисбаланс, допустимый по нормам, может стать сопоставимым с боковой силой от дорожной колеи.

Выводы

В рамках настоящего исследования предложена расчетная модель, оценивающая суммарное боковое возмущение, действующее на переднюю ось автомобиля, как сумму двух составляющих – силы от взаимодействия с дорожной колеей и силы от шинно-дисковых факторов. При этом модель не является окончательным описанием динамики курсовой устойчивости, поскольку в ней не учтены такие факторы, как: поперечное ускорение, перераспределение реакций по осям, фактические углы увода шин, коэффициент сцепления и стабилизирующий момент. Исключение рулевого управления и водительского подруливания выполнено сознательно – математическая модель строилась для трех фиксированных режимов нахождения колеса в колее - въезда, движения и выезда – когда воздействие водителя на рулевое колесо минимально и отсутствует. Остальные динамические факторы планируется учесть на последующих этапах исследования при переходе к более детализированной пространственной модели автомобиля.

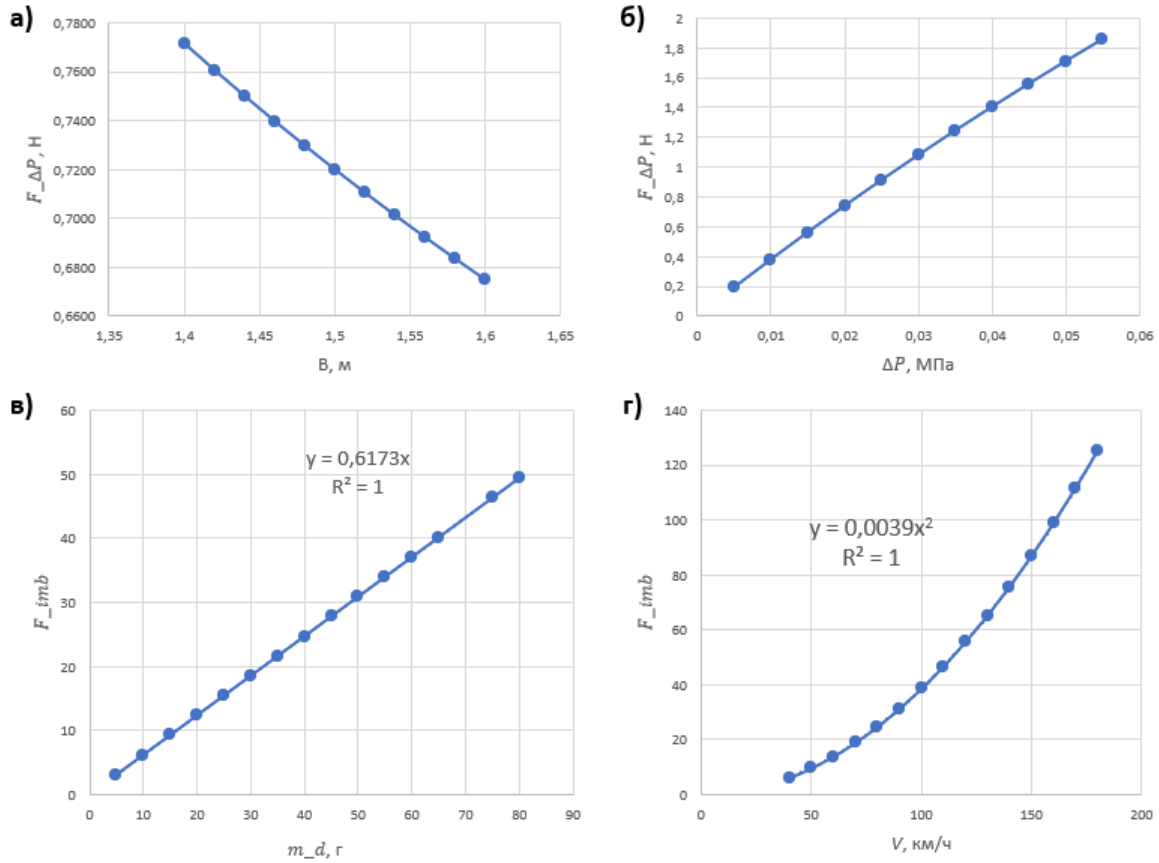


Рис. 7. Графики зависимостей боковой силы от шинно-дисковых факторов: а) зависимость боковой силы разницы давлений от ширины колеи автомобиля; б) зависимость боковой силы разницы давлений от различного давления в шине; в) линейная зависимость боковой силы дисбаланса колеса от неуравновешенной массы; г) степенная зависимость боковой силы дисбаланса колеса от скорости движения автомобиля при одинаковой неуравновешенной массе

С учетом принятых допущений установлено, что для технически исправного автомобиля на дорогах с небольшой глубиной колеи (до 20 мм) основной вклад в боковой увод вносят шинно-дисковые факторы, преимущественно дисбаланс колес. При ухудшении состояния дорожного покрытия доминирующим становится фактор взаимодействия с дорожными неровностями, в частности с колеей. Наиболее опасными являются сочетания крутых стенок колеи и повышенной скорости, когда даже незначительный дисбаланс провоцирует резонансное раскачивание и возникновение бокового возмущения, способного при отстутствии корректирующих действий водителя перерасти в потерю курсовой устойчивости.

Список литературы

1. Сведения о показателях безопасности дорожного движения: [сайт]. URL: http://stat.gibdd.ru/. – (дата обращения: 05.05.2026).

2. Научный центр безопасности дорожного движения: [сайт]. URL: https://нцбдд.мвд.рф/. – (дата обращения: 05.05.2026).

3. Статистика ремонтов автомобилей за 2023 год: наиболее частые поломки: [сайт]. URL: https://www.gazeta.ru/auto/news/2023/12/26/22000705.shtml. – (дата обращения: 05.05.2026).

4. Курносов В.А. Общие аспекты технического обслуживания автомобилей / Студенческий форум. – 2025. - № 3. – С. 61-62.

5. Подумерья А.В. Совершенствование технического обслуживания автомобилей с применением диагностики / Актуальные проблемы развития научных исследований: теоретический и практический взгляд. Сборник статей международной научно-практической конференции. – 2025. – С. 35-37.

6. Ануфриев К.А., Евтюков С.А. Оценка влияния двухсторонней связи подсистемы "Участник дорожного движения-Автомобильная дорога" на вероятность ДТП / Грузовик. – 2025. – № 12. – С. 33-36.

7. Лушников Н. А., Лушников П. А., Ковалев Д. И. Об определении допустимых углов наклона боковых стенок колеи по условию устойчивости автомобиля против заноса на мокром покрытии // Дороги имосты. – 2022. – №1 (47). – С. 152–160.

8. Александров А. С., Семёнова Т. В. Метод расчёта предельной глубины колеи для безопасного движения // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1. – С. 104–116.

9. Цуканов И.Ю., Любичева А.Н., Ковалев Д.И. Оценка боковой силы при взаимодействии колеса автомобиля с дорожной колеей / Мир транспорта. – 2022. - № 5. – С. 6-12.

10. Дыров П.А. Стратегии технического обслуживания и текущего ремонта современных автомобилей / Современные тенденции технологического развития АПК. Материалы международной научно-практической конференции. – 2023. – С. 75-80.

References

1. Information on road safety indicators: [website]. URL: http://stat.gibdd.ru /. – (date of access: 05.05.2026).

2. Scientific Center for Road Safety: [website]. URL: https://нцбдд.мвд.рф /. – (date of access: 05.05.2026).

3. Car repair statistics for 2023: the most frequent breakdowns: [website]. URL: https://www.gazeta.ru/auto/news/2023/12/26/22000705.shtml. – (date of reference: 05.05.2026).

4. Kurnosov V.A. General aspects of car maintenance / Student Forum. – 2025. - No. 3. – pp. 61-62.

5. Podumerya A.V. Improving car maintenance using diagnostics / Actual problems of scientific research development: a theoretical and practical view. Collection of articles of the international scientific and practical conference. - 2025. – pp. 35-37.

6. Anufriev K.A., Yevtyukov S.A. Assessment of the influence of two–way communication of the subsystem "Road user-Highway" on the probability of an accident / Truck. – 2025. – No. 12. – pp. 33-36.

7. Lushnikov N. A., Lushnikov P. A., Kovalev D. I. On determining the permissible angles of inclination of the side walls of the track according to the condition of stability of the car against skidding on a wet surface // Roads and bridges. – 2022. – №1 (47). – Pp. 152-160.

8. Alexandrov A. S., Semenova T. V. Method of calculating the maximum track depth for safe movement // Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport. – 2022. – No. 1. – pp. 104-116.

9. Tsukanov I.Yu., Lyubicheva A.N., Kovalev D.I. Assessment of lateral force in the interaction of a car wheel with a road track / Mir transport. - 2022. - No. 5. – pp. 6-12.

10. Dyrov P.A. Strategies of maintenance and current repair of modern cars / Modern trends in the technological development of agriculture. Materials of the international scientific and practical conference. - 2023. – pp. 75-80.

Popkov T.B., Evtyukov S.A., Anufriev K.A.

VEHICLE WITHDRAWAL IN STRAIGHT-LINE MOTION AS A RESULT OF IMPERFECTIONS IN THE "WHEEL-HIGHWAY" SUBSYSTEM (USING TIRES AND RIMS AS AN EXAMPLE)

Abstract. *The article considers the problem of steering a car away from straight-line traffic caused by the combined influence of imperfections in the "wheel-highway" subsystem and the road gauge. An integral computational and experimental model of the total lateral force is proposed, combining the force factors from its interaction with the track and from tire-disc factors such as pressure differences in the wheels, imbalance, disc runout and uneven tread wear. Geometric track parameters have been experimentally determined on roads of categories 1-3. It is established that the angle of inclination of the track walls is a critical factor, and the track depth has a linear relationship. Among the tire-disc factors, wheel imbalance dominates, the force of which increases in proportion to the square of the speed. It is shown that dangerous combinations of steep track walls and high speed can cause loss of directional stability even in a technically sound car.*

Keywords: road safety, lateral withdrawal, tire, wheel, Driver-Vehicle-Road-Environment.

Сведения об авторах	Information about the authors
Попков Тимур Борисович Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия аспирант *e-mail: 9401594@gmail.com*	**Popkov Timur Borisovich** *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia* postgraduate student *e-mail: 9401594@gmail.com*
Евтюков Сергей Аркадьевич Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия Профессор д.т.н., *e-mail: s.a.evt@mail.ru*	**Evtyukov Sergey Arkadyevich** *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia* Professor Doctor of Technical Sciences *e-mail: s.a.evt@mail.ru*
Ануфриев Кирилл Андреевич Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия аспирант *e-mail: k.anufry@yandex.ru*	**Kirill Andreevich Anufriev** *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St Petersburg, Russia* postgraduate student *e-mail: k.anufry@yandex.ru*

УДК 656.13

Феофилова А.А., Ху Лижу

ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫЕЗДА НАСЕЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Аннотация. *В статье выполнен интеллектуальный анализ временных закономерностей поступления транспортных средств на сеть улиц и дорог при эвакуации населения в условиях чрезвычайных ситуаций различного характера. В отличие от исследований отдельных событий, совместное рассмотрение опубликованных сведений позволило сопоставить скорость формирования основной части потока и продолжительность последующего выезда. Для обработки исходных материалов применены интервальная интерполяция, описательная статистика, корреляционный анализ, логарифмическое преобразование, группирование методом k-средних, однофакторный анализ и непараметрическая проверка различий. Установлено, что определяющим признаком различия временных характеристик является возможность заблаговременного прогнозирования опасного события. При внезапных и быстро развивающихся чрезвычайных ситуациях основная часть транспортных средств поступает на сеть в течение относительно короткого времени, тогда как при прогнозируемом урагане выезд начинается заблаговременно и продолжается десятки часов. Среди быстро развивающихся чрезвычайных ситуаций наиболее продолжительная поздняя стадия выезда выявлена при природных пожарах. Расчетная апробация выполнена по восьми совокупностям наблюдений. Дополнительно получена зависимость для определения числа транспортных средств, поступающих на сеть улиц и дорог в последовательные расчетные интервалы. Практическая значимость результатов состоит в возможности использовать установленные закономерности при задании потока транспортных средств на маршрутах эвакуации и расчете временного индекса эвакуации, характеризующего отношение продолжительности движения по маршруту эвакуации к расчетному времени движения в обычных условиях.*

Ключевые слова: *чрезвычайная ситуация; эвакуация населения; автомобильный транспорт; время начала выезда; временной профиль; интеллектуальный анализ данных; временной индекс эвакуации.*

Постановка задачи

Самостоятельный выезд населения на личных автомобилях является преобладающим способом перемещения при многих крупномасштабных эвакуациях. Для транспортной системы определяющее значение имеют не только общая численность эвакуируемых и доля эвакуируемых, использующих личные автомобили, но и

распределение времени начала выезда. От него зависит число транспортных средств, одновременно поступающих на сеть улиц и дорог [1, 6, 16].

Одинаковое итоговое число автомобилей может привести к различным состояниям сети. Сосредоточенный выезд вызывает резкое увеличение интенсивности движения и образование очередей на маршрутах эвакуации. Более продолжительный выезд снижает максимальную интенсивность, но увеличивает период, в течение которого часть населения остается в опасной зоне. Поэтому среднее время начала движения и общая продолжительность эвакуации по отдельности не дают полного представления о поступлении транспортных средств на сеть.

Сопоставление фактически состоявшихся эвакуаций затрудняется различиями исходных данных. Опросы населения отражают время получения предупреждения, принятия решения, подготовки и начала движения. Дорожные средства учета фиксируют момент прохождения определенного участка, геолокационные данные позволяют восстанавливать перемещения владельцев цифровых устройств. Отсчет времени может начинаться от возникновения чрезвычайной ситуации, передачи предупреждения, введения распоряжения об эвакуации или выявленного увеличения интенсивности движения.

Поставленная задача заключается в разработке способа сопоставления таких материалов без объединения индивидуальных наблюдений разной природы. Необходимо привести опубликованные распределения к общей системе временных характеристик, установить различия между видами чрезвычайных ситуаций и определить число транспортных средств, начинающих движение в последовательные расчетные интервалы.

Анализ последних исследований

Исследования транспортного обеспечения эвакуации охватывают поведение населения, выбор способа передвижения, времени начала выезда, маршрута и пункта назначения, распределение потоков и управление пропускной способностью сети. В обзорных работах систематизированы модели крупномасштабной эвакуации и показана необходимость совместного учета транспортных и поведенческих факторов [1, 6, 16].

В исследовании авторов [2] показано, что первоначально выбранный маршрут может изменяться по мере поступления информации и изменения состояния сети [2]. Для ураганов время отправления рассматривается совместно с продолжительностью поездки, характеристиками домохозяйства и ожидаемым развитием опасного события [5, 8, 9]. Эти модели позволяют оценивать влияние отдельных факторов, однако обычно разрабатываются для одного события или одного вида чрезвычайной ситуации.

Фактические распределения времени выезда получены по результатам опросов после цунами, природных пожаров и ураганов [3, 4, 7, 13, 14]. Расчетные исследования показывают, что продолжительность подготовки, очередность введения распоряжений и доступность автомобилей существенно изменяют условия движения и время освобождения территории [10].

В последние годы состав исходной информации расширился за счет геолокационных записей и обезличенных сведений о сетевой мобильности. Такие данные использованы для определения времени начала выезда, маршрутов и пунктов назначения при природных пожарах [11, 12, 15, 17] и при цунами [18]. Они повышают временное разрешение наблюдений, но не устраняют различия начальных отметок и состава рассматриваемых групп населения.

В публикациях авторов Королева М. Е., Королева Е. А., Чичкан Р. Р. статистические методы применены для сопоставления объектов транспортной инфраструктуры [19], а приемы предиктивной аналитики использованы Катуновым И.

В., Бурлаковой Г. Ю. при обработке результатов диагностики дорожных покрытий [20]. Эти исследования подтверждают востребованность количественной обработки разнородных транспортных данных.

Таким образом, опубликованные работы подробно раскрывают поведение домохозяйств, выбор маршрута и особенности отдельных эвакуаций. Вместе с тем отсутствует единая процедура, позволяющая сопоставить время формирования основной части потока и продолжительность поздних выездов при чрезвычайных ситуациях различного характера, а затем перейти от накопленного распределения к числу автомобилей, поступающих на сеть по расчетным интервалам.

Цель работы

Цель работы состоит в выявлении и количественной оценке временных закономерностей выезда населения автомобильным транспортом при чрезвычайных ситуациях различного характера на основе сопоставления опубликованных результатов опросов и дорожного учета.

Для достижения поставленной цели необходимо определить сопоставимые временные характеристики, проверить различия между рассматриваемыми видами чрезвычайных ситуаций, оценить качество полученного группирования при различном числе выделяемых групп и получить зависимость для расчета числа транспортных средств, начинающих движение в каждом интервале времени.

Научная новизна состоит в обосновании методического подхода, который объединяет приведение разнородных временных распределений к системе взаимосвязанных показателей, их совместное статистическое сопоставление и преобразование накопленного распределения в интервальное поступление транспортных средств. Для рассмотренной совокупности фактически состоявшихся эвакуаций установлена двухуровневая закономерность. Основное различие определяется возможностью заблаговременного прогнозирования опасного воздействия, дополнительное различие внутри быстро развивающихся чрезвычайных ситуаций связано с характером опасности и продолжительностью поздней стадии выезда.

Основная часть

Под методическим подходом в настоящем исследовании понимается последовательность перехода от опубликованных сведений о времени выезда к характеристикам поступления транспортных средств на маршруты эвакуации. Сначала для каждого случая устанавливается начальная отметка времени и строится накопленное распределение доли начавших движение или прошедших контрольный участок транспортных средств. Затем из этого распределения определяются времена достижения 50 и 90% итогового числа наблюдений и отношение указанных времен. После статистического сопоставления и группирования накопленное распределение преобразуется в число транспортных средств, начинающих движение в последовательные интервалы времени.

Выбор времени достижения 50% обусловлен тем, что оно характеризует основной временной масштаб выезда и меньше зависит от единичных поздних наблюдений. Время достижения 90% отражает продолжительность активной и поздней стадий. Их отношение позволяет отделить общий временной масштаб от формы поздней стадии и сопоставлять случаи, различающиеся по абсолютной продолжительности на несколько порядков. Логарифмическое преобразование используется только при группировании и статистической проверке, чтобы значения, измеряемые минутами и десятками часов, могли рассматриваться в одной системе координат.

Сопоставление разнородных источников не означает объединения исходных наблюдений в единую однородную выборку. Для каждого случая учитываются особенности получения данных, начало отсчета времени и содержание фиксируемого временного интервала. Опросные данные отражают указанное участниками время подготовки к выезду или начала движения. Данные дорожного учета характеризуют момент прохождения транспортными средствами контрольного участка. Геолокационные данные описывают перемещение владельцев цифровых устройств. Поэтому полученные значения рассматриваются как характеристики отдельных временных этапов эвакуационного процесса, выявленных по различным источникам данных, а не как измерения одной и той же случайной величины. Такой порядок сохраняет содержание каждого источника и одновременно позволяет выявлять общие закономерности. Завершающий переход к интервальному числу транспортных средств связывает результаты анализа с расчетом условий движения на маршрутах эвакуации.

В исследование включены случаи, удовлетворяющие четырем условиям. 1) Источник должен содержать сведения о фактически состоявшейся эвакуации. 2) Личные автомобили должны составлять значимую часть использованных способов передвижения. 3) Опубликованное распределение должно позволять определить время начала выезда или прохождения контрольного участка. 4) Начальная отметка времени должна устанавливаться из текста, таблицы или официальной временной последовательности события. Эвакуации, связанные с пандемиями, не рассматривались.

Основу расчетной совокупности составили сведения об эвакуации при землетрясении и цунами 2011 г. в Натори и Кесеннуме [3], природном пожаре в Форт-Мак-Маррее 2016 г. [4], пожаре «Кэмп-Файр» 2018 г. [7, 13] и урагане «Ирма» 2017 г. [9]. Распределение для Натори восстановлено по результатам опроса, опубликованным Х. Мураками, К. Такимото и А. Помонисом в докладе «Tsunami Evacuation Process and Human Loss Distribution in the 2011 Great East Japan Earthquake: A Case Study of Natori City, Miyagi Prefecture» на 15-й Всемирной конференции по сейсмостойкому строительству в 2012 г. Для проверки интерпретации привлечены материалы землетрясения на полуострове Ното [18], пожаров «Маршалл» [14] и «Кинкейд» [11, 12, 15], расчетного исследования пожара «Кэмп-Файр» [10] и эвакуаций в провинции Альберта [17]. Время до начала движения отделено от продолжительности поездки. Подготовительный интервал соответствует периоду между получением информации об угрозе и началом перемещения. Дорожный учет фиксирует транспортное средство после прохождения части маршрута, поэтому включает время, затраченное на движение от места проживания до контрольного участка. Опросные, дорожные и геолокационные сведения использовались раздельно; их сопоставление выполнялось только по извлеченным временным характеристикам [6, 7, 11]. Исходные данные и принятые начальные отметки времени приведены в таблице 1.

Суммарный объем опросных выборок составил 4691 респондент. Это значение не рассматривается как единая выборка индивидуальных наблюдений, поскольку содержание вопросов и состав участников различались. По четырем территориям, затронутым ураганом «Ирма», дорожными средствами учета зарегистрировано 570 392 автомобиля. Данное число также не соответствует количеству уникальных домохозяйств, поскольку отражает прохождение транспортных средств через контрольные участки. Единицей статистического сопоставления принят территориальный временной профиль выезда, сформированный по накопленному распределению выездов и характеризующим его временным показателям. Восемь профилей не рассматриваются как независимые чрезвычайные ситуации. Четыре профиля урагана «Ирма» отражают различия в организации выезда на отдельных территориях в пределах одного события. Поэтому они используются для анализа

структуры временных характеристик рассматриваемой совокупности, но не интерпретируются как повторные независимые наблюдения эвакуации при урагане.

Таблица 1

Исходные данные и принятые начальные отметки времени

Рассматриваемый случай	Тип ЧС	Вид исходных данных	Количество наблюдений	Начальная отметка времени
Натори, Япония	Землетрясение и цунами	Опрос участников, выехавших на автомобилях	173 чел.	Землетрясение в 14:46
Кесеннума, Япония	Землетрясение и цунами	Муниципальный опрос, выборка выехавших на автомобилях	3712 чел.	Землетрясение
Форт-Мак-Маррей, Канада	Природный пожар	Опрос времени подготовки и выезда	409 чел.	Индивидуальный момент получения информации о необходимости эвакуации
Пожар «Кэмп-Файр», США	Природный пожар	Послесобытийный опрос и официальная временная последовательность	397 чел.	Общегородское распоряжение для Парадайса в 08:03
Флорида-Кис, США	Ураган	Детекторы транспорта	40 731 авт.	Выявленное начало увеличения транспортного потока
Юго-восточная Флорида, США	Ураган	Детекторы транспорта	276 052 авт.	Выявленное начало увеличения транспортного потока
Нейплс, США	Ураган	Детекторы транспорта	123 202 авт.	Выявленное начало увеличения транспортного потока
Тампа, США	Ураган	Детекторы транспорта	130 407 авт.	Выявленное начало увеличения транспортного потока

Общая последовательность разработанного подхода приведена на рисунке 1. Она включает установление начальной отметки, построение накопленного распределения, определение сопоставимых временных характеристик, статистическую проверку различий, группирование и расчет числа транспортных средств по последовательным интервалам времени. Этапы выявления временных закономерностей выезда населения автомобильным транспортом в условиях чрезвычайных ситуаций показаны на рисунке 1.

Для рассматриваемого случая чрезвычайной ситуации типа h накопленное распределение выездов представлено функцией

$$F_h(\tau) = \frac{E_{\text{эв}}^{(h)}(\tau)}{N_h}, \qquad 0 \le F_h(\tau) \le 1, \tag{1}$$

где $E_{\text{эв}}^{(h)}(\tau)$ обозначает накопленное число транспортных средств, начавших движение к моменту τ;

N_h представляет итоговое число учтенных транспортных средств;
$\tau = t - t_0^{(h)}$ соответствует времени относительно принятой начальной отметки.

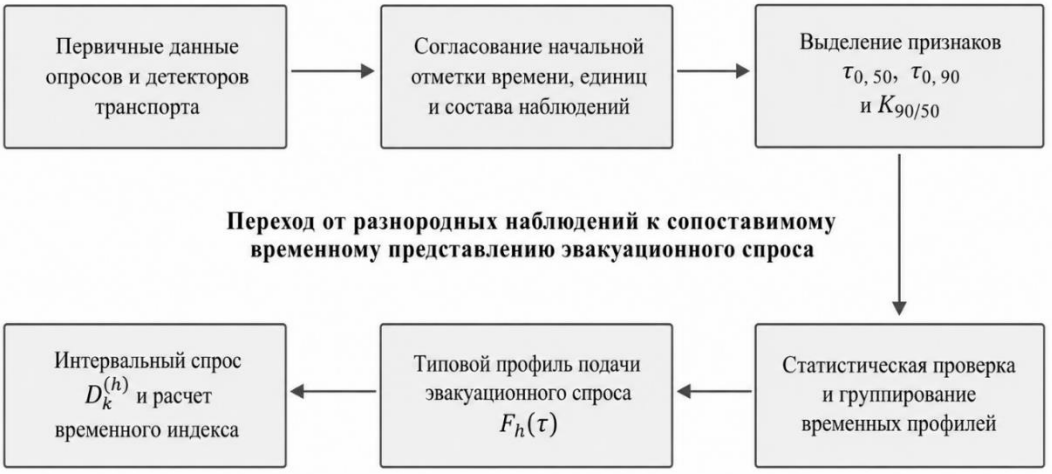


Рис. 1. Этапы выявления временных закономерностей выезда населения автомобильным транспортом

Время достижения заданной доли накопленного числа выездов определяется как квантиль распределения.

$$\tau_{p,h} = \inf\{\tau \geq 0 : F_h(\tau) \geq p\}. \quad (2)$$

В качестве основных характеристик приняты $\tau_{0,50}$ и $\tau_{0,90}$. Первая характеризует время формирования половины потока, вторая отражает продолжительность выезда до достижения 90% накопленного числа транспортных средств. Относительная продолжительность поздней стадии определяется выражением

$$K_{90/50,h} = \frac{\tau_{0,90,h}}{\tau_{0,50,h}}. \quad (3)$$

Для распределений, опубликованных по временным интервалам, квантиль внутри интервала $[a_j; b_j]$ определялся линейной интерполяцией.

$$\tau_p = a_j + \frac{p - F_h(a_j)}{F_h(b_j) - F_h(a_j)}(b_j - a_j). \quad (4)$$

Интерполяция применена к опубликованным интервалам Натори и Кесеннума. Для Форт-Мак-Маррея использованы категории продолжительности подготовки, приведенные в первичном исследовании. Для пожара «Кэмп-Файр» медиана принята по тексту публикации, время достижения 90% определено по накопительной кривой и округлено до 11:00. Материалы по урагану «Ирма» содержали время достижения 50, 90, 99 и 100% регионального потока, поэтому дополнительное восстановление не требовалось.

Для каждого вида чрезвычайной ситуации рассчитаны среднее $\overline{\tau}$, медиана Me, выборочное стандартное отклонение s, минимум, максимум, размах, первый и третий квартили, межквартильный размах и коэффициент асимметрии. Коэффициент вариации определялся как

$$V = s/t \cdot 100\%. \quad (5)$$

Поскольку продолжительность выезда различалась на несколько порядков, при группировании и параметрической проверке использованы логарифмированные значения временных характеристик.

$$x_1 = \log_{10}\tau_{0,50}, \qquad x_2 = \log_{10}\tau_{0,90}. \quad (6)$$

Группирование выполнено методом k-средних при $k = 2$, $k = 3$ и $k = 4$. Качество разделения оценивалось силуэтным коэффициентом. Для логарифмированных показателей рассчитаны однофакторные статистики, различия дополнительно проверены критерием Краскела–Уоллиса. Доля межгрупповой изменчивости определялась как

$$\eta^2 = \frac{SS_{\text{меж}}}{SS_{\text{общ}}}, \quad (7)$$

где $SS_{\text{меж}}$ представляет сумму квадратов отклонений между группами;

$SS_{\text{общ}}$ соответствует общей сумме квадратов отклонений.

Накопленное распределение преобразуется в число транспортных средств, начинающих движение в интервале k длительностью Δ.

$$D_k^{(h)} = N_h\left[F_h(k\Delta) - F_h\big((k-1)\Delta\big)\right]. \quad (8)$$

Показатель $D_k^{(h)}$ определяет количество автомобилей, начинающих движение в каждом расчетном интервале, и характеризует концентрацию транспортных средств во времени.

Результаты и обсуждение

Исходные распределения относятся к различным временным масштабам. В Натори 31,8% автомобильных выездов началось в первые 10 мин после землетрясения, 60,7% в течение 20 мин, 88,4% в течение 40 мин и 95,4% в течение 60 мин. В Кесеннуме около 45,9% участников автомобильной эвакуации выехали в первые 10 мин, 69,2% в течение 15 мин и 89,0% в течение 30 мин; позднее начали движение около 11,0% [3].

В Форт-Мак-Маррее 11,7% респондентов начали выезд без дополнительной подготовки, еще 16,9% затратили менее 15 мин. На интервалы от 15 до 60 мин пришлось 50,3% ответов. В течение первого часа после получения информации о необходимости эвакуации подготовились и начали движение 78,9% опрошенных; от 75 до 120 мин потребовалось 12,5%, более 120 мин 8,6% [4]. Начальная отметка в данном случае индивидуальна и соответствует моменту осознания необходимости выезда.

Пожар «Кэмп-Файр» возник между 06:15 и 06:30. Первые распоряжения для восточной части Парадайса были введены до общегородского распоряжения, распространенного в 08:03 [7, 13]. К этому моменту около 25% участников опроса уже покинули территорию. Медианное время отправления соответствовало 09:00, среднее 09:33. По накопительной кривой примерно 77% участников выехали к 10:00, около 90% к 11:00 и 95–97% к 12:00 [7]. Официальная реконструкция фиксирует увеличение движения приблизительно с 08:15 и образование затора к 08:30; основная эвакуация продолжалась до 13:45 [13]. Представленные исходные данные сведены в таблицу 2.

Рассчитанные временные характеристики приведены в таблице 3. Для территорий, затронутых ураганом, значения представлены в часах и минутах, поскольку статистическое группирование выполнялось в единой минутной шкале.

Таблица 2

Изменение доли начавших выезд по временным интервалам

Событие	Первые выезды	Основная часть выездов	Поздние выезды
Натори	0–5 мин: 8,1%; 5–10 мин: 23,7%	10–20 мин: 28,9%; 20–40 мин: 27,7%	40–60 мин: 6,9%; после 60 мин: 4,6%
Кесеннума	0–5 мин: около 21,4%; 5–10 мин: около 24,5%	10–15 мин: около 23,3%; 15–30 мин: около 19,8%	После 30 мин: около 11,0%
Форт-Мак-Маррей	Без дополнительной подготовки: 11,7%; менее 15 мин: 16,9%	15–60 мин: 50,3%	75–120 мин: 12,5%; более 120 мин: 8,6%
Пожар «Кэмп-Файр»	До общегородского распоряжения в 08:03: около 25%	08:03–10:00: еще около 52%	10:00–12:00: около 19%; после 12:00: около 4%

Таблица 3

Временные характеристики рассматриваемых случаев

Рассматриваемый случай	Тип данных	$\tau_{0,50}$	$\tau_{0,90}$	$K_{90/50}$	Способ определения
Натори	Опрос автомобильных эвакуирующихся	16,3 мин	44,5 мин	2,73	Расчет по интервальному распределению
Кесеннума	Опрос автомобильных эвакуирующихся	10,9 мин	около 30,0 мин	2,75	Расчет по опубликованной диаграмме
Форт-Мак-Маррей	Опрос; автомобиль использовали 93,5% респондентов	30 мин	120 мин	4,00	Наблюдаемые категории времени подготовки
Пожар «Кэмп-Файр»	Опрос и официальная временная последовательность	57 мин	около 177 мин	3,11	Медиана и оценка по накопительной кривой
Флорида-Кис	Детекторы транспорта	34 ч; 2040 мин	63 ч; 3780 мин	1,85	Прохождение контрольной границы
Юго-восточная Флорида	Детекторы транспорта	23 ч; 1380 мин	32 ч; 1920 мин	1,39	Прохождение контрольной границы
Нейплс	Детекторы транспорта	58 ч; 3480 мин	87 ч; 5220 мин	1,50	Прохождение контрольной границы
Тампа	Детекторы транспорта	17 ч; 1020 мин	30 ч; 1800 мин	1,76	Прохождение контрольной границы

Среднее время достижения 50% накопленного числа выездов составило 13,60 мин при цунами и 43,50 мин при природных пожарах. Для территорий, затронутых ураганом, среднее значение достигло 33,00 ч. Время достижения 90% составило соответственно 37,25 мин, 148,50 мин и 53,00 ч. Различие выявлено не только между внезапными и прогнозируемыми событиями. В группе быстро развивающихся чрезвычайных ситуаций

выезд при природных пожарах продолжался дольше, чем при угрозе цунами. Для обобщения различий между видами чрезвычайных ситуаций рассчитаны описательные характеристики времени достижения 50% и 90% накопленного числа выездов, представленные в таблице 4.

Таблица 4

Описательные характеристики $\tau_{0,50}$ и $\tau_{0,90}$ по видам чрезвычайных ситуаций

Тип ЧС	Показатель	n	Среднее	Медиана	s	V,%	Минимум–максимум
Цунами	$\tau_{0,50}$, мин	2	13,60	13,60	3,82	28,08	10,90–16,30
Цунами	$\tau_{0,90}$, мин	2	37,25	37,25	10,25	27,52	30,00–44,50
Природный пожар	$\tau_{0,50}$, мин	2	43,50	43,50	19,09	43,89	30,00–57,00
Природный пожар	$\tau_{0,90}$, мин	2	148,50	148,50	40,31	27,14	120,00–177,00
Ураган	$\tau_{0,50}$, ч	4	33,00	28,50	18,09	54,83	17,00–58,00
Ураган	$\tau_{0,90}$, ч	4	53,00	47,50	27,24	51,40	30,00–87,00

Для уточнения различий в разбросе временных характеристик рассчитаны квартильные показатели и коэффициент асимметрии, представленные в таблице 5.

Таблица 5

Квартильные характеристики и асимметрия времени выезда

Тип ЧС	Показатель	Q_1	Q_3	IQR	Асимметрия
Цунами	$\tau_{0,50}$, мин	12,25	14,95	2,70	–
Цунами	$\tau_{0,90}$, мин	33,63	40,88	7,25	–
Природный пожар	$\tau_{0,50}$, мин	36,75	50,25	13,50	–
Природный пожар	$\tau_{0,90}$, мин	134,25	162,75	28,50	–
Ураган	$\tau_{0,50}$, ч	21,50	40,00	18,50	1,19
Ураган	$\tau_{0,90}$, ч	31,50	69,00	37,50	0,62

Квартили для двух рассматриваемых случаев приведены как расчетные характеристики и не интерпретируются как устойчивые оценки совокупности. Коэффициент асимметрии для групп из двух случаев не определялся. Для урагана положительная асимметрия $\tau_{0,50}$ связана с продолжительным выездом в районе Нейплса. Коэффициент вариации свыше 50% показывает, что территориальные различия сохраняются в пределах одного урагана и единой системы дорожного учета.

Наибольшая относительная продолжительность поздней стадии выявлена при природных пожарах. Среднее отношение $\tau_{0,90}$ к $\tau_{0,50}$ равно 3,553; для цунами оно составляет 2,741, для урагана 1,627. Следовательно, после достижения половины итогового числа выездов поступление транспортных средств при пожарах продолжалось относительно дольше. Результат согласуется с неодновременным обнаружением угрозы,

последовательным введением распоряжений и различиями в продолжительности подготовки домохозяйств [4, 7, 14]. Рассчитанные значения отношения $K_{90/50}$ и характеристики их разброса по видам чрезвычайных ситуаций приведены в таблице 6.

Таблица 6

Описательные характеристики отношения $K_{90/50}$

Тип ЧС	n	Среднее	Медиана	s	V,%	Минимум–максимум
Цунами	2	2,741	2,741	0,016	0,57	2,730–2,752
Природный пожар	2	3,553	3,553	0,633	17,81	3,105–4,000
Ураган	4	1,627	1,632	0,217	13,36	1,391–1,853

Рассматриваемые случаи в координатах $\tau_{0,50}$ и $\tau_{0,90}$ представлены на рисунке 2. Логарифмическая шкала позволяет сопоставить события, продолжительность которых различается на несколько порядков.

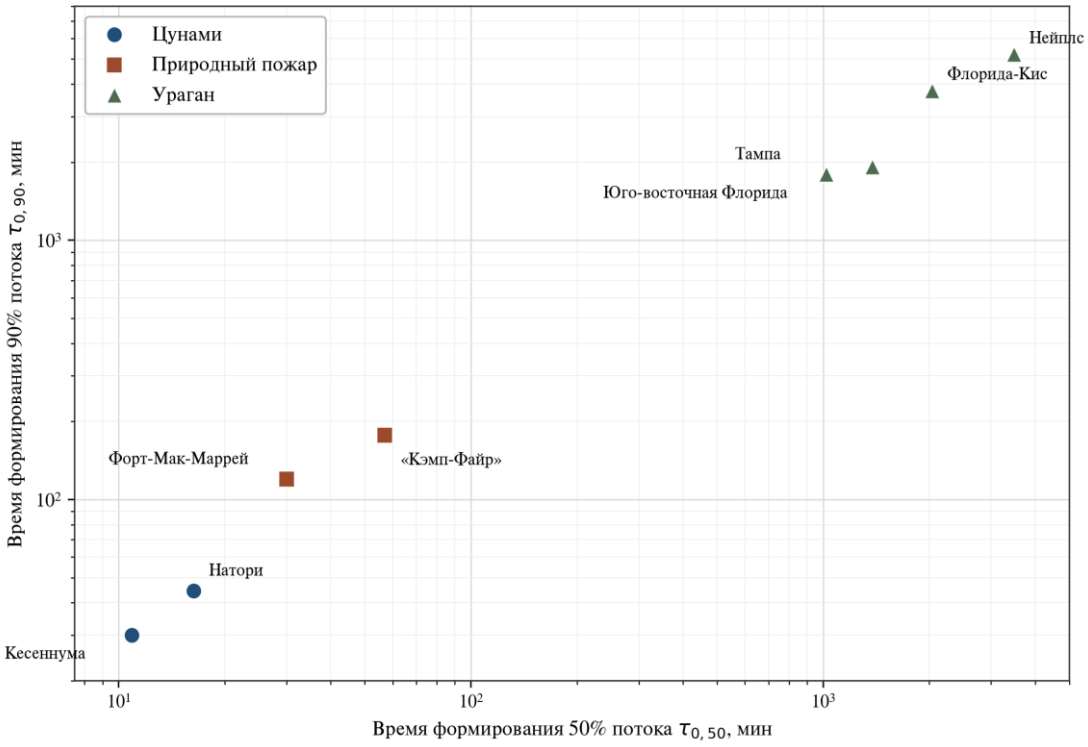


Рис. 2. Сопоставление времени достижения 50% и 90% накопленного числа выездов

При $k = 2$ данные разделились на эвакуации, продолжавшиеся минуты или первые часы, и заблаговременные продолжительные эвакуации. В первую группу вошли случаи цунами и природных пожаров, во вторую – четыре территории урагана. Силуэтный коэффициент составил 0,783. Наибольшее из рассмотренных значений показывает, что первичное разделение связано с возможностью заблаговременно прогнозировать опасное воздействие.

При $k = 3$ образованы отдельные группы цунами, природных пожаров и урагана. Их состав полностью совпал с классификацией по виду чрезвычайной ситуации, силуэтный коэффициент составил 0,716. При $k = 4$ территории урагана разделились на две подгруппы, однако силуэтный коэффициент снизился до 0,624. Дополнительное разделение не улучшило общую структуру данных. Состав полученных групп и значения силуэтного коэффициента при выделении двух, трех и четырех групп приведены в таблице 7.

Таблица 7

Состав групп по временным характеристикам выезда

Число групп	Силуэтный коэффициент	Состав групп
2	0,783	Цунами и природные пожары, выезд в пределах минут и первых часов; ураган, заблаговременный продолжительный выезд
3	0,716	Отдельные группы цунами, природных пожаров и урагана
4	0,624	Разделение территорий урагана на две подгруппы при снижении качества группирования

Группирование использовано для выявления закономерностей в рассматриваемой совокупности временных профилей, а не для создания классификатора новых чрезвычайных ситуаций. Силуэтный коэффициент оценивает качество выделения групп только по исходным наблюдениям и не является инструментом переноса полученного результата на другие события. Данные по чрезвычайным ситуациям, не вошедшим в расчетную совокупность из-за отсутствия необходимых временных квантилей, использованы для сопоставления установленных временных характеристик. Такое сопоставление имеет описательный характер и не заменяет независимую проверку закономерности на расширенной совокупности событий.

Средние положения трех групп составили 13,33 и 36,54 мин для цунами, 41,35 и 145,74 мин для природных пожаров, 29,63 и 47,89 ч для урагана по $\tau_{0,50}$ и $\tau_{0,90}$ соответственно (рисунок 3). По сравнению с цунами значение $\tau_{0,50}$ для природных пожаров больше в 3,10 раза, значение $\tau_{0,90}$ в 3,99 раза. Для урагана эти характеристики превосходят значения природных пожаров в 43,00 и 19,72 раза.

Параметрическая проверка логарифмированных значений дала следующие результаты: $F_{\tau_{0,50}}(2; 5) = 85{,}70,\ p = 0{,}000135;\ F_{\tau_{0,90}}(2; 5) = 74{,}78,\ p = 0{,}000188.$

Доли межгрупповой изменчивости составили $\eta^2_{\tau_{0,50}} = 0{,}972,\ \eta^2_{\tau_{0,90}} = 0{,}968.$

Непараметрическая проверка для обоих показателей дала $H(2) = 6{,}00,\ p = 0{,}0498.$

Полученные значения показывают различия между временными профилями в рассматриваемой совокупности. Результаты однофакторного дисперсионного анализа и проверки по критерию Краскела–Уоллиса согласуются с оценкой качества группирования по силуэтному коэффициенту при различном числе выделяемых групп. Четыре территориальных профиля урагана «Ирма» относятся к одной чрезвычайной ситуации и не рассматриваются как независимые наблюдения. Поэтому результаты статистической проверки характеризуют структуру временных характеристик фактически состоявшихся эвакуаций. На этой основе установлена двухуровневая закономерность формирования выезда населения автомобильным транспортом.

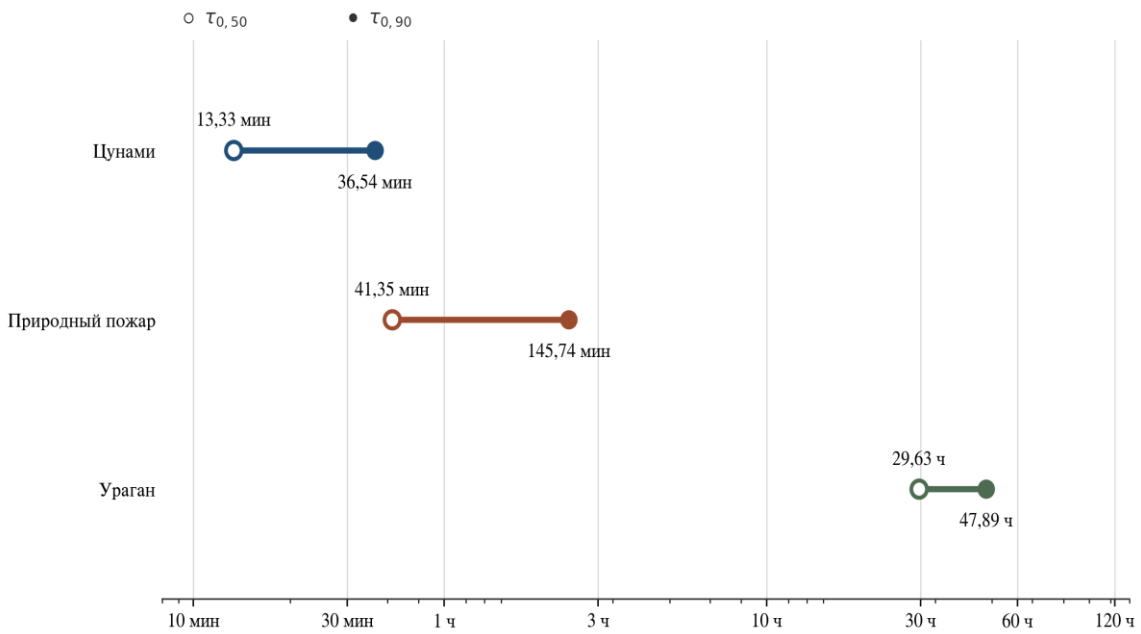


Рис. 3. Средние положения групп по времени достижения 50 и 90% накопленного числа выездов

Между логарифмированными значениями $\tau_{0,50}$ и $\tau_{0,90}$ установлена тесная связь: $r = 0{,}9959,\ p < 0{,}001$.

Ранговая корреляция характеризуется следующим значением: $\rho = 1{,}000,\ p < 0{,}001$.

Время достижения 50 и 90% накопленного числа выездов отражает общий временной масштаб эвакуации. Вместе с тем показатель $K_{90/50}$ сохраняет самостоятельное значение, поскольку характеризует относительную продолжительность поздней стадии и отделяет продолжительный остаточный выезд при пожаре от более равномерного заблаговременного выезда при урагане.

Дорожные данные по урагану «Ирма» позволяют оценить начало, пик и завершение выезда. В среднем увеличение транспортного потока выявлено за 97,00 ч до выхода урагана на сушу, максимальная интенсивность наблюдалась за 51,00 ч. Время прохождения 99% потока составило в среднем 73,75 ч после выявленного начала, полное завершение 86,50 ч [9]. Статистические характеристики времени начала увеличения транспортного потока, достижения максимальной интенсивности и последующего завершения выезда при урагане «Ирма» представлены в таблице 8.

Пожар «Маршалл» не включен в группирование из-за отсутствия опубликованных медианы и временных квантилей. Его показатели, однако, подтверждают неоднородность индивидуального поведения. В выборке из 129 наблюдений средний интервал между получением информации и выездом составил 136,59 мин при стандартном отклонении 263,44 мин и коэффициенте вариации 192,87%. Средняя продолжительность подготовки равна 63,64 мин при стандартном отклонении 84,50 мин и коэффициенте вариации 132,78% [14]. Распределение имеет выраженную правостороннюю асимметрию, но восстановление τ_0,50 и τ_0,90 без дополнительных предположений невозможно.

Таблица 8

Временные характеристики выезда при урагане «Ирма»

Показатель, ч	Среднее	Медиана	s	V,%	Минимум–максимум	Q_1–Q_3	IQR
Начало потока до выхода урагана на сушу	97,00	107,50	35,94	37,05	47–126	83,00–121,50	38,50
Пиковый поток до выхода урагана на сушу	51,00	47,00	32,14	63,01	21–89	26,25–71,75	45,50
$\tau_{0,50}$	33,00	28,50	18,09	54,83	17–58	21,50–40,00	18,50
$\tau_{0,90}$	53,00	47,50	27,24	51,40	30–87	31,50–69,00	37,50
$\tau_{0,99}$	73,75	75,00	29,26	39,68	41–104	53,75–95,00	41,25
$\tau_{0,100}$	86,50	83,50	31,56	36,49	57–122	61,50–108,50	47,00

Выявленная временная закономерность имеет два уровня. Первый определяется возможностью заблаговременного прогнозирования опасного воздействия. При урагане выезд начинается за несколько суток до выхода опасного явления на сушу. Цунами и быстро распространяющийся природный пожар оставляют значительно меньший запас времени, поэтому основная часть автомобилей поступает на сеть в пределах минут или первых часов. Такое разделение воспроизведено вариантом из двух групп с наибольшим силуэтным коэффициентом.

Второй уровень связан с характером развития опасности и последовательностью реагирования. При землетрясении начальная отметка едина для территории, а начало движения определяется восприятием толчков и предупреждения о цунами. В Натори и Кесеннуме 88–89% участников автомобильной эвакуации начали движение в течение первых 30–40 мин. Геолокационные данные землетрясения на полуострове Ното фиксируют начало перемещения от побережья через 2–6 мин и основной прирост в первые 10 мин [18]. Эти сведения не разделены по способам передвижения и потому не включены в расчетную совокупность, но подтверждают краткий временной масштаб реакции.

При природном пожаре единая начальная отметка для всех домохозяйств часто отсутствует. Люди обнаруживают опасность и получают сообщения в разное время [4, 7]. Последовательное расширение зон предупреждения и распоряжений формирует несколько волн выезда. Геолокационные данные пожара «Кинкейд» подтверждают различия между самостоятельно выехавшими, выехавшими до распоряжения и покинувшими территорию после распоряжения [11, 12]. Для населенных пунктов провинции Альберта накопленные выезды описываются логнормальными и логлогистическими кривыми, общая продолжительность эвакуации составляет от 6 до 10 ч [17]. Поэтому высокое значение $K_{90/50}$ для природных пожаров соответствует многостадийности выезда.

Логнормальные и логлогистические кривые используются для восстановления полного накопленного распределения выездов в пределах отдельной территории. Разработанный подход направлен на сопоставление временных характеристик различных эвакуаций, для которых исходные данные могут быть представлены в неодинаковой форме. Поэтому оба направления обработки дополняют друг друга. При

наличии параметрической кривой значения времени достижения 50% и 90% накопленного числа выездов могут быть определены по ней и далее использованы при сопоставлении временных характеристик эвакуаций.

Для урагана значительный запас времени не исключает высокой транспортной нагрузки. Продолжительный выезд сочетается с территориальными пиками, зависящими от распоряжений, ожидаемой траектории, удаленности пункта назначения и характеристик домохозяйств [5, 8, 9]. Более низкое отношение $K_{90/50}$ не означает малой продолжительности эвакуации. Оно показывает, что после выявленного начала потока переход от 50 к 90% происходил относительно быстрее, чем при природных пожарах. В абсолютном выражении эта стадия занимала от 9 до 29 ч.

Тесная связь $\tau_{0,50}$ и $\tau_{0,90}$ позволяет характеризовать общий временной масштаб одним ведущим показателем. Использование только медианы, однако, приводит к потере информации о поздних выездах. Поэтому для транспортного анализа целесообразно совместно учитывать $\tau_{0,50}$ и $K_{90/50}$. Первая величина характеризует скорость формирования основной части потока, вторую относительную продолжительность поздней стадии. Вектор временных характеристик имеет вид:

$$\mathbf{Z}_h = \left(\tau_{0,50,h}, \tau_{0,90,h}, K_{90/50,h}\right).$$

Вектор не заменяет полное распределение $F_h(\tau)$, но обеспечивает компактное сопоставление событий и позволяет выбирать параметры временного распределения выездов. Расчетные и эмпирические исследования подтверждают, что изменение времени отправления, доли автомобилей и очередности зон влияет на продолжительность освобождения территории и условия движения [10, 15].

Накопленное распределение выездов преобразуется в число транспортных средств, начинающих движение в каждом расчетном интервале. Полученное распределение по времени задает профиль входного потока для расчета движения по маршрутам эвакуации. После распределения транспортных средств между маршрутами для каждого интервала определяется время их прохождения, на основе которого рассчитываются маршрутные, сетевые и интегральные значения временного индекса эвакуации. Временные профили, восстановленные по данным фактически состоявшихся эвакуаций, используются для формирования расчетных сценариев и проверки применимости индекса. Дальнейшая верификация требует сопоставления изменения индекса с наблюдаемыми характеристиками транспортного процесса, включая время прохождения маршрутов, интенсивность движения и формирование очередей на конкретной транспортной сети.

Сопоставимость полученных оценок ограничена природой исходных данных. Опрос фиксирует сообщенный респондентом момент отправления и подвержен ошибке памяти. Дорожные средства учета регистрируют автомобиль в определенной точке и включают неопределенное время движения от места начала поездки. Геолокационные данные имеют высокое временное разрешение, но отражают перемещения владельцев определенных цифровых устройств и требуют отдельного алгоритма определения места проживания и факта эвакуации [11, 12, 18]. Объединение таких наблюдений на уровне индивидуальных записей методически необоснованно.

Дополнительное ограничение связано с различием начальных отметок. В Форт-Мак-Маррее отсчет индивидуален и начинается с осознания необходимости выезда. Для пожара «Кэмп-Файр» он связан с общегородским распоряжением, хотя часть жителей выехала раньше. При урагане отсчет начинается с выявленного дорожными средствами учета увеличения транспортного потока. Поэтому значения характеризуют не один и тот же этап поведения, а сопоставимые временные масштабы, извлеченные из разных видов наблюдений.

Полученные оценки относятся к рассмотренной совокупности эвакуаций. Ее объем ограничен, причем четыре территориальные выборки по урагану «Ирма» характеризуют одно событие и не являются полностью независимыми. Поэтому средние положения групп нельзя считать типичными для всех чрезвычайных ситуаций соответствующего вида. Вместе с тем временные характеристики групп различаются в десятки раз, а состав трех выделенных групп совпадает с разделением наблюдений по видам чрезвычайных ситуаций. Это позволяет говорить о выявленной эмпирической закономерности.

Выводы

Разработанный методический подход позволил привести разнородные сведения о времени начала выезда к сопоставимым характеристикам без объединения индивидуальных наблюдений различной природы. Среднее время достижения 50% накопленного числа выездов составило 13,60 мин при цунами, 43,50 мин при природных пожарах и 33,00 ч при урагане. Для 90% соответствующие значения равны 37,25 мин, 148,50 мин и 53,00 ч. Группирование логарифмированных характеристик показало основное разделение между внезапными или быстро развивающимися событиями и прогнозируемым опасным воздействием. При выделении трех групп их состав полностью совпал с рассматриваемыми видами чрезвычайных ситуаций.

Природные пожары характеризуются наиболее продолжительной поздней стадией относительно времени достижения 50% накопленного числа выездов. Среднее отношение времени достижения 90% накопленного числа выездов ко времени достижения 50% составило 3,553; при цунами оно равно 2,741, при урагане 1,627. Значительная изменчивость характеристик урагана показывает, что вид чрезвычайной ситуации задает общий временной масштаб, но не устраняет влияние порядка оповещения, территориальной структуры и условий движения.

Практическое значение разработанного подхода состоит в возможности преобразовать накопленное распределение времени начала выезда в интервальное распределение числа транспортных средств, поступающих на сеть улиц и дорог. Приведение временных характеристик к единому виду позволяет сопоставлять различные эвакуации. Полученные распределения могут использоваться при моделировании движения по маршрутам эвакуации и оценке изменения продолжительности поездки по сравнению с обычными условиями.

Список литературы

1. Bayram V. Optimization Models for Large Scale Network Evacuation Planning and Management: A Literature Review // Surveys in Operations Research and Management Science. 2016. Vol. 21, No. 2. P. 63–84. DOI: 10.1016/j.sorms.2016.11.001.

2. Zyryanov V., Feofilova A. Simulation of Evacuation Route Choice // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. P. 740–745. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.119.

3. Makinoshima F., Abe Y., Imamura F., Machida G., Takeshita Y. Possible Factors Promoting Car Evacuation in the 2011 Tohoku Tsunami Revealed by Analysing a Large-Scale Questionnaire Survey in Kesennuma City // Geosciences. 2017. Vol. 7, No. 4. Art. 112. DOI: 10.3390/geosciences7040112.

4. McGee T. K. Preparedness and Experiences of Evacuees from the 2016 Fort McMurray Horse River Wildfire // Fire. 2019. Vol. 2, No. 1. Art. 13. DOI: 10.3390/fire2010013.

5. Gehlot H., Sadri A. M., Ukkusuri S. V. Joint Modeling of Evacuation Departure and Travel Times in Hurricanes // Transportation. 2019. Vol. 46, No. 6. P. 2419–2440. DOI: 10.1007/s11116-018-9958-4.

6. Wang Y., Kyriakidis M., Dang V. N. Incorporating Human Factors in Emergency Evacuation: An Overview of Behavioral Factors and Models // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2021. Vol. 60. Art. 102254. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102254.

7. Grajdura S., Qian X., Niemeier D. Awareness, Departure, and Preparation Time in No-Notice Wildfire Evacuations // Safety Science. 2021. Vol. 139. Art. 105258. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105258.

8. Feng K., Lin N. Reconstructing and Analyzing the Traffic Flow during Evacuation in Hurricane Irma (2017) // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021. Vol. 94. Art. 102788. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102788.

9. Wolshon B., Parr S. A., Ren H., Murray-Tuite P. Spatiotemporal Traffic Characteristics of Megaregion Mass Evacuations. Report CM2-45. Austin: University of Texas at Austin, 2021. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/60569 (дата обращения: 21.07.2026).

10. Grajdura S., Borjigin S., Niemeier D. Fast-Moving Dire Wildfire Evacuation Simulation // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2022. Vol. 104. Art. 103190. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103190.

11. Zhao X., Xu Y., Lovreglio R., Kuligowski E., Nilsson D., Cova T. J., Wu A., Yan X. Estimating Wildfire Evacuation Decision and Departure Timing Using Large-Scale GPS Data // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2022. Vol. 107. Art. 103277. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103277.

12. Xu Y., Zhao X., Lovreglio R., Kuligowski E., Nilsson D., Cova T. J., Yan X. A Highway Vehicle Routing Dataset during the 2019 Kincade Fire Evacuation // Scientific Data. 2022. Vol. 9. Art. 608. DOI: 10.1038/s41597-022-01731-6.

13. Maranghides A., Link E., Brown C. U., Walton W. D., Mell W., Hawks S. A Case Study of the Camp Fire: Notification, Evacuation, Traffic, and Temporary Refuge Areas (NETTRA). NIST Technical Note 2252. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2023. DOI: 10.6028/NIST.TN.2252.

14. Forrister A., Kuligowski E. D., Sun Y., Yan X., Lovreglio R., Cova T. J., Zhao X. Analyzing Risk Perception, Evacuation Decision and Delay Time: A Case Study of the 2021 Marshall Fire in Colorado // Travel Behaviour and Society. 2024. Vol. 35. Art. 100729. DOI: 10.1016/j.tbs.2023.100729.

15. Cova T. J., Sun Y., Zhao X., Liu Y., Kuligowski E. D., Janfeshanaraghi N., Lovreglio R. Destination Unknown: Examining Wildfire Evacuee Trips Using GPS Data // Journal of Transport Geography. 2024. Vol. 117. Art. 103863. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103863.

16. Aldahlawi R. Y., Akbari V., Lawson G. A Systematic Review of Methodologies for Human Behavior Modelling and Routing Optimization in Large-Scale Evacuation Planning // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2024. Vol. 110. Art. 104638. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2024.104638.

17. Borody I., Wong S. D. Evacuation and Reentry Curves for Wildfire Evacuations Using Network Mobility Data // Transportation Research Record. 2025. Vol. 2679, No. 7. P. 953–971. DOI: 10.1177/03611981251331013.

18. Makinoshima F., Yotsui S., Sato S., Imamura F. Large-Scale Geolocation Data Reveal Evacuation Behaviour during the 2024 Noto Peninsula Earthquake and Tsunami // Communications Earth & Environment. 2025. Vol. 6. Art. 891. DOI: 10.1038/s43247-025-02819-8.

19. Королёв, М. Е. Статистические методы оценки эффективности транспортной инфраструктуры / М. Е. Королёв, Е. А. Королёв, Р. Р. Чичкан // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 2. – С. 6–17. – URL: https://journal.dat-dn.ru/wp-content/uploads/journal/arkhiv_nomerov/2025/2/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%E2%84%96%202%202025.pdf (дата обращения: 21.06.2026).

20. Катунов, И. В. Предиктивная аналитика дефектов дорожных покрытий и сооружений на основе методов неразрушающего контроля / И. В. Катунов, Г. Ю. Бурлакова // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 3. – С. 22–38. – URL: https://journal.dat-dn.ru/wp-content/uploads/journal/arkhiv_nomerov/2025/3/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%E2%84%96%203%202025.pdf (дата обращения: 21.06.2026).

References

1. Bayram V. Optimization Models for Large Scale Network Evacuation Planning and Management: A Literature Review. Surveys in Operations Research and Management Science, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 63–84. DOI: 10.1016/j.sorms.2016.11.001.

2. Zyryanov V., Feofilova A. Simulation of Evacuation Route Choice. Transportation Research Procedia, 2017, vol. 20, pp. 740–745. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.119.

3. Makinoshima F., Abe Y., Imamura F., Machida G., Takeshita Y. Possible Factors Promoting Car Evacuation in the 2011 Tohoku Tsunami Revealed by Analysing a Large-Scale Questionnaire Survey in Kesennuma City. Geosciences, 2017, vol. 7, no. 4, art. 112. DOI: 10.3390/geosciences7040112.

4. McGee T. K. Preparedness and Experiences of Evacuees from the 2016 Fort McMurray Horse River Wildfire. Fire, 2019, vol. 2, no. 1, art. 13. DOI: 10.3390/fire2010013.

5. Gehlot H., Sadri A. M., Ukkusuri S. V. Joint Modeling of Evacuation Departure and Travel Times in Hurricanes. Transportation, 2019, vol. 46, no. 6, pp. 2419–2440. DOI: 10.1007/s11116-018-9958-4.

6. Wang Y., Kyriakidis M., Dang V. N. Incorporating Human Factors in Emergency Evacuation: An Overview of Behavioral Factors and Models. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, vol. 60, art. 102254. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102254.

7. Grajdura S., Qian X., Niemeier D. Awareness, Departure, and Preparation Time in No-Notice Wildfire Evacuations. Safety Science, 2021, vol. 139, art. 105258. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105258.

8. Feng K., Lin N. Reconstructing and Analyzing the Traffic Flow during Evacuation in Hurricane Irma (2017). Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, vol. 94, art. 102788. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102788.

9. Wolshon B., Parr S. A., Ren H., Murray-Tuite P. Spatiotemporal Traffic Characteristics of Megaregion Mass Evacuations. Report CM2-45. Austin, University of Texas at Austin, 2021. Available at: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/60569 (accessed 21 July 2026).

10. Grajdura S., Borjigin S., Niemeier D. Fast-Moving Dire Wildfire Evacuation Simulation. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, vol. 104, art. 103190. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103190.

11. Zhao X., Xu Y., Lovreglio R., Kuligowski E., Nilsson D., Cova T. J., Wu A., Yan X. Estimating Wildfire Evacuation Decision and Departure Timing Using Large-Scale GPS Data. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, vol. 107, art. 103277. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103277.

12. Xu Y., Zhao X., Lovreglio R., Kuligowski E., Nilsson D., Cova T. J., Yan X. A Highway Vehicle Routing Dataset during the 2019 Kincade Fire Evacuation. Scientific Data, 2022, vol. 9, art. 608. DOI: 10.1038/s41597-022-01731-6.

13. Maranghides A., Link E., Brown C. U., Walton W. D., Mell W., Hawks S. A Case Study of the Camp Fire: Notification, Evacuation, Traffic, and Temporary Refuge Areas (NETTRA). NIST Technical Note 2252. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2023. DOI: 10.6028/NIST.TN.2252.

14. Forrister A., Kuligowski E. D., Sun Y., Yan X., Lovreglio R., Cova T. J., Zhao X. Analyzing Risk Perception, Evacuation Decision and Delay Time: A Case Study of the 2021 Marshall Fire in Colorado. Travel Behaviour and Society, 2024, vol. 35, art. 100729. DOI: 10.1016/j.tbs.2023.100729.

15. Cova T. J., Sun Y., Zhao X., Liu Y., Kuligowski E. D., Janfeshanaraghi N., Lovreglio R. Destination Unknown: Examining Wildfire Evacuee Trips Using GPS Data. Journal of Transport Geography, 2024, vol. 117, art. 103863. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103863.

16. Aldahlawi R. Y., Akbari V., Lawson G. A Systematic Review of Methodologies for Human Behavior Modelling and Routing Optimization in Large-Scale Evacuation Planning. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, vol. 110, art. 104638. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2024.104638.

17. Borody I., Wong S. D. Evacuation and Reentry Curves for Wildfire Evacuations Using Network Mobility Data. Transportation Research Record, 2025, vol. 2679, no. 7, pp. 953–971. DOI: 10.1177/03611981251331013.

18. Makinoshima F., Yotsui S., Sato S., Imamura F. Large-Scale Geolocation Data Reveal Evacuation Behaviour during the 2024 Noto Peninsula Earthquake and Tsunami. Communications Earth & Environment, 2025, vol. 6, art. 891. DOI: 10.1038/s43247-025-02819-8.

19. Korolev M. E., Korolev E. A., Chichkan R. R. Statisticheskie metody otsenki effektivnosti transportnoi infrastruktury [Statistical Methods for Assessing the Efficiency of Transport Infrastructure]. Vestnik Donetskoi akademii transporta, 2025, no. 2, pp. 6–17. (In Russian).

20. Katunov I. V., Burlakova G. Yu. Prediktivnaya analitika defektov dorozhnykh pokrytii i sooruzhenii na osnove metodov nerazrushayushchego kontrolya [Predictive Analytics of Road Surface and Structure Defects Based on Non-Destructive Testing Methods]. Vestnik Donetskoi akademii transporta, 2025, no. 3, pp. 22–38. (In Russian).

Feofilova A.A., Hu Liru

TEMPORAL PATTERNS OF POPULATION DEPARTURE BY CAR DURING EMERGENCIES

Abstract. *The article presents an analysis of temporal patterns in vehicle arrivals on the road network during population evacuation under different emergencies. Unlike event-specific studies, joint consideration of published evidence makes it possible to compare the rate at which the main part of the flow forms and the duration of subsequent departures. The source materials are processed using interval interpolation, descriptive statistics, correlation analysis, logarithmic transformation, k-means clustering, one-way analysis, and non-parametric tests. The determining difference in temporal characteristics is associated with whether the hazardous event can be predicted in advance. During sudden and rapidly developing emergencies, most vehicles enter the road network within a relatively short period, whereas before a forecast hurricane, departures begin in advance and continue for tens of hours. Among rapidly developing emergencies, the longest late departure phase is observed for wildfires. The approach is tested on eight sets of observations. An expression is obtained for determining the number of vehicles entering the road network during successive calculation intervals. The results can be used to specify vehicle arrivals on evacuation routes and to calculate the temporal evacuation index, which characterizes the ratio of travel time on an evacuation route to the estimated travel time under normal conditions.*

Keywords: *emergency; population evacuation; motor transport; departure time; cumulative departure profile; data analysis; temporal evacuation index.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Феофилова Анастасия Александровна Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, доцент кафедры «Организация перевозок и дорожного движения», E-mail: afeofilova@donstu.ru	**Feofilova Anastasia Aleksandrovna** Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia Associate Professor of Traffic Management and Transportation Department E-mail: afeofilova@donstu.ru
Ху Лижу Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, аспирант кафедры «Организация перевозок и дорожного движения», E-mail: 1534202112@qq.com	**Hu Liru** Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia Post graduate student of the Traffic Management and Transportation Department E-mail: 1534202112@qq.com

УДК 656.025.4

Филиппова Н.А., Власов В.М., Богумил В.Н., Сивцев С.А., Лебедев М.П., Мордовской П.Г.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАЧАЛА И ОКОНЧАНИЯ РАБОТЫ АВТОЗИМНИКА ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ О МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ХРОМОВА

Аннотация. *В статье изложен подход к прогнозированию периода действия автозимника на территории арктической зоны России на основе использования статистических данных о метеорологических явлениях. В качестве математического аппарата для построения прогноза используется модель Хромова, построенная на основе использования теоретического аппарата рядов Фурье. Исходными данными для построения прогноза являются данные метеорологических наблюдений из зоны действия автозимника, формируемые ежесуточно в количестве восьми замеров текущих значений параметров. Особенностью обработки исходных данных является то, что все замеры температуры разделяются на дневные и ночные, и затем последовательно рассчитываются средние значения ночной и дневной температуры за сутки и затем среднее значение дневной и ночной температуры за каждый месяц. Модель Хромова аппроксимирует дневные и ночные температуры за двенадцать месяцев года. Эти результаты являются исходными для построения прогноза периода действия автозимника.*

Ключевые слова*: Арктическая зона России, автозимники, модель Хромова, прогноз сроков начала и окончания работы автозимников.*

Постановка задачи

Задача прогнозирования сроков начала и окончания эксплуатации автозимников, прокладываемых в Арктической зоне России, непосредственно влияет на эффективность процессов поставки грузов Северного завоза конечным потребителям, поскольку на основе научно сформированного прогноза строятся планы перевозки грузов, порядок использования подвижного состава различной грузоподъёмности.

В статье прогнозирование сроков начала и окончания эксплуатации автозимников, в том числе прокладываемых по льду замершей северной реки, основано на предположении об устойчивом характере сезонных явлений на Северных территориях и в Арктической зоне России. Это предположение опирается на результаты научных исследований климата в северных областях России.

Анализ последних исследований

Анализ процессов развития Арктического региона России в последние годы стал важной темой обсуждений на арктических форумах, конференциях и круглых столах. В том числе большое внимание уделялось вопросам развития транспортной инфраструктуры и систем управления мобильностью в условиях Арктики. Сложность решения задач доставки грузов в районы севера России подтверждается постоянным и повышенным вниманием государства к данным вопросам. Одним из основополагающих

документов является Стратегия развития Арктики на период с октября 2020 по 2035 год (далее Стратегия) [1]. В Стратегии основное внимание уделяется развитию транспортной инфраструктуры, недостаточное развитие которой значительно тормозит экономическое развитие северных регионов России. Характерным примером является Якутия, в которой отсутствие достаточного количества мостовых переходов через водные преграды делает невозможным круглогодичное транспортное сообщение между отдельными частями республики с использованием наземного транспорта. Одна из причин – это высокая сложность и дороговизна строительства мостовых переходов. Другой особенностью является относительно краткий период работы автозимников, используемых для перевозки грузов и пассажиров в зимний период [2, 3]. В связи с этим актуальным является вопрос прогнозирования сроков начала и окончания периода действия автозимника. Прогноз указанных сроков позволит повысить эффективность планирования перевозок грузов и пассажиров по соответствующим маршрутам.

Анализ ряда исследований, посвященных изменениям климата в Арктике показывает, что несмотря на наличие тенденции к потеплению климата в районе Северного Морского Пути, эти тенденции имеют циклический характер с длительностью цикла десятки лет, при этом зимний период в континентальной Арктике стабильно холодный [4, 5]. В частности, этому способствует вечная мерзлота. Отличительной чертой континентальной Арктической зоны Российской Федерации является значительная территория многолетней мерзлоты, которая характеризуется низкой температурой и небольшим слоем сезонного оттаивания. Глубина промерзания пород местами достигает 1,5 км [6].

Исходя из этих данных, нами предложено построение математической модели прогнозирования периода работы автозимника на ледовой переправе выполнить на основе использования методов построения тренд-сезонных моделей временных рядов, построенных на статистических данных метеонаблюдений в исследуемом районе и последующего их использования для прогнозирования сроков начала и окончания работы автозимника.

Цель работы

Целью работы является повышение эффективности и безопасности процессов доставки грузов Северного завоза на территории Арктической зоны России на основе повышения качества прогнозирования сроков действия временных транспортных путей (автозимников).

Основная часть

Результаты научных исследований, результаты анализа имеющихся статистических данных позволили сформировать статистический подход, основанный на результатах обработки метеорологических данных и сопоставления этих данных с фактическими датами начала и окончания работы автозимников, прокладываемых в том числе по льду сибирских рек.

Нами было предложено для построения прогноза периода работы автозимника использовать модель Хромова [7]. В этой модели используется статистическая теория выделения сезонной компоненты на основе обработки метеорологических данных, сформированных в виде временного ряда [8], поскольку в качестве признака, в зависимости от которого происходит упорядочивание показателя, берется время. Изменение этого показателя отражает ход развития изучаемого климатического процесса. Данный подход широко применяется при анализе данных [9, 10].

В модели Хромова уровни временного ряда образуются усреднением дневных и ночных температур за каждый месяц. Порядок построения временного ряда изложен в

[11, 12]. Сезонные колебания значений данного признака с периодом в один год обусловлены влиянием природно-климатических условий. Наиболее ярко влияние природно-климатических условий проявляется в изменении средней температуры воздуха по месяцам года.

Модель Хромова строится с использованием метода гармонического анализа на основе ряда Фурье, в котором уровни можно выразить как функцию времени:

$$\hat{Y}_t = a_0 + \sum_{k=1}^{m}(a_k \cos kt + b_k \sin kt) \quad (1)$$

где a_0 – среднее значение ряда;

a_k,b_k–числовые коэффициенты.

Таким образом, сезонные колебания уровней динамического ряда можно представить в виде синусоидальных колебаний. Поскольку последние представляют собой гармонические колебания, то синусоиды, полученные при выравнивании по ряду Фурье, называют гармониками различных порядков (показатель k в этом уравнении определяет число гармоник). Обычно при выравнивании по ряду Фурье рассчитывают несколько гармоник (чаще не более 4) и затем уже определяют, с каким числом гармоник ряд Фурье наилучшим образом отражает изменения уровней ряда.

Построение «тригонометрической модели» Хромова основано на выделении из временного ряда гармоники первого порядка (синусоиды), поскольку известно, что динамика годового хода температуры достаточно хорошо аппроксимируется синусоидой [10]. Эта синусоида определяется тремя параметрами - среднегодовой температурой, амплитудой синусоиды и ее фазой, характеризующей запаздывание годового температурного цикла от светового [10]. Таким образом, для моделирования годового температурного цикла используется тригонометрическая модель [9] вида:

$$\hat{Y}_t = a_0 + a_1 \cos t + b_1 \sin t\,, \quad (2)$$

Параметры уравнения теоретических уровней, определяемого рядом Фурье, находят методом наименьших квадратов.

Пусть даны среднемесячные дневные температуры воздуха в данной местности: y_1 (температура января), y_2 (температура февраля) и т.д. Тогда $\bar{y}_i$— приближенное (модельное) значение среднемесячной температуры i-го месяца, вычисляется с использованием формулы (2) следующим образом:

$$\bar{y}_i = a_0 + b_1 sin a_i + b_2 cos a_i, \quad (3)$$

где α_i — угол, равный $i \cdot 30^\circ$, соответствующий середине i-го месяца, i = 1,2,...,11, и $\alpha_{12} = 0$.

Коэффициенты уравнения (3) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} a_0 &= \bar{y} = \tfrac{1}{12}\textstyle\sum_{j=1}^{12} y_i, \\ b_1 &= \tfrac{1}{6}\textstyle\sum_{j=1}^{12} y_j sin\, a_j, \\ b_2 &= \tfrac{1}{6}\textstyle\sum_{j=1}^{12} y_j cos\, a_j. \end{aligned} \quad (4)$$

Разработанный подход к построению прогноза по данным синусоидальной аппроксимации среднемесячных температур заключается в следующем.

На первом шаге необходимо построить модель аппроксимации среднемесячных температур по данным нескольких последних лет.

На втором шаге необходимо проанализировать фактические сроки начала и окончания работы автозимника на выбранной в качестве объекта переправе через северную реку для грузовых автомобилей различной грузоподъемности и определить характерные точки графика аппроксимации среднемесячных температур, к которым

наиболее близко расположены фактические даты начала и окончания работы автозимника.

На третьем шаге необходимо, используя статистику последних лет и построенные модели аппроксимации среднемесячных температур, оценить значение отклонения в днях фактических сроков начала и окончания работы автозимника от дат, соответствующим выявленным характерным точкам модели аппроксимации.

На четвертом (последнем) этапе необходимо построить прогноз начала и окончания работы автозимника на основе использования модели аппроксимации среднемесячного хода температуры за последний год и вычисленных значений отклонений сроков начала и окончания действия автозимника. Данные модели аппроксимации среднемесячных температур за последний год берутся в предположении об отсутствии в будущем году серьезных отклонений климата от предыдущего года.

Экспериментальная апробация теоретических моделей

Для построения моделей аппроксимации среднемесячных температур были использованы метеорологические данные за несколько лет, собранные на территории Республики Саха в районе пролегания трассы автодороги Яна.

Анализ фактических данных об открытии и закрытии автозимников на автодороге Яна показывает, что эти даты близки к характерным точкам графика среднесуточных температур, а именно: даты окончания работы автозимников близки к точке перехода весной среднемесячных дневных температур через ноль; даты начала работы автозимников близки к точке минимума зимних ночных температур. Кроме того, фактические данные начала и окончания работы автозимников в прошлом году незначительно отличаются от фактических данных начала и окончания работы автозимников в текущем году, это дает основание использовать для формирования прогноза аналогичные данные за прошлый год, что приводит к следующей последовательности формирования прогноза периода действия автозимника на плановый период с использованием данных прошлого года:

1) Необходимо выполнить расчеты среднемесячных дневных и ночных температур по данным метеостанции, расположенной в районе действия автозимника.

2) Оценить дату перехода дневных температур весной через ноль, используя построенный график.

3) Оценить дату минимума ночных температур зимой, используя построенный график.

4) С учетом практики планирования даты окончания работы автозимников одинаковой для всех грузовых автомобилей, полученную оценку даты перехода графика дневной температуры через ноль весной, смещенную по времени назад на тридцать суток, принять за прогнозную дату окончания работы автозимника в следующем году для всех грузовых автомобилей (грузоподъёмностью 10, 20, 30 тонн).

5) Полученную оценку даты, соответствующей точке минимума зимних ночных температур, принять за прогнозную дату начала работы автозимника для грузовых автомобилей грузоподъёмностью 30 тонн в следующем году. Прогнозную дату начала работы автозимников для автомобилей грузоподъемностью 20 тонн получить смещением назад на десять суток от даты, соответствующей полученной оценке даты точки минимума зимних ночных температур. Аналогично прогнозную дату окончания работы автозимников для автомобилей грузоподъемностью 10 тонн получить смещением назад на тридцать суток от даты, соответствующей полученной оценке даты точки минимума зимних ночных температур.

Апробация метода проведена на примере автодороги Яна для участка «гр. Верхоянского - Усть-Куйга», «Усть-Куйга-Казачье». На рисунке 1 показан график среднемесячных температур по данным метеостанции Усть-Куйга в 2022 году. По построенному графику хода температур в 2022 году находим дату перехода графика среднемесячных дневных температур через ноль и полученную дату уменьшаем на 30 суток. Полученную дату принимаем за прогнозную дату окончания работы автозимника в следующем 2023 году.

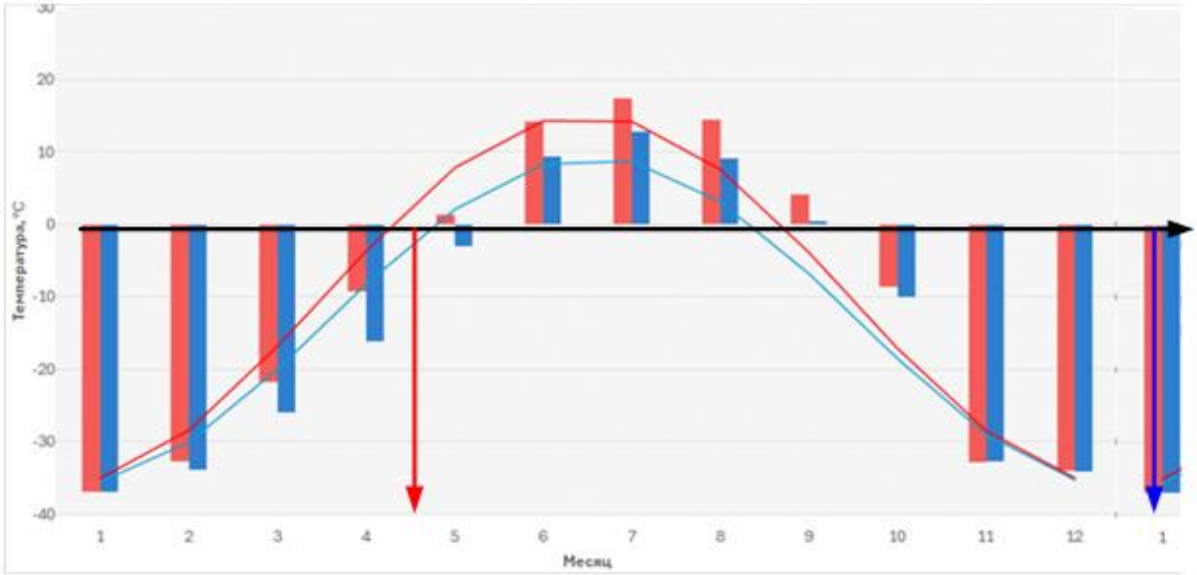


Рис. 1. График хода среднемесячных дневных и ночных температур по метеоданным метеостанции Усть-Куйга в 2022 году

Анализируя график хода температур в 2022 году, определяем, что переход графика дневных температур через ноль произошел в мае, проанализировав дневные температуры мая, можем полагать, что ноль графика пришелся на 15 мая. Полученную дату уменьшим на 30 суток. Получим 15 апреля. Полученную дату принимаем за прогнозную дату окончания работы автозимника в следующем 2023 году.

По построенному графику хода температур в 2022 году найдем дату экстремума ночных температур. Экстремум ночных температур был в январе 2022 года. Анализ графика ночных температур показывает, что минимум пришелся на 27 января 2022 года. Эту дату принимаем за прогнозную дату начала работы автозимника для автомобилей грузоподъемностью 30 тонн. Прогнозная дата начала работы автозимника для автомобилей грузоподъемностью 20 тонн будет раньше даты минимума ночных температур на 10 суток, то есть 17 января 2023 года. Прогнозная дата начала работы автозимника для автомобилей грузоподъемностью 10 тонн будет раньше даты минимума ночных температур на 30 суток, то есть 28 декабря 2023 года.

Аналогично поступаем с данными за 2023 год при прогнозировании дат начала и окончания работы автозимников в 2024 г. Анализ графика дневных температур показывает, что переход через ноль пришелся на 20 мая 2023 года. Анализ графика ночных температур показывает, что экстремум пришелся на 26 января 2023 года. Результаты прогнозирования представлены в таблице 1.

Полученные результаты показывают, что относительная ошибка прогнозирования, отнесенная к продолжительности действия автозимника, не превысит нескольких процентов.

Таблица 1

Сравнительные результаты прогнозирования дат открытия и закрытия автозимника «гр. Верхоянского - Усть-Куйга», «Усть-Куйга-с. Казачье»

Год	Открытие автозимника, даты									Закрытие автозимника, даты	
	Автомобиль 10 т			Автомобиль 20 т			Автомобиль 30 т			Факт	Прогноз
	Факт	Прогноз	Откло-нение, дни	Факт	Прогноз	Откло-нение, дни	Факт	Прогноз	Откло-нение, дни		
2023	28.12. 2022	28.12. 2023	0	11.01. 2023	17.01. 2023	+6	18.01.	27.01. 2023	+9	22.04. 2023	15.04. 2023
2024	28.12. 2023	27.12. 2024	-1	15.01. 2024	16.01. 2024	+1	25.01. 2024	26.01. 2024	+1	20.04. 2024	20.04. 2024

Выводы

1) Показана возможность прогнозирования сроков начала и окончания работы автозимника на основе обработки метеорологических данных о ночных и дневных температурах и построения графиков аппроксимации хода средних месячных температур по методике построения модели Хромова.

2) Для построения прогноза сроков начала и окончания работы автозимников в некотором регионе необходимо наличие метеоданных о температурах в данном регионе для построения графиков аппроксимации хода средних месячных температур. Для нового региона необходимо экспериментально определить даты, соответствующие характерным точкам графика, и экспериментально оценить, на какое количество дат необходимо отступать от дат для характерных точек при формировании прогноза.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №26-99-20051 «Разработка и научное обоснование мероприятий по организации круглогодичной эксплуатации автомобильной дороги “Яна” в Арктике в рамках реализации проекта «Восточный меридиан»: технологии и эффективность (2026-2028) гг.»

Список литературы

1. Крутиков А.В., Смирнова О.О., Бочарова Л.К. Стратегия развития российской Арктики. Итоги и перспективы // Арктика и Север. 2020. № 40. С. 254–269. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.40.254

2. Лисенкова А.В. Стратегические приоритеты Российской Федерации в Арктике в области борьбы с изменением климата // Арктика 2035: Актуальные вопросы, проблемы, решения. 2025. № 4 (24). С. 312–340.

3. Transport Planning and Sustainable Development in the Arctic Region / N. Filippova, A., V. V. Vlasov and V. N. Bogumil. — Текст: непосредственный // The Handbook of the Arctic. A Broad and Comprehensive Overview. — Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. — С. 833–845. DOI: 10.1007/978-981-16-9250-5_44-1

4. Digitalization of the Arctic / Oleg B. Pichkov, Alexander A. Ulanov, and Kseniia A. Patrunina // The Handbook of the Arctic. A Broad and Comprehensive Overview. — Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. — С. 442–459. DOI: 10.1007/978-981-16-9250-5_44-1

5. Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2019–2022 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59, № 7. С. 830–851.

6. Skuf'in P., Chuvardinskiy V. Continental Glaciation and Conditions for the Formation of Exaration Relief on the Territory of the Baltic Shield // Science and Innovations 2021:

Development Directions and Priorities. 2021. Vol. 1. Pp. 191–195. DOI: https://doi.org/10.34660/INF.2021.38.79.027

7. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология: Учебник. 5-е изд. М.: Изд. МГУ, 2001. 528 с.

8. Семенов С.М., Гельвер Е.С. Синусоидальная аппроксимация годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке // Метеорология и гидрология. 2002. № 11. С. 25–30.

9. Джегюеде А.М. Статистический анализ временных рядов для обнаружения PortScan и DDoS // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2026. № 1(72). С. 72−91. DOI: 10.17072/1993-0550-2026-1-72-91. https://elibrary.ru/pvxuen.

10. Митин В.Ю., Аптуков В.Н. Математические модели прогнозирования среднемесячной температуры и осадков с использованием фрактального и фурье-анализа метеорологических рядов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2024. Вып. 1(64). С. 33–42. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-1-33-42.

11. Попова И.Н. Анализ временных рядов: учебник для вузов. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 74 с. — (Высшее образование). ISBN 978-5-534-18394-8

12. Смирнов С.С. Применение рядов Фурье для прогнозирования объемов перевозок пассажиров в пригородном сообщении // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 616–624. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-616-624

References

1. Krutikov A.V., Smirnova O.O., Bocharova L.K. Development Strategy of the Russian Arctic. Results and Prospects // Arctic and North. 2020. No. 40. pp. 254–269. (In Russian) DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.40.254

2. Lisenkova A.V. Strategic Priorities of the Russian Federation in the Arctic in the Field of Combating Climate Change // Arctic 2035: Current Issues, Problems, Solutions. 2025. No. 4 (24). pp. 312–340. (In Russian)

3. Transport Planning and Sustainable Development in the Arctic Region / N. Filippova, A., V. V. Vlasov and V. N. Bogumil. — Text: direct // The Handbook of the Arctic. A Broad and Comprehensive Overview. — Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. — P. 833–845. DOI: 10.1007/978-981-16-9250-5_44-1

4. Digitalization of the Arctic / Oleg B. Pichkov, Alexander A. Ulanov, and Kseniia A. Patrunina // The Handbook of the Arctic. A Broad and Comprehensive Overview. — Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. — P. 442–459. DOI: 10.1007/978-981-16-9250-5_44-1

5. Mokhov I.I. Russian Climate Research in 2019–2022 // Izvestiya RAN. Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. Vol. 59, No. 7. pp. 830–851. (In Russian)

6. Skuf'in P., Chuvardinskiy V. Continental Glaciation and Conditions for the Formation of Exaration Relief on the Territory of the Baltic Shield // Science and Innovations 2021: Development Directions and Priorities. 2021. Vol. 1. pp. 191–195. DOI: https://doi.org/10.34660/INF.2021.38.79.027

7. Khromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorology and Climatology: Textbook. 5th ed. Moscow: Moscow State University Publ., 2001. 528 p. (In Russian)

8. Semenov S.M., Gelver E.S. Sinusoidal Approximation of the Annual Cycle of Daily Average Air Temperature in Russia in the 20th Century // Meteorology and Hydrology. 2002. No. 11. pp. 25–30. (In Russian)

9. Jegyuede A.M. Statistical Analysis of Time Series for PortScan and DDoS Detection // Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2026. No. 1(72). P. 72−91. (In Russian) DOI: 10.17072/1993-0550-2026-1-72-91. https://elibrary.ru/pvxuen.

10. Mitin V.Yu., Aptukov V.N. Mathematical Models for Forecasting Average Monthly Temperature and Precipitation Using Fractal and Fourier Analysis of Meteorological Series // Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2024. Issue 1(64). pp. 33–42. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-1-33-42.

11. Popova I.N. Analysis of Time Series: A Textbook for Universities. — Moscow: Yurait Publishing House, 2024. — 74 p. — (Higher Education). ISBN 978-5-534-18394-8

12. Smirnov S.S. Application of Fourier Series to Forecasting Passenger Transportation Volumes in Suburban Traffic // Bulletin of the Petersburg State Transport University. — SPb.: PGUPS, 2025. — Vol. 22. — Issue 3. — pp. 616–624. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-616-624

Filippova N.A., Vlasov V.M., Bogumil V.N., Sivtsev S.A., Lebedev M.P., Mordovskoy P.G.

FORECASTING THE START AND END OF WINTER ROAD OPERATIONS BASED ON STATISTICAL DATA ON METEOROLOGICAL EVENTS USING THE KHROMOV MODEL

Abstract. *This article presents an approach to forecasting the winter road operation period in Russia's Arctic zone based on statistical data on meteorological phenomena. The Khromov model, constructed using the theoretical framework of Fourier series, is used as the mathematical framework for constructing the forecast. The initial data for constructing the forecast are meteorological observations from the winter road operation zone, collected daily and consisting of eight measurements of current parameter values. A key feature of the initial data processing is that all temperature measurements are separated into daytime and nighttime values, followed by sequential calculation of average nighttime and daytime temperatures for the day, followed by the average daytime and nighttime temperatures for each month. The Khromov model approximates daytime and nighttime temperatures for twelve months of the year. These results serve as the initial basis for forecasting the winter road operation period.*

Keywords: *Russian Arctic zone, winter roads, Khromov model, forecast of winter road operation start and end dates.*

Сведения об авторах:	Information about the authors:
Филиппова Надежда Анатольевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильные перевозки» и «Транспортная телематика», Руководитель инновационно-исследовательского проекта «Развитие мультимодальной мобильности в условиях Арктической зоны России», Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), заместитель генерального директора по науке Якутского научного центра СО РАН, профессор кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы» ФГАОУ ВО «Северо-	**Filippova Nadezhda Anatolyevna** Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Departments of "Automobile Transportation" and "Transport Telematics", Head of the innovation and research project "Development of multimodal mobility in the Arctic zone of Russia", Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI); Deputy Director General for Science of the Yakutsk Scientific Center SB RAS; Professor of the Department “Highways and airfields” of the Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov

Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (г. Якутск). Российская Федерация, г. Москва. E-mail: umen@bk.ru	(Yakutsk). Russian Federation, Moscow, Yakutsk. E-mail: umen@bk.ru
Власов Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортная телематика» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Российская Федерация, г. Москва. E-mail: vmv@trnsoft.ru	**Vlasov Vladimir Mikhailovich** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Telematics at the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Russian Federation, Moscow. E-mail: vmv@trnsoft.ru
Богумил Вениамин Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортная телематика» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Российская Федерация, г. Москва. E-mail: venbogumil@gmail.com	**Bogumil Veniamin Nikolaevich** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Telematics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation. E-mail: venbogumil@gmail.com
Сивцев Сергей Афанасьевич, Заместитель генерального директора по эксплуатации казенного предприятия Республики Саха (Якутия) «Дороги Арктики», Российская Федерация, г. Якутск. E-mail: afanasi_2018@mail.ru	**Sivtsev Sergey Afanasievich** Deputy General Director for Operation of the state-owned enterprise of the Republic of Sakha (Yakutia) "Roads of the Arctic", Yakutsk, Russian Federation. E-mail: afanasi_2018@mail.ru
Лебедев Михаил Петрович, академик РАН, доктор технических наук, генеральный директор ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Российская Федерация, г. Якутск. E-mail:m.p.lebedev@prez.ysn.ru	**Lebedev Mikhail Petrovich** Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, General Director of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Russian Federation, Yakutsk. E-mail:m.p.lebedev@prez.ysn.ru
Мордовской Петр Григорьевич кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Российская Федерация, г. Якутск. E-mail: mordovskoipg@yandex.ru	**Mordovskoi Petr Grigorievich** Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Russian Federation, Yakutsk. E-mail: mordovskoipg@yandex.ru

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 519.853:656.1

Кольева Н.С., Орлова Т.С., Кортенко Л.В., Зюзина А.С., Гибадуллин Т.В.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В ЛОГИСТИКЕ НА ОСНОВЕ IOT-ДАННЫХ И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА A*

Аннотация. *В статье рассматривается задача динамической маршрутизации транспортных средств и контейнеров в условиях изменяющейся дорожной обстановки, погодных условий и состояния груза. Показано, что классические статические алгоритмы маршрутизации недостаточно эффективны, где критична своевременная реакция на события в реальном времени. Предложен подход к маршрутизации на основе модифицированного алгоритма A* с IoT-весами, учитывающими трафик, погоду, параметры груза и приоритет перевозки. Дополнительно предложена классификация состояний IoT-событий по уровню критичности и формализована модель принятия решений для автоматического реагирования системы. Результаты анализа показывают, что предложенный подход обеспечивает интерпретируемость решений, возможность быстрого внедрения и более высокую практическую применимость по сравнению с классическим A* и методами, требующими длительного обучения на данных.*

Ключевые слова*: динамическая маршрутизация, IoT, A*, логистика, умные перевозки, адаптивные маршруты.*

Постановка задачи

В условиях цифровизации логистики и роста требований к надежности перевозок возникает необходимость разработки методов динамической маршрутизации, способных учитывать изменения дорожной обстановки, погодных условий и состояния груза в реальном времени. Существующие статические подходы к маршрутизации не обеспечивают оперативной адаптации к нештатным ситуациям, что снижает эффективность управления транспортными потоками и повышает риск нарушения температурного режима при перевозке чувствительных грузов.

Анализ последних исследований

В последние годы проблема динамической маршрутизации в логистике активно исследуется в контексте интернета вещей, методов машинного обучения и интеллектуального планирования маршрутов. Современные работы [1-2] показывают переход от статических схем к системам, способным использовать данные датчиков, состояния инфраструктуры и внешней среды для оперативной корректировки маршрута. При этом большинство исследований [3-5] ориентировано либо на глобальную оптимизацию сети, либо на частные прикладные сценарии, такие как аэропортовая логистика, городские перевозки или маршрутизация в сенсорных сетях.

Одним из заметных направлений стали исследования, использующие обучение с подкреплением и глубокие нейросетевые модели для задач маршрутизации и планирования логистики. В исследовании [6] показано, что мувинговая логистика

обладает особыми характеристиками, которые отличают ее от традиционных грузоперевозок и требуют учета нестандартных грузов, ограничений городской среды и выраженной сезонности спроса. Автор обосновывает, что объединение классического математического аппарата – алгоритмов Дейкстры, A* и задачи коммивояжера – с цифровыми инструментами, такими как TMS, GIS, нейросетевые модели и IoT, позволяет перейти от ручного планирования к адаптивному управлению перевозками в реальном времени. При этом в качестве перспективного направления автор выделяет разработку прогностических систем, способных учитывать динамику микроклимата и волатильность спроса. Подобные решения демонстрируют высокую адаптивность, однако требуют больших массивов данных, сложной настройки и, как правило, обладают низкой интерпретируемостью, что ограничивает их применение в практической диспетчеризации перевозок.

Существенный вклад внесен в исследовании [7], где рассматривается построение имитационной модели выбора оптимального маршрута. Авторы реализовали гибридную программную архитектуру в среде AnyLogic, объединяющую точный алгоритм Дейкстры и эвристический алгоритм A*. Новизна подхода заключается в разработке адаптивного механизма оценки, основанного на стохастической генерации трафика и показателях загруженности узлов, что позволяет заранее обходить перегруженные линии связи в режиме реального времени. Эти выводы важны для логистики, поскольку подтверждают общую тенденцию: IoT-среда требует не только сбора данных, но и механизмов принятия решений в условиях изменчивости и ограниченности ресурсов.

Другие исследования связаны с модификацией классических алгоритмов маршрутизации. В частности, в работе [8] авторы предложили многоуровневую вычислительную архитектуру, в рамках которой параметры логистической сети преобразуются в задачу квадратичной оптимизации без ограничений, а решение реализуется на вентильных NISQ-процессорах с использованием QAOA и на системах квантового отжига D-Wave Advantage2. Аналогичный подход применяется в логистике, где исследователи используют генетические алгоритмы, гибридные эвристики и интеллектуальное расписание для повышения эффективности перевозок. Однако такие решения часто решают частную задачу оптимизации без полноценной связи с параметрами груза, состоянием контейнера и прогнозом времени прибытия.

Фундаментальное значение для развития математического аппарата логистического планирования имеет исследование [9], посвященное теоретическому обоснованию минимаксной задачи маршрутизации «на узкие места» в условиях ограничений предшествования и первоочередных заданий. Автором разработана строгая двухэтапная оптимизационная процедура на основе динамического программирования. Преимуществом предложенного алгоритма является вычислительная оптимизация процесса.

Одним из заметных направлений стали исследования, использующие нейросетевые модели для задач маршрутизации и планирования логистики. Так, в работе [10] авторы предложили развернутую классификацию нейросетевых архитектур, включая MLP, RNN, LSTM, CNN и GAN, и показали их пригодность для решения задач прогнозирования спроса, динамической маршрутизации и предиктивного обслуживания подвижного состава. Практическая ценность работы подтверждается обобщением KPI крупных отечественных операторов: внедрение специализированных ИИ-решений позволяет сократить холостой пробег транспорта на 20%, уменьшить избыточные складские запасы на 12-18% и снизить непроизводительные простои техники на 15%. Также исследователи указывают на зависимость качества результатов от разметки исходных данных и риск переобучения моделей, а в качестве перспективного

направления выделяют создание гибридных систем, сочетающих нейросетевой анализ с потоковыми IoT-данными и экспертной оценкой.

Нерешенные проблемы, таким образом, включают:

–Отсутствие комплексных моделей динамического веса ребра, учитывающих одновременно инфраструктурные, экологические и грузовые параметры.

–Недостаточная формализация процедур автоматического реагирования на IoT-события в реальном времени.

–Нехватка интерпретируемых решений, пригодных для внедрения без больших исторических данных.

Именно эти нерешенные вопросы и составляют предмет данного исследования: разработка практичного метода динамической маршрутизации на основе модифицированного алгоритма A* с IoT-весами, пригодного для оперативного применения в логистике чувствительных и проектных перевозок.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые предложена модель динамической маршрутизации на основе модифицированного алгоритма A*, в которой динамический вес ребра рассчитывается с одновременным учетом четырех факторов: дорожного трафика, погодных условий, состояния груза и приоритета перевозки; разработана трехуровневая классификация IoT-событий, в которой каждому уровню критичности соответствует детерминированный сценарий реакции системы (от логирования и обновления ETA до принудительной остановки и перенаправления в сервисную зону); обоснованы значения весовых коэффициентов на основе экспертной оценки и результатов имитационного моделирования; и проведено сравнительное исследование предложенного подхода с классическим A* и вариантом с частичной динамической корректировкой, показавшее снижение ошибки прогнозирования ETA на 60,3%, доли рейсов с нарушением температурного режима – на 67,3% и эксплуатационных потерь – на 37,0%, что в совокупности отличает предложенное решение от известных модификаций A* и D* Lite, где динамическая адаптация обычно реализуется либо через локальный инкрементальный пересчет пути, либо через обучение на больших массивах данных без учета параметров груза и приоритета доставки.

Цель работы

Цель исследования заключается в разработке и обосновании подхода к динамической маршрутизации транспортных средств и контейнеров на основе IoT-данных, обеспечивающего повышение точности прогнозирования времени прибытия, снижение доли рейсов с нарушением температурного режима и сокращение эксплуатационных потерь.

Таким образом, требуется метод, который способен не только находить оптимальный маршрут, но и перерассчитывать его при поступлении новых данных с датчиков и внешних сервисов.

Основная часть

Оптимизация маршрутов является классической задачей комбинаторной оптимизации, известной как задача коммивояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) и задача маршрутизации транспорта (Vehicle Routing Problem, VRP). Однако в условиях реальной логистики, когда появляются динамические факторы – пробки, погодные условия, поломки, изменение состояния груза – статические алгоритмы становятся неприменимыми. Требуются алгоритмы динамической маршрутизации, способные перестраивать маршрут в реальном времени на основе поступающих IoT-данных.

В научной литературе встречаются следующие понятия. Статическая маршрутизация предполагает, что маршрут рассчитывается один раз перед началом

движения и не изменяется в процессе перевозки, что применимо только в условиях полной определенности. Динамическая маршрутизация означает, что маршрут может корректироваться в процессе движения на основе актуальной информации, поступающей в реальном времени. Адаптивная маршрутизация представляет собой частный случай динамической, при котором система обучается на исторических данных и улучшает качество маршрутов со временем, используя методы машинного обучения [11].

В рамках настоящей работы под динамической маршрутизацией будем понимать процесс перерасчета оптимального пути следования транспортного средства или контейнера при получении новых данных с IoT-датчиков с целью минимизации целевой функции, которая может включать время, расход топлива, риск порчи груза и другие критерии [12].

Для понимания того, какие факторы влияют на выбор подхода к оптимизации, необходимо рассмотреть различные методы, существующие в теории управления. В литературе наиболее распространенными являются процессный и функциональный подходы, которые часто противопоставляются друг другу. Функциональный подход к оптимизации позволяет эффективно выявлять резервы для снижения затрат материальных, трудовых и финансовых ресурсов на производство.

Эффективное управление невозможно без соблюдения определенных основополагающих правил. Применительно к управлению бизнес-процессами, базирующемуся на процессном подходе, такой фундамент образуют следующие принципы:

– обеспечение равномерности и повторяемости выполнения процессов (ритмичность);

– максимальная автоматизация рутинных операций, наличие альтернативных сценариев выполнения (вариативность);

– учет фактора непредсказуемости (неопределенности);

– установление четких связей между смежными процессами, подтверждение необходимости и полезности каждого процесса (востребованность);

– обязательное закрепление порядка действий в документации;

– регулярный мониторинг хода выполнения (контроль) и назначение конкретных лиц, отвечающих за результат (ответственность) [13].

Алгоритм A* (A-star) был предложен Питером Хартом, Нильсом Нильссоном и Бертрамом Рафаэлем в 1968 году и до сих пор остается одним из наиболее эффективных алгоритмов поиска кратчайшего пути на графе [18]. Функция оценки стоимости пути имеет вид:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

где $g(n)$ – длина пути от стартового узла до текущего (расстояние по ребру);

$h(n)$ – оценочная стоимость пути от текущего узла до целевой вершины (например, расстояние «напрямую» от текущего узла до конечного узла).

Для построения маршрута в условиях изменяющейся транспортной доступности предлагается модифицированный алгоритм A*, учитывающий динамическое изменение стоимости ребер графа на основе данных IoT. В отличие от классического алгоритма, в предлагаемом подходе стоимость перехода между соседними вершинами определяется не только расстоянием, но и временем движения, уровнем загрузки транспортной сети, дорожными и погодными условиями, а также действующими ограничениями движения. Далее представлен псевдокод модифицированного алгоритма A*.

```
ВХОД:
G = (V, E)          // граф транспортной сети
S                   // начальная вершина
T                   // целевая вершина
Θ                   // порог существенного изменения условий
α, β, γ, δ          // весовые коэффициенты критериев
w                   // коэффициент эвристики

ВЫХОД:
P                   // построенный маршрут
C(P)                // итоговая стоимость маршрута
ETA(P)              // расчетное время прибытия
Статус              // маршрут найден или маршрут отсутствует

  1. Получить актуальные данные IoT:
  IoT_Data ← Получить_данные_IoT()
  Данные включают:
- интенсивность движения;
- среднюю скорость;
- погодные условия;
- состояние дорожного покрытия;
- наличие препятствий;
- загрузку транспортной сети;
- техническое состояние транспортного средства.
  2. Для каждого ребра (n, m) графа G выполнить:

Если Ребро_недоступно(n, m, IoT_Data) = ИСТИНА:
c(n, m) ← ∞
ИНАЧЕ:
L ← Длина_ребра(n, m)
Tm ← Время_движения(n, m, IoT_Data)
R ← Уровень_риска(n, m, IoT_Data)
Pn ← Штраф_за_условия(n, m, IoT_Data)

c(n, m) ← α · L + β · Tm + γ · R + δ · Pn
```

Для алгоритма A* важным условием является допустимость эвристики (admissible heuristic), то есть эвристическая оценка не должна превышать истинную минимальную стоимость пути.

При выполнении этого условия A* гарантированно находит оптимальный путь. Достоинствами A* являются гарантия оптимальности, интерпретируемость решений (диспетчер может объяснить клиенту, почему был выбран тот или иной маршрут) и умеренная вычислительная сложность O(N log N) для разреженных графов. Однако в классической реализации веса ребер графа являются статическими, что не позволяет учитывать динамические изменения, возникающие в процессе движения, такие как внезапная пробка или резкое ухудшение погоды.

Алгоритм D* Lite (Dynamic A*) был разработан Свеном Кенигом и Максимом Лихачевым в 2002 году и предназначен для поиска пути в динамически меняющемся графе [14]. Основная идея заключается в том, что при изменении весов ребер (например, из-за внезапной пробки) алгоритм пересчитывает путь только для затронутых областей, а не полностью перезапускает поиск. Это дает выигрыш в производительности в 10-100 раз по сравнению с полным перезапуском A*.

Для логистики D* Lite особенно актуален, так как позволяет оперативно реагировать на локальные изменения, такие как авария на трассе или резкое ухудшение погоды на участке, без необходимости полного пересчета маршрута для всего парка

транспортных средств. Алгоритм D* Lite особенно эффективен в сценариях, где изменения в графе происходят часто, но носят локальный характер, что типично для городской логистики и междугородних перевозок по загруженным трассам.

Алгоритмы обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) представляют собой наиболее современный подход к динамической маршрутизации. Согласно [15], сочетание IoT с искусственным интеллектом, периферийными вычислениями и сетями пятого поколения способствует адаптируемости и отзывчивости современных промышленных систем.

В отличие от A* и D* Lite, которые требуют формального задания эвристики и весов, агент с подкреплением обучается на исторических данных самостоятельно находить оптимальную стратегию методом проб и ошибок.

Преимуществом обучения с подкреплением является способность учитывать долгосрочные последствия решений, тогда как классические алгоритмы (A*, D* Lite) принимают решения на основе текущего момента.

Однако недостатками RL выступают необходимость в больших объемах размеченных данных – 10 тысяч и более эпизодов обучения, что соответствует 3-5 годам непрерывной работы, непрозрачность принимаемых решений (агент является «черным ящиком», что затрудняет объяснение решений клиентам и контролирующим органам), а также отсутствие гарантии оптимальности решения. Для наглядного сопоставления характеристик различных алгоритмов маршрутизации их ключевые параметры сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации

Характеристика	A* классический	A* с динамическими весами	D* Lite	Обучение с подкреплением
Динамическая адаптация	Нет	Частичная (при пересчете)	Да (инкрементальная)	Да
Учет долгосрочных последствий	Нет	Нет	Нет	Да
Требует обучения на данных	Нет	Нет	Нет	Да (от 10000 эпизодов)
Вычислительная сложность на запрос	O(N log N)	O(N log N)	O(N log N) инкрементально	O(1) после обучения
Гарантия оптимальности	Да (при допустимой эвристике)	Да (при допустимой эвристике)	Да	Нет
Интерпретируемость решений	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая («черный ящик»)
Необходимость в исторических данных	Нет	Нет	Нет	Да (размеченные)

Алгоритм D* Lite может быть добавлен на втором этапе для повышения производительности при большом количестве динамических событий (более 100 изменений в час). Выбор именно модифицированного A* обоснован также тем, что классический A* не учитывает динамические факторы, а RL требует непозволительно больших объемов данных для качественного обучения.

Для реализации выбранного подхода и обеспечения динамической маршрутизации разработана модификация классического алгоритма.

Пусть задан граф дорожной сети

$$G = (V, E) \quad (2)$$

где V – множество вершин;

E – множество ребер.

Каждому ребру $e \in E$ сопоставляется базовая стоимость $w_0(e)$, выражающая время или расстояние в нормальных условиях.

В реальном времени на ребро накладываются динамические коэффициенты: трафика $T(e,t)$, погодных условий $W(e,t)$, состояния груза $\mathrm{V}(e,t)$ и приоритета груза P.

Динамический вес ребра рассчитывается по формуле:

$$w(e,t) = w_0(e)\ x\ [1 + \alpha_1 T(e,t) + \alpha_2 W(e,t) + \alpha_3 V(e,t) + \alpha_4 P] \quad (3)$$

где коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ задают вклад соответствующих факторов.

В базовой конфигурации предлагаются значения α_1. Значения весовых коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ были получены путем экспертной оценки с участием трех специалистов в области транспортной логистики и управления цепями поставок, которым предлагалось оценить относительную важность четырех факторов (дорожный трафик, погодные условия, состояние груза, приоритет перевозки) по 10-балльной шкале. После усреднения экспертных оценок и нормирования на сумму всех факторов были рассчитаны приведенные значения коэффициентов, отражающие вклад каждого фактора в общую оценку маршрута.

$\alpha_1 = 0{,}4 -$ трафик наиболее важен ,

$\alpha_2 = 0{,}3 -$ погода,

$\alpha_3 = 0{,}2 -$ состояние груза,

$\alpha_4 = 0{,}1 -$ приоритет.

Такая формализация делает маршрут чувствительным к внешним изменениям и позволяет выбирать не самый короткий, а наиболее эффективный путь в текущих условиях.

Оценка времени прибытия (ETA) является ключевой функцией интеллектуальной логистической системы, поскольку влияет на планирование складских операций и качество обслуживания клиентов. В классических подходах ошибка прогноза выше, тогда как использование IoT-данных и динамической маршрутизации позволяет существенно повысить точность. В предлагаемой модели ETA рассчитывается как сумма стоимостей ребер маршрута с учетом времени входа на каждое ребро и пересчитывается при поступлении новых данных.

На первом этапе внедрения целесообразно использовать модифицированный A* как основное средство прогнозирования ETA, поскольку он не требует длительного обучения и уже на старте дает приемлемую точность. После накопления массива исторических данных возможно подключение машинного обучения для дальнейшего уточнения прогноза.

Рассмотрим классификацию IoT-событий.

Для автоматизации реакции системы предложена трехуровневая классификация состояний: зеленый, желтый и красный.

Красный уровень означает критическое событие и требует немедленной остановки, уведомления участников и вызова аварийных служб.

Желтый уровень означает предупреждение и допускает перестроение маршрута, снижение скорости или направление в сервисную зону.

Зеленый уровень означает нормальное состояние и предполагает только логирование и обновление ETA.

Такая классификация удобна для диспетчеризации и может быть использована как основа для правил принятия решений в системе управления перевозкой.

Она связывает показания датчиков с конкретными действиями системы, что повышает управляемость процесса и снижает вероятность ошибок оператора.

Предложенный подход имеет несколько преимуществ. Во-первых, он опирается на хорошо изученный алгоритм A*, что облегчает внедрение и объяснение решений. Во-вторых, модель учитывает реальные факторы логистики, включая трафик, погоду и состояние груза, а не только географическую длину маршрута. В-третьих, система масштабируема: на первом этапе она может работать без больших наборов исторических данных, а в дальнейшем быть дополнена машинным обучением. Основное ограничение подхода заключается в необходимости корректной настройки весовых коэффициентов и порогов критичности.

В таблице 2 приведены критерии отнесения IoT-событий к трем уровням критичности (зеленый, желтый, красный) для основных типов контролируемых параметров: температура груза, влажность, вибрация/удары, отклонение от маршрута и задержка доставки.

Таблица 2

Пороговые значения параметров для классификации IoT-событий

Параметр	Зеленый уровень (норма)	Желтый уровень (предупреждение)	Красный уровень (критическое событие)
Температура груза, °C	В пределах допустимого диапазона [T_min; T_max]	Отклонение на 2-5°C от границ диапазона в течение 10-30 мин	Отклонение более чем на 5°C от границ диапазона или нарушение более 30 мин
Влажность, %	≤ 70%	70-85% в течение 20-60 мин	> 85% или нарушение более 60 мин
Вибрация/удары, g	< 0,5 g	0,5-1,0 g (кратковременно)	> 1,0 g или серия ударов > 0,5 g в течение 5 мин
Отклонение от маршрута, км	< 1 км	1-5 км от планового маршрута	> 5 км или выезд за геозону доставки
Задержка доставки, мин	< 10 мин	10-30 мин	> 30 мин или риск нарушения срока доставки > 1 ч

Для промышленного внедрения требуется последующая верификация модели на реальных данных рейсов, чтобы подтвердить улучшение точности ETA и снижение числа инцидентов.

Тем не менее в условиях нехватки размеченных данных модифицированный A* выглядит более практичным, чем методы, основанные на полном обучении агента.

Экспериментальная верификация

Для проверки работоспособности модифицированного алгоритма A* с IoT-весами было проведено имитационное моделирование процесса динамической маршрутизации транспортных средств в условиях изменяющейся дорожной обстановки, погодных факторов и состояния груза. Основной целью эксперимента являлась количественная оценка улучшения точности прогнозирования времени прибытия (ETA), снижения доли рейсов с нарушением температурного режима и сокращения эксплуатационных потерь по сравнению с классическими подходами к маршрутизации.

Моделирование выполнялось на тестовом графе транспортной сети, включающем 50 вершин (узлов дорожной инфраструктуры) и 124 ребра (участков маршрутов). Структура графа отражала типичную логистическую сеть городской и междугородной доставки с различными типами дорог: от локальных городских улиц до магистральных трасс. Каждому ребру была сопоставлена базовая стоимость $w_0(e)$, выраженная во времени проезда в нормальных условиях [7].

В ходе эксперимента генерировались три типа динамических событий, влияющих на выбор маршрута:

1) Изменение дорожного трафика. Моделировалось увеличение времени проезда отдельных участков на 20-150% в зависимости от интенсивности транспортного потока.

2) Ухудшение погодных условий. Учитывалось снижение средней скорости движения на 10-40% при осадках, тумане, гололеде.

3) Отклонение параметров температурного режима груза. Фиксировалось критическое состояние контейнера, требующее изменения приоритета доставки и, при необходимости, перенаправления в сервисную зону.

Для каждого сценария выполнялось 100 независимых прогонов с варьированием интенсивности внешних воздействий и случайной генерацией начальных условий (стартовая и целевая вершины, количество перевозок в потоке). Общее количество смоделированных рейсов составило 3000. Результаты имитационного моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты имитационного моделирования

Показатель	Классический A*	A* с динамическими весами (трафик)	Предложенный модифицированный A*
Средняя ошибка ETA, мин	18,4	12,1	7,3
Доля рейсов с нарушением температурного режима, %	14,7	9,2	4,8
Эксплуатационные потери, усл. ед.	100	82	63
Среднее время расчета маршрута, мс	11,2	13,5	15,1

Анализ полученных данных показывает, что предложенный модифицированный алгоритм A* обеспечивает существенное улучшение всех ключевых показателей по сравнению с базовыми вариантами. Средняя ошибка прогнозирования ETA снизилась на 60,3% относительно классического A* и на 39,7% по сравнению с вариантом с частичной динамической корректировкой. Доля рейсов с нарушением температурного режима сократилась соответственно на 67,3% и 47,8%. Эксплуатационные потери уменьшились на 37,0% в сравнении с базовым сценарием.

Увеличение среднего времени вычисления маршрута на 34,8% (с 11,2 до 15,1 мс) связано с необходимостью перерасчета динамических весов ребер при поступлении каждого IoT-события. Однако абсолютное значение времени расчета остается приемлемым для систем оперативной диспетчеризации, где задержка в десятки миллисекунд не влияет на качество управления транспортным потоком.

Выводы

1. В работе обоснована актуальность динамической маршрутизации в логистике в условиях изменяющейся дорожной обстановки, погодных факторов и состояния груза.

2. Показано, что классические статические методы маршрутизации недостаточны для задач, где требуется оперативная реакция на события в реальном времени.

3. Наиболее рациональным решением для практического внедрения признан модифицированный алгоритм A* с IoT-весами, поскольку он сочетает вычислительную эффективность, интерпретируемость и возможность быстрого применения.

4. Предложенная модель динамического веса ребра позволяет учитывать трафик, погодные условия, состояние груза и приоритет перевозки в единой формуле оценки маршрута.

5. Формализация уровней критичности IoT-событий на зеленый, желтый и красный уровни обеспечивает связь между показаниями датчиков и конкретными управляющими действиями системы.

6. Разработанный подход позволяет не только выбирать оптимальный маршрут, но и пересчитывать ETA в процессе движения, что повышает точность планирования доставки.

7. Основной научный вклад статьи состоит в предложении практической схемы динамической маршрутизации, пригодной для внедрения в логистические информационные системы без необходимости длительного обучения на больших массивах данных.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция предложенного подхода с методами машинного обучения, расширение набора учитываемых параметров и экспериментальная верификация модели на реальных логистических данных.

Список литературы

1. Салтаев А.Д. Роль цифровых технологий в оптимизации региональных логистических маршрутов и снижении издержек // Вестник МИРБИС. 2026. № 1(45). С. 48-55. DOI 10.25634/MIRBIS.2026.1.6.

2. Карх Д.А., Копнин А.А., Тураева Д.Т. Интеллектуальное моделирование оценки и выбора поставщиков в логистике на основе технологий нечеткого управления // Цифровые модели и решения. 2025. Т. 4, № 4. С. 81-93. DOI 10.29141/2949-477X-2025-4-4-7.

3. Хабаров В.И., Квашнин В.А. Мультиагентные системы маршрутизации при организации городских перевозок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 2(74). С. 94-102. DOI 10.52170/1815-9265_2025_74_94.

4. Совершенствование системы транспортной логистики промышленного предприятия / Н.С. Кольева, Т.С. Орлова, И.Н. Кольев [и др.] // Транспортное дело России. 2026. № 1. С. 112-115. EDN CMPOUT.

5. Доенин В.В., Лай Мань Зунг, Ляпунцова Е.В. Модели динамической логистики // Естественные и технические науки. 2012. № 2(58). С. 474-480.

6. Исаев Х. Оптимизация маршрутов и планирование логистики при мувинге // Central Asian Scientific Journal. 2025. Т. 3, № 1(25). С. 175-181.

7. Имитационная модель выбора оптимального маршрута / Т. Н. Астахова, А. А. Бердникова, Д. А. Маслова, М. В. Денисова // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Т. 13, № 4. С. 49-62.

8. Санаева Т.А., Ильмушкина А.А., Минаев О.М. Гибридные квантово-классические алгоритмы в задачах оптимизации логистики // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 13, № 3(156). С. 240-245. DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.03.13.027.

9. Ченцов А.Г. Задача маршрутизации «на узкие места» с системой первоочередных заданий // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2023. Т. 61. С. 156-186. DOI 10.35634/2226-3594-2023-61-09.

10. Голопапа Д.О., Погорелова Л.А., Пахомова А.А. Нейросетевые алгоритмы в логистике: снижение затрат и повышение точности планирования на предприятии // Друкеровский вестник. 2025. № 5(67). С. 196-211. DOI 10.17213/2312-6469-2025-5-196-211.

11. Хамидуллина Ф.Р., Исмагилова К.А., Саликова Э.Г. Совершенствование управления материальными запасами в логистике предприятия на основе внедрения и применения Интернета вещей (IOT) // Modern Economy Success. 2022. № 6. С. 304-307.

12. Никогосян А.З., Абрамов В.И. Дистанционное динамическое управление в транспортной логистике: роль и преимущества интернета вещей // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 5, № 4(157). С. 183-195. DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.04.05.022.

13. Макаров А.А., Варнакова Ю.Н. Развитие инструментов транспортной логистики в рамках цифровизации экономики // Вестник Университета мировых цивилизаций. 2024. Т. 15, № 3(44). С. 82-89. DOI 10.24412/2587-6236-2024-344-82-89.

14. Дирко С.В. Технологии Интернета вещей в логистике: зарубежный и отечественный опыт // Интеллектуальные ресурсы – региональному развитию. 2021. № 1. С. 421-425.

15. Перотина Г.А. Сетевое обеспечение интернета вещей // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 3. С. 33-34.

References

1. Saltaev A. D. Rol' cifrovyh tekhnologij v optimizacii regional'nyh logisticheskih marshrutov i snizhenii izderzhek. Vestnik MIRBIS [MIRBIS Bulletin], 2026, no. 1(45), pp. 48-55. DOI 10.25634/MIRBIS.2026.1.6. (in Russian).

2. Karh D. A., Kopnin A. A., Turaeva D. T. Intellektual'noe modelirovanie ocenki i vybora postavshchikov v logistike na osnove tekhnologij nechetkogo upravleniya. Cifrovye modeli i resheniya [Digital models and solutions], 2025, vol. 4, no. 4, pp. 81-93. DOI 10.29141/2949-477X-2025-4-4-7. (in Russian).

3. Habarov V. I., Kvashnin V. A. Mul'tiagentnye sistemy marshrutizacii pri organizacii gorodskih perevozok. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2025, no. 2(74), pp. 94-102. DOI 10.52170/1815-9265_2025_74_94. (in Russian).

4. Sovershenstvovanie sistemy transportnoj logistiki promyshlennogo predpriyatiya / N. S. Kol'eva, T. S. Orlova, I. N. Kol'ev [i dr.]. Transportnoe delo Rossii [Transport in Russia], 2026, no. 1, pp. 112-115. EDN CMPOUT. (in Russian).

5. Doenin V. V., Laj Man' Zung, Lyapuncova E. V. Modeli dinamicheskoj logistiki. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences], 2012, no. 2(58), pp. 474-480. (in Russian).

6. Isaev H. Optimizaciya marshrutov i planirovanie logistiki pri muvinge. Central Asian Scientific Journal [Central Asian Scientific Journal], 2025, vol. 3, no. 1(25), pp. 175-181. (in Russian).

7. Imitacionnaya model' vybora optimal'nogo marshruta / T. N. Astahova, A. A. Berdnikova, D. A. Maslova, M. V. Denisova. International Journal of Open Information Technologies [International Journal of Open Information Technologies], 2025, vol. 13, no. 4, pp. 49-62. (in Russian).

8. Sanaeva T. A., Il'mushkina A. A., Minaev O. M. Gibridnye kvantovo-klassicheskie algoritmy v zadachah optimizacii logistiki. Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya [Economics and Management: Problems and Solutions], 2025, vol. 13, no. 3(156), pp. 240-245. DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.03.13.027. (in Russian).

9. Chencov A. G. Zadacha marshrutizacii «na uzkie mesta» s sistemoj pervoocherednyh zadanij. Izvestiya Instituta matematiki i informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta [News of the Institute of Mathematics and Informatics of Udmurt State University], 2023, vol. 61, pp. 156-186. DOI 10.35634/2226-3594-2023-61-09. (in Russian).

10. Golopapa D. O., Pogorelova L. A., Pahomova A. A. Nejrosetevye algoritmy v

logistike: snizhenie zatrat i povyshenie tochnosti planirovaniya na predpriyatii . Drukerovskij vestnik [Drucker's Bulletin], 2025, no. 5(67), pp. 196-211. DOI 10.17213/2312-6469-2025-5-196-211. (in Russian).

11. Hamidullina F. R., Ismagilova K. A., Salikova E. G. Sovershenstvovanie upravleniya material'nymi zapasami v logistike predpriyatiya na osnove vnedreniya i primeneniya Interneta veshchej (IOT). Modern Economy Success [Modern Economy Success], 2022, no. 6, pp. 304-307. (in Russian).

12. Nikogosyan A. Z., Abramov V. I. Distancionnoe dinamicheskoe upravlenie v transportnoj logistike: rol' i preimushchestva interneta veshchej. Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya [Economics and Management: Problems and Solutions], 2025, vol. 5, no. 4(157), pp. 183-195. DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.04.05.022. (in Russian).

13. Makarov A. A., Varnakova YU. N. Razvitie instrumentov transportnoj logistiki v ramkah cifrovizacii ekonomiki. Vestnik Universiteta mirovyh civilizacij [Bulletin of the University of World Civilizations], 2024, vol. 15, no. 3(44), pp. 82-89. DOI 10.24412/2587-6236-2024-344-82-89. (in Russian).

14. Dirko S. V. Tekhnologii Interneta veshchej v logistike: zarubezhnyj i otechestvennyj opyt. Intellektual'nye resursy – regional'nomu razvitiyu [Intellectual resources for regional development], 2021, no. 1, pp. 421-425. (in Russian).

15. Perotina G. A. Setevoe obespechenie interneta veshchej. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communications, information technology], 2019, no. 3, pp. 33-34. (in Russian).

Kolyeva N.S., Orlova T.S., Kortenko L.V., Zyuzina A.S., Gibadullin T.V.

DYNAMIC ROUTING IN LOGISTICS BASED ON IoT DATA AND A MODIFIED A* ALGORITHM

Abstract*. This article examines the problem of dynamic routing of vehicles and containers under changing traffic conditions, weather, and cargo status. It is shown that classic static routing algorithms are ineffective when timely response to real-time events is critical. A routing approach based on a modified A* algorithm with IoT weights that take into account traffic, weather, cargo parameters, and transportation priority is proposed. Additionally, a classification of IoT event states by severity level is proposed, and a decision-making model for the automatic system response is formalized. The analysis results show that the proposed approach provides interpretability of solutions, rapid implementation, and greater practical applicability compared to classical A* and methods requiring extensive data training.*

Keywords*: dynamic routing, IoT, A*, logistics, smart transportation, adaptive routes.*

Сведения об авторах:	**Information about the authors:**
Кольева Наталья Станиславовна Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, РФ, и.о. зав. кафедрой информационных технологий и статистики кандидат педагогических наук e-mail: kolyeva@usue.ru	**Natalya Stanislavovna Kolyeva** Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russian Federation, Acting Head of the Department of Information Technology and Statistics Candidate of Pedagogical Sciences e-mail: kolyeva@usue.ru

Орлова Татьяна Степановна Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, РФ, доктор философских наук, кандидат экономических наук, профессор кафедры информационных технологий и статистики e-mail: orlovts@usue.ru	**Tatyana Stepanovna Orlova** Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russian Federation, Doctor of Philosophy, Candidate of Economic Sciences, Professor, Department of Information Technology and Statistics e-mail: orlovts@usue.ru
Кортенко Людмила Васильевна Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, РФ, кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных технологий и статистики e-mail: l.v.kortenko@usue.ru	**Lyudmila Vasilyevna Kortenko** Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russian Federation, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Information Technology and Statistics e-mail: l.v.kortenko@usue.ru
Зюзина Анастасия Сергеевна Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, РФ, магистрант кафедры информационных технологий и статистики e-mail: nkoleva@usue.ru	**Anastasia Sergeevna Zyuzina** Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russian Federation, Master's Student, Department of Information Technology and Statistics e-mail: nkoleva@usue.ru
Гибадуллин Тимур Вильевич Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, РФ, студент кафедры информационных технологий и статистики e-mail: gibadullin@mail.ru	**Timur Vilyevich Gibadullin** Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russian Federation, Student, Department of Information Technology and Statistics e-mail: gibadullin@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, основная 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» обозначаются 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 Вестника и требования по оформлению статей размещены на сайте https://journal.dat-dn.ru/.

Научное издание

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№ 3
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. 39,18. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Знак информационной продукции 16+
Подписано в печать 28.09.2026.
Дата выхода в свет 29.09.2026.

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