

ISSN 2071-7296 (Print)
ISSN 2658-5626 (Online)



научный рецензируемый журнал

•ВЕСТНИК СИБАДИ•

The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

“Vestnik SibADI”

Том 22, № 6. 2025
Vol. 22, No. 6. 2025

наука
science

creation
творчество

образование

innovations

education

инновации

technology

технологии

tradition

традиции

ISSN 2071-7296 (Print)
ISSN 2658-5626 (Online)
DOI: 10.26518/2071-7296

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-6

ТОМ 22, № 6. 2025

VOL. 22, No. 6. 2025



Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

644050, г. Омск, проспект Мира, 5
Тел. +7 (3812) 65-03-09;

АДРЕС РЕДАКЦИИ

644050, г. Омск, проспект Мира, 5
Тел. +7 (3812) 60-71-26;

Издаётся с 2004 года
Периодичность издания – 6 раза в год
Подписной индекс в каталоге
ООО «Урал-Пресс» 66000

Founder and Publisher:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

644050, Omsk, 5, Mira Ave.
Phone: +7 (3812) 65-03-09

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

644050, Omsk, 5, Mira Ave.
Phone: +7 (3812) 60-71-26

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

vestnik.sibadi.org
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ» предназначен для информирования научной общественности о результатах научных исследований актуальных в международном сообществе проблем, имеющих теоретическую и практическую значимость. Страницы нашего издания открыты для всех авторов, которые серьезно занимаются научными исследованиями по тематике журнала.

Журнал входит 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 по научным специальностям и соответствующим им отраслям 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),

2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),

2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),

2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.7. – Технология и организация строительства (технические науки),

2.1.8. – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), регистрационный номер СМИ № ФС 77-73591 от 31.08. 2018 г. Входит в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК решением президиума ВАК от 25.02.2011 г.; в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90 – включен в новый перечень. С 2017 г. всем номерам и статьям журнала присваиваются идентификаторы цифровых объектов (DOI). Редакция осуществляет рецензирование (двухстороннее «слепое») всех поступающих в редакцию материалов с целью взыскательной экспертной оценки, а также проверку статей на плагиат.

Этот журнал предоставляет непосредственный открытый доступ к своему контенту исходя из следующего принципа: свободный открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями. Политика открытого доступа соответствует определению Будапештской инициативы открытого доступа (BOAI) и означает, что статьи доступны в открытом доступе в сети Интернет, что позволяет всем пользователям читать, загружать, копировать, распространять, распечатывать, искать или ссылаться на полные тексты этих статей, сканировать их для индексации, передавать в качестве данных для программного обеспечения или использовать их для любых других законных целей без финансовых, юридических или технических барьеров, за исключением тех, которые неотделимы от получения доступа к самому Интернету. Для получения дополнительной информации обратитесь к Будапештской декларации (<https://www.budapestopenaccessinitiative.org>).

Журнал индексируется и архивируется:

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНИТИ РАН;

научной электронной библиотеке «КиберЛенинка»;

Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 22.12.2025. Дата выхода в свет 24.12.2025. Формат 60×84 ¼ Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

Изключительное право на оригинал-макет и оформление принадлежит учредителю журнала, право авторства на статьи – авторам.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2025

"The Russian Automobile and Highway Industry Journal" is intended to inform the scientific community about the results of scientific research of urgent problems with theoretical and practical importance in the International Community. The pages of our journal are open to all authors who are seriously engaged in scientific work.

The Journal is included in the list of peer-reviewed scientific journals published by the Higher Attestation Commission, in which major research results of the dissertations of Candidates of Science (Ph.D) and Doctors of Science (D.Sc.) are published. Scientific specialties and corresponding branches of sciences are

- 2.5.11. – Ground transport and technological systems and complexes (technical sciences),
- 2.9.1. – Transport and transport-technological systems of the country, regions and cities, organization of the transport production (Technical Sciences),
- 2.9.4. – Management of the transportation process (Technical Sciences),
- 2.9.5. – Operation of automobile transport (Technical Sciences),
- 2.1.1. – Building structures, buildings and facilities (Technical Sciences),
- 2.1.5. – Building materials and products (Technical Sciences),
- 2.1.7. – Technology and organization of construction (Technical Sciences),
- 2.1.8. – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels (Technical Sciences).

The journal is the periodical scientific edition registered as mass media. Certificate of registration media is PI NUMBER FS – 77-73591 dated on 31.08.2018 and is issued by the Federal Service of Supervision in the sphere of information technologies and mass communications (Roskomnadzor). The peer-reviewed scientific The Russian Automobile and Highway Industry Journal is included in the list of leading periodicals and recommended by the Higher Attestation Commission by a decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission on 25.02.2011. In accordance with the order of The Ministry of Education and Science of Russia dated by December 28, 2018, No. 90 is included in the new list. Since 2017, all issues and articles of the journal have been assigned by Digital Object Identifiers (DOIs), the data of which are available in electronic version on the vestrik.sibadi.org site. The Editorial Office send submitted materials to reviewing (double-blind reviewing) with the aim of the qualified peer-reviewing and of the manuscripts' verification for plagiarism.

This journal provides direct open access to its content based on the following principle: free open access to research results enhances global knowledge sharing.

The Open Access Policy meets the definition of the Budapest Open Access Initiative (BOAI) and means that articles are available for public access on the Internet, allowing all users to read, download, copy, distribute, print, search or link to the full text of these articles, scan them for indexing, transmit them as data for software or use them for any other lawful purpose without financial, legal or technical barriers, except those that are inseparable from access to the Internet itself. For more information please refer to the Budapest Declaration (<https://www.budapestopenaccessinitiative.org/>).

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika;

The Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

The Journal is a member of

the Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef

The Journal's materials are available under the Creative Commons 4.0 License



Signed in print on 22.12.2025. Publication date is 24.12.2025. Format is 60 × 84 ¼.

Headset is Arial, operational printing, offset paper, 27,25 conditionally printed sheets, 500 copies. Free of charge. Printed at the Printing and Publishing Complex of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia

Content is available under license CC BY.

Received materials are not returned. Fees are not paid. All articles are published free of charge.

The sole right to the original layout and design belongs to the founder of the journal, the right of authorship to the articles belongs to the authors.

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Жигадло Александр Петрович,
д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф., член-кор. АВН, ректор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Сибирский
государственный автомобильно-дорожный университет
(СибАДИ)», г. Омск, Россия

Scopus Author ID 57202984669,
ORCID ID 0000-0002-8883-3167

Транспортное, горное и строительное машиностроение

Трояновская Ирина Павловна, д-р техн. наук, проф. Южно-
Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017,
ORCID ID 0000-0003-2763-0515

Корытов Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, доц., проф.
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Сибирский
государственный автомобильно-дорожный университет
(СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57035238500, **Researcher ID** B-5667-2015,
ORCID ID 0000-0002-5104-7568

Транспорт

Витвицкий Евгений Евгеньевич, д-р техн. наук, проф.,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Сибирский
государственный автомобильно-дорожный университет
(СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57193406974, **Researcher ID** N-9779-2017,
ORCID ID 0000-0002-0155-8941

Трофимова Людмила Семеновна, д-р техн. наук, доц.
Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный автомобильно-
дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия.
Scopus Author ID 57212171087,
ORCID ID 0000-0001-7312-1557

Строительство и архитектура

Ефименко Сергей Владимирович, д-р техн. наук,
доц., проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Томский
государственный архитектурно-строительный университет»,
г. Томск, Россия.
Scopus Author ID 56487412400,
Researcher ID AAB-7416-2020,
ORCID ID 0000-0001-7064-1418

Бурянов Александра Федорович, д-р техн. наук, доц.,
исполнительный директор, НО «Российская Гипсовая
Ассоциация», г. Москва, Россия
Scopus Author ID 55975665000;
Researcher ID AAE-4850-2022,
ORCID ID 0000-0002-3331-9443

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Боброва Татьяна Викторовна, д-р техн. наук, проф.,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Сибирский
государственный автомобильно-дорожный университет
(СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57201362187, **Researcher ID** Y-3916-2018,
ORCID ID 0000-0002-0292-4421

Боровик Виталий Сергеевич, д-р техн. наук, проф.,
Волгоградский научно-технический центр, г. Волгоград,
Россия
Scopus Author ID 57192819653, **SPIN-код** 3552-6019,
ORCID ID 0000-0002-2409-4078

Винников Юрий Леонидович, д-р техн. наук, проф.,
Полтавский национальный технический университет
им. Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина
Scopus Author ID 6603741286, **Researcher ID** P-7880-2015,
ORCID ID 0000-0003-2164-9936

Горынин Глеб Леонидович, д-р физ.-мат. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРЫ», г. Сургут, Россия
Scopus Author ID 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021,
ORCID ID 0000-0001-7843-7278

Гумаров Гали Сагингалиевич, д-р техн. наук, проф., член-
кор. Российской Академии Естествознания, Евразийский
национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана,
Республика Казахстан

Данилов Борис Борисович, д-р техн. наук, Институт
горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,
Россия.

Scopus Author ID 7003684882, **Researcher ID** E-2362-2014,
ORCID ID 0000-0002-6685-9606

Ефименко Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф.,
Томский государственный архитектурно-строительный
университет, г. Томск, Россия
Scopus Author ID 56487473100

Жусупбеков Аскар Жагпарович, д-р техн. наук, проф.,
член-кор. Национальной инженерной академии Республики
Казахстан, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан.
Scopus Author ID 6507768437, **Researcher ID** E-4049-2015,
ORCID ID 0000-0001-6154-1263

Зырянов Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф., зав.
кафедрой «Организация перевозок и дорожного движения»
Донского государственного технического университета,
г. Ростов-на-Дону

Scopus Author ID 26424901100, **Researcher ID** A-5063-2014,
ORCID ID 0000-0002-5567-5457

Кондаков Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доц.,
проф. кафедры «Колесные и гусеничные машины». Южно-
Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет), Челябинск, Россия.

Scopus Author ID 56556574700, **Researcher ID** M-5466-2018,
ORCID ID 0000-0001-6818-1694

Копаница Наталья Олеговна, д-р техн. наук, проф., проф.
кафедры «Строительные материалы и технологии». Томский
государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия.

Scopus Author ID 6506597418, **Researcher ID** A-8158-2016,
ORCID ID 0000-0002-0991-8550

Корнеев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., Омский
государственный технический университет (ОМГТУ), г. Омск,
Россия

Scopus Author ID 7006776195, **Researcher ID** V-8864-2018

Коротаев Дмитрий Николаевич, д-р техн. наук, доц., проф.
Российский государственный геологоразведочный
университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия.
Scopus Author ID 6506823308, **Researcher ID** ID T-5750-
2017, **ORCID ID** 0000-0002-5957-4135

Корягин Марк Евгеньевич, д-р техн. наук, доц., ФГБОУ
ВО «Сибирский государственный университет путей
сообщения», г. Новосибирск, Россия
Scopus Author ID 12794946600, **Researcher ID** M-1500-2013,
ORCID ID 0000-0002-1976-7418

Курганов Валерий Максимович, д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»,
г. Тверь, Россия
ORCID ID 0000-0001-8494-2852, **Scopus Author ID** 6506823308,
Researcher ID T-5750-2017

Леонович Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф.,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь
Scopus Author ID 5588773300, **Researcher ID** A-4757-2016,
ORCID ID 0000-0002-4026-820X

Лесовик Валерий Станиславович, д-р техн. наук, проф.,
член-кор. РААСН, БГТУ им. Шухова, г. Белгород, Россия
Scopus Author ID 5588773300, **Researcher ID** A-4757-2016
ORCID ID 0000-0002-2378-3947

Макеев Сергей Александрович, д-р техн. проф. наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Сибирский

государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57200729552, **Researcher ID** AAU-8361-2020, **ORCID** 0000-0002-2915-982X

Матвеев Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 56297305000, **Researcher ID** Y-3137-2018
ORCID ID 0000-0001-7362-0399

Маткеримов Таалайбек Үсманалиевич, д-р техн. наук, проф., КГТУ им. И. Рazzакова, г. Бишкек, Киргизская Республика
Researcher ID P-2811-2017, **ORCID** ID 0000-0001-5393-7700

Мещеряков Виталий Александрович, д-техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 7006700218, **Researcher ID** H-2077-2016, **ORCID** ID 0000-0001-9913-2078

Мочалин Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 6507433262, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID** ID 0000-0003-3651-0961

Немировский Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия
Scopus Author ID 12759501600, **Researcher ID** M-8151-2017, **ORCID** ID 0000-0002-4281-4358

Новиков Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., Директор Политехнического института имени Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева» г. Орел, Россия
Scopus Author ID 57077906200, **Researcher ID** B-9082-2016, **ORCID** ID 0000-0001-5496-4997

Перегуд Яна Арнольдовна д-р экон. наук, проф. Высшая школа экономики в Варшаве (SGH), г. Варшава, Польша
Scopus Author ID 26649146500, **Researcher ID** A-1858-2014, **ORCID** ID 0000-0003-1774-5220

Плачиди Лука Л. доктор наук, доцент инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO, г. Рим, Италия
Scopus Author ID 57199322424, **ORCID** ID 0000-0002-1461-3997

Подшивалов Владимир Павлович, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
ORCID ID 0000-0002-2529-6018, **Researcher ID** E-4066-2018

Пономарев Андрей Будимирович, д-р техн. наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия
Scopus Author ID 6603146403, **Researcher ID** A-8668-2013, **ORCID** ID 0000-0001-6521-9423

Рассоха Владимир Иванович, д-р техн. наук, доц., проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия
Scopus Author ID 57193742928, **Researcher ID** M-3242-2017, **ORCID** ID 0000-0002-7836-2242

Савельев Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57159787800, **Researcher ID** A-4081-2019, **ORCID** ID 0000-0002-4034-2457

Ваклав Скала, профессор Университет Западной Богемии, г. Пльзень, Чехия
Scopus Author ID 7004643209, **Researcher ID** F-9141-2011, **ORCID** ID 0000-0001-8886-4281

Трофименко Юрий Васильевич, д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) г. Москва, Россия
Scopus Author ID 56098551600, **Researcher ID** N-7846-2018, **ORCID** ID 0000-0002-3650-5022

Хмара Леонид Андреевич, д-р техн. наук, проф., Приднепровская государственная академия Строительства и Архитектуры, г. Днепропетровск, Украина
Scopus Author ID 6505880056

Федюк Роман Сергеевич, д-р техн. наук, доц., проф., Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия
Scopus Author ID 57199850188, **Researcher ID** N-6730-2017, **ORCID** ID 0000-0002-2279-1240

Чекардовский Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия
Scopus Author ID 57192297387, **Researcher ID** C-3414-2019, **ORCID** ID 0000-0002-7166-1936

Чулкова Ирина Львовна, д-р техн. наук, проф.. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 12645632400, **ORCID** ID 0000-0003-4451-2297

Шаршембиев Жыргалбек Сабырбекович, д-р техн. наук, проф., Кыргызский Национальный аграрный университет имени К.И. Скрябина, г. Бишкек, Киргизская Республика
Scopus Author ID 57216812633, **Author ID** в РИНЦ 595504

Щербаков Виталий Сергеевич, д-р техн. наук, проф.. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57034922100, **Researcher ID** N-1716-2017, **ORCID** ID 0000-0002-3084-2271

Чжаньпин, Ph.-D., профессор Мичиганского технологического университета, Хаутон, США.
Scopus Author ID 14420403300, **Researcher ID** P-4406-2015, **ORCID** ID 0000-0002-9103-6599

Эдин Козневски, д-р техн. наук, проф., Белостокский технический университет г. Белосток, Польша
Scopus Author ID 9843546900, **Researcher ID** N-3447-2017, **ORCID** ID 0000-0001-7052-9602

Якунина Наталья Владимировна, д-р техн. наук, доц., проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия
Scopus Author ID 55673113100, **Researcher ID** E-9038-2015, **ORCID** ID 0000-0002-8952-2694

Якунин Николай Николаевич, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия
Scopus Author ID 6603541652, **Researcher ID** E-9035-2015, **ORCID** ID 0000-0001-6282-2331

Мороз Галина Владимировна редактор-ответственный секретарь, e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

Садина Елена Викторовна директор издательско-полиграфического комплекса СибАДИ
e-mail: sadina.elena@gmail.com

Рахуба Лилия Федоровна переводчик
e-mail: lira_omsib@mail.ru

Максимюк Елена Валентиновна переводчик
e-mail: grechko_ev@mail.ru

Соболева Оксана Андреевна корректор
e-mail: riosibadi@gmail.com

EDITORIAL TEAM

Editor-in-chief Alexandre P. Zhigadlo, Dr. of Sci. (Pedagogy), Cand. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of Academy of Military Science, Rector of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57202984669,
ORCID ID 0000-0002-8883-3167

Transport, mining and mechanical engineering

Irina P. Troyanovskaya, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia
Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017,
ORCID ID 0000-0003-2763-0515

Mikhail S. Korytov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57035238500, **Researcher ID** B-5667-2015,
ORCID ID 0000-0002-5104-7568

Transport

Evgeniy E. Vitvitskiy, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57193406974, **Researcher ID** N-9779-2017,
ORCID ID 0000-0002-0155-8941

Liudmila S. Trofimova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57212171087, **ORCID ID** 0000-0001-7312-1557

Construction and architecture

Sergey V. Efimenko, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Science Federal State Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Architecture and Building», Tomsk, Russia
Scopus Author ID 56487412400,
Researcher ID AAB-7416-2020,
ORCID ID 0000-0001-7064-1418

Aleksandr F. Buryanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Executive Director, NO Russian Gypsum Association, Moscow, Russia
Scopus Author ID 55975665000,
Researcher ID AAE-4850-2022, **ORCID ID** 0000-0002-3331-9443

EDITORIAL BOARD

Tatiana V. Bobrova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57201362187, **Researcher ID** Y-3916-2018,
ORCID ID 0000-0002-0292-4421

Vitaliy S. Borovik, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Volgograd Science and Technology Center, Volgograd, Russia
Scopus Author ID 57192819653, **SPIN-код** 3552-6019,
ORCID ID 0000-0002-2409-4078

Yuriy L. Vinnikov, Dr. of Sci. (Engineering), Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk, Poltava, Ukraine
Scopus Author ID 6603741286, **Researcher ID** P-7880-2015,
ORCID ID 0000-0003-2164-9936

Gleb L. Gorynin, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the «SurGUKMAO-Yugra», Surgut, Russia
Scopus Author ID 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021,
ORCID ID 0000-0001-7843-7278

Gali S. Gumarov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural History, Eurasian National University named after L.N. Gumilev, Astana, Republic of Kazakhstan

Boris B. Danilov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mining and Construction Geotechnics, Mining Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 7003684882, **Researcher ID** E-2362-2014,
ORCID ID 0000-0002-6685-9606

Vladimir N. Efimenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia
Scopus Author ID 56487473100

Askar Zh. Zhusupbekov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, ENU named after L.N. Gumilev, Astana, Kazakhstan
Scopus Author ID 6507768437, **Researcher ID** E-4049-2015,
ORCID ID 0000-0001-6154-1263

Vladimir V. Zyryanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University, Rostov on Don
Scopus Author ID 26424901100, **Researcher ID** A-5063-2014,
ORCID ID 0000-0002-5567-5457

Sergey V. Kondakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia
Scopus Author ID 56556574700, **Researcher ID** M-5466-2018,
ORCID ID 0000-0001-6818-1694

Natalia O. Kopanitsa, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia
Scopus Author ID 6506597418, **Researcher ID** A-8158-2016,
ORCID ID 0000-0002-0991-8550

Sergey V. Korneev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Scopus Author ID 7006776195, **Researcher ID** V-8864-2018

Dmitriy N. Korotaev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University, Moscow, Russia.
Scopus Author ID 6506823308, **Researcher ID** T-5750-2017,
ORCID ID 0000-0002-5957-4135

Mark E. Koryagin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 12794946600, **Researcher ID** M-1500-2013,
ORCID ID 0000-0002-1976-7418

Valeriy M. Kurganov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tver State University, Tver, Russia
Scopus Author ID 57196729393, **Researcher ID** A-6227-2017,
ORCID ID 0000-0001-8494-2852

Sergey N. Leonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus
Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016,
ORCID ID 0000-0002-4026-820X

Valeriy S. Lesovik, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of RAASN, BSTU named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia
Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016
ORCID ID 0000-0002-2378-3947

Sergey A. Makeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
ORCID ID 0000-0002-2915-982X, **Scopus Author ID** 57200729552,
Researcher ID AAU-8361-2020

Sergey A. Matveev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 56297305000, **Researcher ID** Y-3137-2018,
ORCID ID 0000-0002-7836-2242

- Taalalibek I. Matkerimov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, KSTU named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyz Republic
Researcher ID P-2811-2017, **ORCID ID** 0000-0001-5393-7700
- Vitaliy A. Meshcheryakov**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 7006700218, **Researcher ID** H-2077-2016, **ORCID ID** 0000-0001-9913-2078
- Sergey M. Mochalin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 6507433262, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID ID** 0000-0003-3651-0961
- Yuriy V. Nemirovsky**, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Federal State Budgetary Institution of Science «The Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 12759501600, **Researcher ID** M-8151-2017 **ORCID ID** 0000-0002-4281-4358
- Alexandr N. Novikov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Scopus Author ID 57077906200, **Researcher ID** B-9082-2016, **ORCID ID** 0000-0001-5496-4997
- Yana A. Peregood**, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Higher School of Economics in Warsaw, Warsaw, Poland
Scopus Author ID 26649146500, **Researcher ID** A-1858-2014, **ORCID ID** 0000-0003-1774-5220
- Luca Placidi**, Dr. of Sci. (Engineering), Associated Professor, International Telematic University (UNINETTUNO), Rome, Italy
Scopus Author ID 57199322424, **ORCID ID** 0000-0002-1461-3997
- Vladimir P. Podshivalov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus
ORCID ID 0000-0002-2529-6018, **Researcher ID** E-4066-2018
- Andrey B. Ponomarev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Technical University, Perm, Russia
Scopus Author ID 6603146403, **Researcher ID** A-8668-2013, **ORCID ID** 0000-0001-6521-9423
- Vladimir I. Rassokha**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Scopus Author ID 57193742928, **Researcher ID** M-3242-2017, **ORCID ID** 0000-0002-7836-2242
- Sergey V. Saveliev**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Russia
Scopus Author ID 57159787800, **ORCID ID** 0000-0002-4034-2457, **Researcher ID** A-4081-2019
- Václav Skala**, Professor of the West Bohemia University, Plzen, Czech Republic
Scopus Author ID 7004643209, **Researcher ID** F-9141-2011, **ORCID ID** 0000-0001-8886-4281
- Yuriy V. Trofimenko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Moscow, Russia
Scopus Author ID 56098551600, **Researcher ID** N-7846-2018, **ORCID ID** 0000-0002-3650-5022
- Roman S. Fediuk**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Far Eastern Federal University FEFU, Vladivostok, Russia
Scopus Author ID 57199850188, **Researcher ID** N-6730-2017, **ORCID ID** 0000-0002-2279-1240
- Leonid A. Khmara**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Pridneprovskaya State Academy of Construction and Architecture, Dnepropetrovsk, Ukraine
Scopus Author ID 6505880056
- Vasiliy G. Khomchenko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Scopus Author ID 6603880234, **Researcher ID** P-8539-2015, **ORCID ID** 0000-0003-3151-7937
- Mikhail N. Chekardovskiy**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
Scopus Author ID 57192297387, **Researcher ID** C-3414-2019, **ORCID ID** 0000-0002-7166-1936
- Irina L. Chulkova**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 12645632400, **ORCID ID** 0000-0003-4451-2297
- Zhirgalbek S. Sharshembiev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Scriabin, Bishkek, Kyrgyz Republic,
Scopus Author ID 57216812633, **Author ID** в РИНЦ 595504
- Vitaliy V. Shcherbakov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57034922100, **Researcher ID** N-1716-2017, **ORCID ID** 0000-0002-3084-2271
- Zhanping You**, Professor, Michigan Technological University, Houghton, USA
Scopus Author ID 14420403300, **ORCID ID** 0000-0002-9103-6599, **Researcher ID** P-4406-2015
- Edwin Koźniewski**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Białystok, Poland
Scopus Author ID 9843546900, **Researcher ID** N-3447-2017, **ORCID ID** 0000-0001-7052-9602
- Natalia V. Yakunina**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Scopus Author ID 55673113100, **Researcher ID** E-9038-2015, **ORCID ID** 0000-0002-8952-2694
- Nikolai N. Yakunin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Scopus Author ID 6603541652, **Researcher ID** E-9035-2015, **ORCID ID** 0000-0001-6282-2331
- Galina V. Moroz**
Executive Journal Secretary
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org
- Elena V. Sadina**
Director of the Publishing and Printing Complex
e-mail: sadina.elena@gmail.com
- Liliya F. Rakhuba**
Journal Interpreter
e-mail: lira_omsib@mail.ru
- Elena V. Maksimyuk**
Journal Interpreter
e-mail: grechko_ev@mail.ru
- Oksana A. Soboleva**
Journal Corrector
e-mail: riosibadi@gmail.com

**РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ**

С.В. Корнеев, Р.С. Большаков ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ	872
В.Д. Габидулин, В.Н. Добромиров, И.О. Черняев СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕНЗИНОВЫМ И ДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ	882

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А.А. Гришин, С.В. Жанказиев, С.С. Титова АНАЛИЗ АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОБУСОВ КАК ОСНОВНОГО ТРАНСПОРТА НГПТ В УСЛОВИЯХ МОСКВЫ	896
А.Н. Новиков, Л.Е. Кущенко, С.В. Кущенко, И.А. Улинец ДЕТЕКЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОПАСНЫХ МАНЕВРОВ НА ОСНОВЕ ВИДЕОДАННЫХ С ДОРОЖНЫХ КАМЕР	916
В.С. Асламова, А.А. Асламов, Е.А. Пряхина ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВАРИЙНОСТИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ	928
Р.Р. Загидуллин ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ПРИМЕРЕ Г. КАЗАНИ	940
Д.А. Лазарев МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА УЧАСТКЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ	952
Е.В. Мирошников МОДЕЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЁМА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК В РЕГИОНЕ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА (НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ).....	966
С.В. Дорохин, Р.А. Котов ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКА АВТОБУСНОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ.....	976
А.В. Бордуков ТРЕХФАЗНАЯ ТЕОРИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ Б. КЕРНЕРА И ЕЕ СРАВНЕНИЕ С КЛАССИЧЕСКИМИ ДВУХФАЗНЫМИ ТЕОРИЯМИ	986

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

В.В. Чусов, Р.Х. Муртазин, А.С. Александров УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУСТОТ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	1000
И.С. Кузнецов, В.Н. Кузнецова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЛЬДА.....	1018

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Sergey V. Korneev, Roman S. Bolshakov

- MATHEMATICAL MODELING OF A VEHICLE BASED ON METHODS OF STRUCTURAL THEORY
OF VIBRATION PROTECTION SYSTEMS.....** 873

Vladimir D. Gabidulin, Viktor N. Dobromirov, Igor O. Chernyaev

- COMPARATIVE EVALUATION OF DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS
OF GASOLINE AND DIESEL ENGINES BY ACOUSTIC PARAMETERS.....** 883

PART II. TRANSPORT

Artem A. Grishin, Sultan V. Zhankaziev, Svetlana S. Titova

- ANALYSIS OF THE RELEVANCE OF USING ELECTRIC BUSES AS A PRIMARY MEANS
OF URBAN PUBLIC TRANSPORT IN MOSCOW CONDITIONS.....** 897

Alexander N. Novikov, Liliya E. Kushchenko, Sergey V. Kushchenko, Iosif Al. Ulinets

- DETECTION AND CLASSIFICATION OF DANGEROUS MANEUVERS BASED
ON TRAFFIC CAMERA RECORDINGS.....** 917

Vera S. Aslamova, Alexandr A. Aslamov, Elizaveta A. Pryakhina

- DYNAMICS OF ACCIDENT RATES ON THE ROADS OF THE IRKUTSK REGION.....** 929

Ramil R. Zagidullin

- IMPROVING TRAFFIC EFFICIENCY THROUGH DYNAMIC TRAFFIC SPEED CONTROL
(KAZAN CASE STUDY)** 941

Dmitriy A. Lazarev

- MULTICRITERIA METHOD FOR ASSESSING THE ROAD TRAFFIC SAFETY LEVEL
ON A STREET NETWORK SECTION** 953

Evgeniy V. Miroshnikov

- LONG-TERM FORECASTING MODEL OF THE ROAD CARGO TRANSPORTATION VOLUME
IN THE REGION BASED ON AN ECONOMETRIC APPROACH
(ON THE EXAMPLE OF THE BELGOROD REGION)** 967

Sergey V. Dorokhin, Roman A. Kotov

- FORECASTING OF PUBLIC BUS PASSENGER FLOW IN THE VORONEZH REGION** 977

Anton V. Bordukov

- KERNER'S THREE-PHASE THEORY OF TRAFFIC FLOWS
AND ITS COMPARISON WITH CLASSICAL TWO-PHASE THEORIES.....** 987

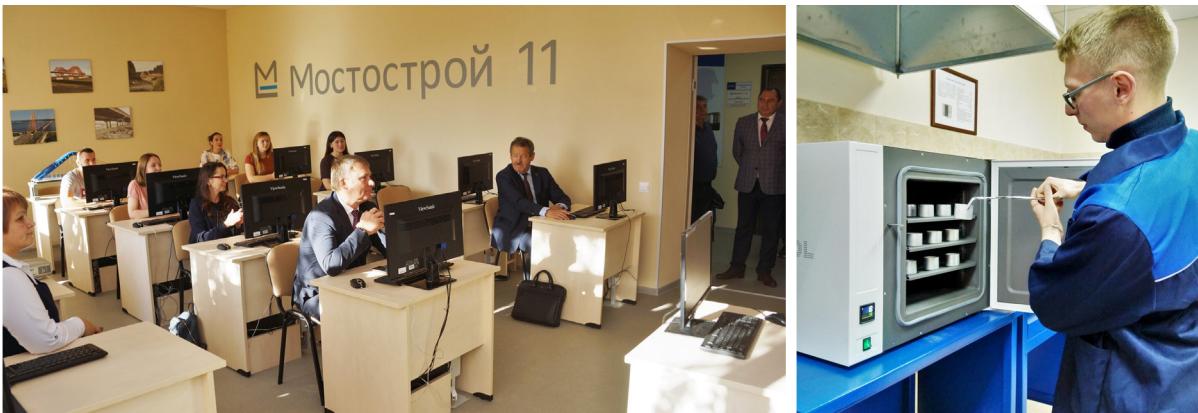
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Vasiliy V. Chusov, Rais Kh. Murtazin, Anatoliy S. Aleksandrov

- THE CONSIDERATION OF AIR VOID CONTENT EFFECT
ON ASPHALT CONCRETE ELASTIC MODULUS IN PAVEMENT DESIGN** 1001

Ilya S. Kuznetsov, Viktoria N. Kuznetsova

- EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PHYSICAL
AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED ICE COATINGS.....** 1019



РАЗДЕЛ I.
ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ
И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ



PART I.
TRANSPORT,
MINING AND MECHANICAL
ENGINEERING

Научная статья

УДК 629.3.027

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-872-881>

EDN: JSJBYT



Check for updates

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ

С.В. Корнеев¹, Р.С. Большаков² ¹Омский государственный технический университет,
г. Омск, Россия²Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Россия ответственный автор
bolshakov_rs@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью проведения научных исследований является оценка возможностей структурной теории виброзащитных систем применительно к формированию математической модели рессорного подвешивания транспортного средства. Такая задача является актуальной, так как в теоретическом плане вопросы в данном направлении не до конца проработаны.

Материалы и методы. В рамках структурной теории используется аналогия между расчётными схемами технических объектов в виде механических колебательных систем и системами автоматического управления. Системы автоматического управления в данном случае эквивалентны в динамическом отношении исходным расчётным схемам. Такой подход позволяет использовать при анализе технических объектов методы теории автоматического управления.

Результаты. Проведен анализ научной литературы в области теории развития подвески транспортных средств. Оценивается возможность использования методологии структурного математического моделирования при формировании подходов к математическому моделированию подвесок транспортных средств. Предложен подход к подбору параметров подвески транспортного средства. В линейной постановке построена математическая модель системы в виде уравнений движения в операторной форме с учетом упругих и демпфирующих элементов. На основе уравнений движения получены передаточные функции системы по двум координатам.

Обсуждение и заключение. Приведены аналитические соотношения с учетом коэффициента связности координат движения технического объекта. Получены передаточные функции соотношения координат движения элементов транспортных средств с учётом демпфирующих элементов и при действии условного случайного сигнала от неровностей дорожного покрытия.

Анализ показывает, что решение задачи формирования математической модели транспортных средств можно осуществить методами структурной теории виброзащитных систем даже в линейной постановке. Полученные результаты позволяют в первом приближении улучшить динамические характеристики подвески автомобиля как системы автоматического управления. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку возможностей активных и полуактивных виброзащитных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структурная теория виброзащитных систем, транспортные средства, математическое моделирование, рессорное подвешивание

Статья поступила в редакцию 24.09.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Корнеев С.В., Большаков Р.С. Особенности построения математической модели транспортного средства на основе методов структурной теории виброзащитных систем // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 872-881. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-872-881>

© Корнеев С.В., Большаков Р.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-872-881>

EDN: JSJBYT

MATHEMATICAL MODELING OF A VEHICLE BASED ON METHODS OF STRUCTURAL THEORY OF VIBRATION PROTECTION SYSTEMS

Sergey V. Korneev¹, Roman S. Bolshakov² 

¹Omsk State Technical University,
Omsk, Russia

²Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russia

 corresponding author
bolshakov_rs@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the research is to evaluate the capabilities of the structural theory of vibration protection systems as applied to mathematical modeling the spring suspension of a vehicle. This is an urgent problem since there is obvious lack in theoretical knowledge in this area.

Materials and methods. Within the framework of the structural theory, the analogy method has been used to compare the calculation schemes of technical objects in the form of mechanical oscillatory systems and automatic control systems. In this case, automatic control systems are equivalent in dynamic terms to the original calculation schemes. This approach allows to use automatic control theory methods in the analysis of technical objects.

Results. An analysis of scientific literature in the field of vehicle suspension design theory has been carried out. The possibility of using the methodology of structural mathematical modeling in the development of approaches to rational vehicle suspension design has been assessed. An approach to selecting vehicle suspension parameters has been proposed. In a linear formulation, a mathematical model of the system has been constructed in the form of operator equations of motion, elastic and damping elements being taken into account. Based on the equations of motion, transfer functions of the system in two coordinates have been obtained.

Discussions and Conclusion. Analytical relationships are given taking into account the linkage coefficient of technical objects motion coordinates. The transfer functions of the relationship between vehicle elements motion coordinates were obtained taking into account the effect of damping elements and conditional random signals of road surface irregularities.

The analysis suggests that the solution to the problem of mathematical modeling a rational vehicle suspension can be implemented through using methods of the structural theory of vibration protection systems even in a linear formulation. The results obtained have made it possible to improve the dynamic characteristics of the car suspension as an automatic control system in the first approximation. Further research will be aimed at evaluating the capabilities of active and semi-active vibration protection systems.

KEYWORDS: structural theory of vibration protection systems, vehicles, mathematical modeling, spring suspension

The article was submitted: September 24, 2025; **approved after reviewing:** November 10, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Korneev S.V., Bolshakov R.S. Mathematical modeling of a vehicle based on methods of structural theory of vibration protection systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(6): 872-881.
<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-872-881>

© Korneev Sergey V., Bolshakov Roman S., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Обновление экономических связей внутри страны направлено на смещение акцентов с сырьевой к инновационной модели развития с целью крупномасштабного перехода к замещению импортной продукции широкой номенклатуры промышленных товаров, в том числе для последующей интеграции в мировое экономическое пространство. В этой ситуации необходимо обратить внимание на повышение нагрузки на автомобильный и электрический виды транспорта, что должно учитываться оценке безопасности перевозочных процессов в долгосрочной перспективе развития отрасли¹ [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Необходимо отметить ряд проблем, от решения которых зависит поступательное движение автомобильного транспорта. К ним можно отнести ненадлежащее качество транспортных услуг, интенсивную эксплуатацию дорожной сети, недобросовестную конкуренцию, высокий уровень аварийности, низкую экологичность автомобильного транспорта для внешней среды и населения и др.² [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Все эти факторы так или иначе зависят от текущего технического состояния, имеющегося в наличии подвижного состава.

Текущее состояние подвижного состава напрямую влияет на его износ [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], в том числе в условиях долговременной эксплуатации основных фондов подвижного состава автомобильного транспорта, что в конечном итоге ведёт к увеличению себестоимости перевозок. В этой связи одной из важных задач является улучшение силовых характеристик подвески автомобилей.

В предлагаемой статье рассматривается формирование математической модели рессорного подвешивания на основе методов структурной теории виброзащитных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Повышение производительности автомобильного транспорта напрямую зависит от подвески эксплуатируемого подвижного состава как комплекса демпфирующих, упругих

и направляющих элементов. Усовершенствование каждого из них определяет техническое состояние транспортного средства.

Основные проблемы, возникающие в связи с упругим устройством подвески, сводятся к выбору типа упругого элемента и характеристики упругого устройства подвески. Перспективными являются исследования в области оценки упругих элементов пневматического, гидравлического и гидропневматического типа, в том числе в контексте по автоматизации подвески.

Основной частью подвески является упругий элемент. Варьирование параметров со ставляющих элементов подвески позволяет изменять жесткость подвески по различным законам, что ставит вопрос о рациональной характеристике подвески в плоскость актуальности и практического применения. В рессорных, пружинных, торсионных и других подвесках с металлическими упругими элементами удается изменять в нужных пределах жесткость в зависимости от перемещения колеса. Это достигается сочетанием нескольких упругих элементов и рычажной связи. Важным является решение вопроса об изменении жесткости подвески в зависимости от внешних факторов.

Широкое применение систем автоматического управления ставит вопрос о применении методов структурной теории виброзащитных систем для формирования математической модели системы подвески автомобиля для улучшения плавности хода [1, 2]. На рисунке 1 приведена расчётная схема автомобиля в виде механической колебательной системы со следующими обозначениями: M , m_1 , m_2 , m_3 – массо-инерционные элементы, k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} , k_3 – коэффициенты жесткости упругих элементов, b_{11} , b_{12} , b_{21} , b_{22} , b_3 – коэффициенты демпфирования, l_0 , l_1 , l_2 – расстояния от центра тяжести O до точки крепления массы m_3 и крайних точек твердого тела соответственно, J – момент инерции. Движение твердого тела описывается координатами y_1 , y_2 и y_0 , ϕ , а движение промежуточных масс промежуточных масс – в y_{11} , y_{12} .

¹Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4261-р. Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 г.

²Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2018. 692 с.

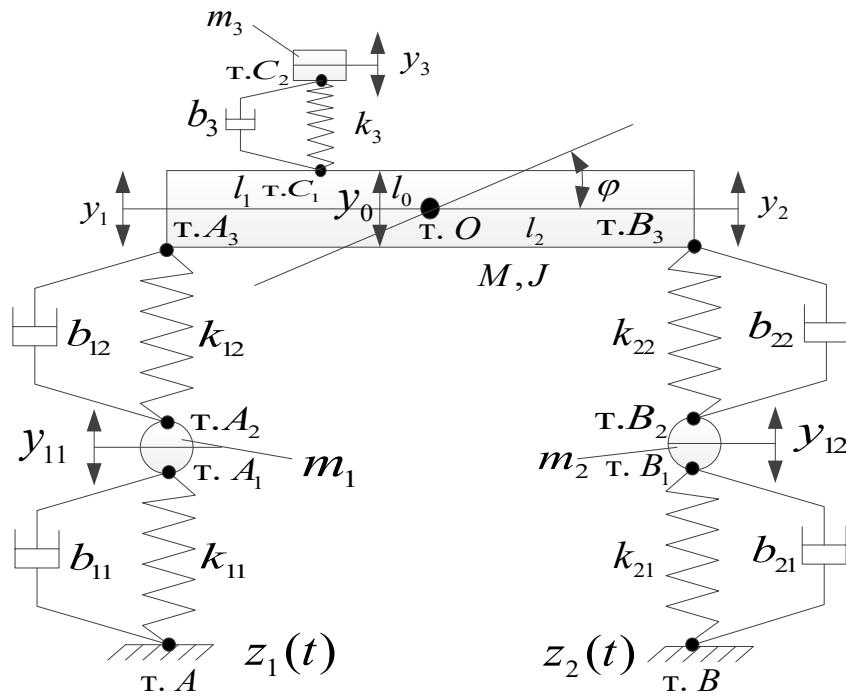


Рисунок 1 – Расчетная схема автомобиля
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Car design scheme
Source: compiled by the authors.

На основании расчетной схемы построим выражения для кинетической, потенциальной и энергии рассеяния:

$$T = \frac{1}{2} M y_0'^2 + \frac{1}{2} J \varphi^2 + \frac{1}{2} m_1 y_{11}'^2 + \frac{1}{2} m_2 y_{12}'^2 + \frac{1}{2} m_3 y_3'^2, \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_{12} (y_1 - y_{11})^2 + \frac{1}{2} k_{22} (y_2 - y_{21})^2 + \frac{1}{2} k_{11} (y_{11} - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_{21} (y_{12} - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - y_{c1})^2, \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} b_{12} (y_1' - y_{11}')^2 + \frac{1}{2} b_{22} (y_2' - y_{21}')^2 + \frac{1}{2} b_{11} (y_{11}' - z_1')^2 + \frac{1}{2} b_{21} (y_{12}' - z_2')^2 + \frac{1}{2} b_3 (y_3' - y_{c1}')^2. \quad (3)$$

Примем ряд дополнительных соотношений:

$$\begin{aligned} y_0 &= ay_1 + by_2, \varphi = c(y_2 - y_1), y_{c1} = y_0 - l_0 \varphi, \\ a &= \frac{l_2}{l_1 + l_2}, b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, c = \frac{1}{l_1 + l_2}, a_1 = a + l_0 c, b_1 = b - l_0 c. \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда выражения (1) – (3) примут следующий вид:

$$T = \frac{1}{2} M (ay_1' + by_2')^2 + \frac{1}{2} J (c(y_2' - y_1'))^2 + \frac{1}{2} m_1 y_{11}'^2 + \frac{1}{2} m_2 y_{12}'^2 + \frac{1}{2} m_3 y_3'^2, \quad (5)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_{12} (y_1 - y_{11})^2 + \frac{1}{2} k_{22} (y_2 - y_{21})^2 + \frac{1}{2} k_{11} (y_{11} - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_{21} (y_{12} - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - a_1 y_1 - b_1 y_2)^2, \quad (6)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} b_{12} (y_1' - y_{11}')^2 + \frac{1}{2} b_{22} (y_2' - y_{21}')^2 + \frac{1}{2} b_{11} (y_{11}' - z_1')^2 + \frac{1}{2} b_{21} (y_{12}' - z_2')^2 + \frac{1}{2} b_3 (y_3' - a_1 y_1' - b_1 y_2')^2. \quad (7)$$

Запишем для исследуемого технического объекта дифференциальных уравнений движения:

$$\begin{aligned} & Ma^2y_1'' + Maby_2'' + Jc^2y_1'' - Jc^2y_2'' + b_{12}(y_1' - y_{11}') + \\ & + b_3(a_1^2y_1' + a_1b_1y_2' - y_3'a_1) + k_{12}(y_1 - y_{11}) + k_3(a_1^2y_1 + a_1b_1y_2 - y_3a_1) = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & Mb^2y_2'' + Maby_1'' + Jc^2y_2'' - Jc^2y_1'' + b_{22}(y_2' - y_{12}') + \\ & + b_3(b_1^2y_2' + a_1y_1'b_1 - y_3b_1) + k_{22}(y_2 - y_{12}) + k_3(b_1^2y_2 + a_1y_1b_1 - y_3b_1) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$m_1y_{11}'' + b_{11}y_{11}' + k_{11}y_{11} = b_{11}z_1' + k_{11}z_1, \quad (10)$$

$$m_2y_{12}'' + b_{21}y_{12}' + k_{21}y_{12} = b_{21}z_2' + k_{12}z_2, \quad (11)$$

$$m_3y_3'' + b_3(y_3' - a_1y_1' - b_1y_2') + k_3(y_3 - a_1y_1 - b_1y_2) = 0. \quad (12)$$

В операторной форме с применением преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях система уравнений движения примет следующий вид (где $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$) – комплексная переменная):

$$\begin{aligned} & (Ma^2 + Jc^2)\bar{y}_1p^2 + (Mab - Jc^2)\bar{y}_2p^2 + b_{12}(\bar{y}_1 - \bar{y}_{11})p + \\ & + b_3(a_1^2\bar{y}_1 + a_1b_1\bar{y}_2 - \bar{y}_3a_1)p + k_{12}(\bar{y}_1 - \bar{y}_{11}) + k_3(a_1^2\bar{y}_1 + a_1b_1\bar{y}_2 - \bar{y}_3a_1) = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & (Mab - Jc^2)\bar{y}_1p^2 + b_{22}(\bar{y}_2 - \bar{y}_{12})p + (Mb^2 + Jc^2)\bar{y}_2p^2 + \\ & + b_3(b_1^2\bar{y}_2 + a_1\bar{y}_1b_1 - \bar{y}_3b_1) + k_{22}(\bar{y}_2 - \bar{y}_{12}) + k_3(b_1^2\bar{y}_2 + a_1\bar{y}_1b_1 - \bar{y}_3b_1) = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$m_1\bar{y}_{11}p^2 + b_{11}\bar{y}_{11}p + k_{11}\bar{y}_{11} = (b_{11}p + k_{11})\bar{z}_1, \quad (15)$$

$$m_2\bar{y}_{12}p^2 + b_{21}\bar{y}_{12}p + k_{21}\bar{y}_{12} = (b_{21}p + k_{12})\bar{z}_2, \quad (16)$$

$$m_3\bar{y}_3p^2 + b_3(\bar{y}_3 - a_1\bar{y}_1 - b_1\bar{y}_2)p + k_3(\bar{y}_3 - a_1\bar{y}_1 - b_1\bar{y}_2) = 0. \quad (17)$$

Для дальнейших исследований исключим координаты движения y_{11} , y_{12} и с учетом трансформации упругодемпфирующих блоков

$$k_{np1} = \frac{(m_1p^2 + k_{11} + b_{11}p)(k_{12} + b_{12}p)}{(m_1p^2 + k_{11} + b_{11}p + k_{12} + b_{12}p)}, \quad (18)$$

$$k_{np2} = \frac{(m_2p^2 + k_{21} + b_{21}p)(k_{22} + b_{22}p)}{(m_2p^2 + k_{21} + b_{21}p + k_{22} + b_{22}p)}, \quad (19)$$

получим коэффициенты уравнений для системы с тремя степенями свободы, приведённые в таблице.

Таблица
Коэффициенты уравнений движения в координатах y_1, y_2, y_3
Источник: составлено авторами.

Table
Coefficients of the motion equations in y_1, y_2, y_3 coordinates
Source: compiled by the authors.

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$(Ma^2 + Jc^2)p^2 + (m_1p^2 + k_{11} + b_{11}p) \times \frac{(m_1p^2 + k_{11} + b_{11}p + (k_{12} + b_{12}p))}{+k_{12} + b_{12}p} + (k_3 + b_3p)a_1^2$	$(Mab - Jc^2)p^2 + (k_3 + b_3p)a_1b_1$	$-(k_3 + b_3p)a_1$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$(Mab - Jc^2)p^2 + (k_3 + b_3p)a_1b_1$	$(Mb^2 + Jc^2)p^2 + (m_2p^2 + k_{21} + b_{21}p) \times \frac{(m_2p^2 + k_{21} + b_{21}p + (k_{22} + b_{22}p))}{+k_{22} + b_{22}p} + (k_3 + b_3p)b_1^2$	$-(k_3 + b_3p)b_1$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$-(k_3 + b_3p)a_1$	$-(k_3 + b_3p)b_1$	$-(k_3 + b_3p)b_1$
$(b_{11}p + k_{11})\bar{z}_1$	$(b_{21}p + k_{12})\bar{z}_2$	-

Примечание: z_1, z_2 – кинематические возмущения в системе координат y_1, y_2, y_3 .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пользуясь понятиями теории автоматического регулирования [6, 7, 8], представим колебательную систему, эквивалентную автомобилю (см. рисунок 1) в виде структурной схемы системы автоматического управления (рисунок 2).

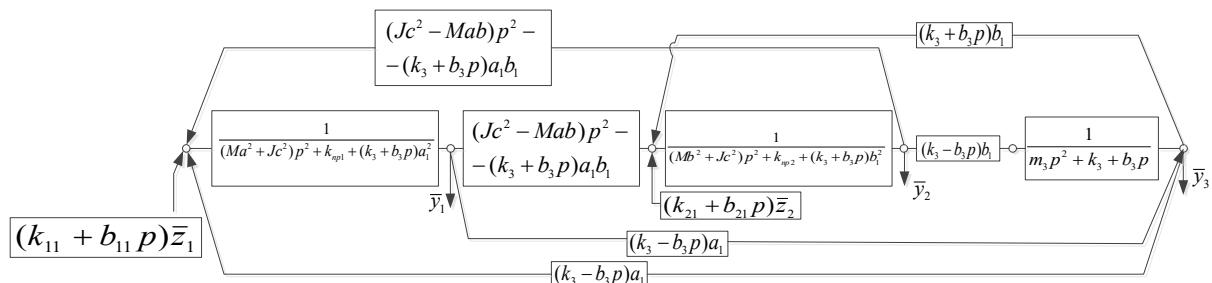


Рисунок 2 – Структурная схема исходной системы
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Structural scheme of the initial system
Source: compiled by the authors.

Все парциальные системы связаны между собой, возмущения приложены к двум входам, существует возможность использования принципа суперпозиции. Кинематические воздействия обозначим следующим образом:

$$\bar{Q}_{\text{экв}1} = (k_{11} + b_{11}p)\bar{z}_1, \bar{Q}_{\text{экв}2} = (k_{21} + b_{21}p)\bar{z}_2. \quad (20)$$

Соотношение между координатами движения можно представить следующим выражением:

$$\bar{Q}_{\text{экв}2} = \alpha \bar{Q}_{\text{экв}1}, \quad (21)$$

представляющим собой коэффициент связности.

Выражения для смещений по координатам y_1 , y_2 для построения передаточной функции межпарциальных связей примут вид:

$$y_1 = \frac{Q_{\text{экв}1}(a_{22}a_{33}-a_{23}a_{32})+\alpha \bar{Q}_{\text{экв}1}(a_{13}a_{32}-a_{12}a_{33})}{A_0}, \quad (22)$$

$$y_2 = \frac{Q_{\text{экв}1}(a_{23}a_{31}-a_{21}a_{33})+\alpha \bar{Q}_{\text{экв}1}(a_{11}a_{33}-a_{13}a_{31})}{A_0}, \quad (23)$$

где A_0 – характеристическое уравнение системы:

$$A_0 = a_{11}a_{22}a_{23} - a_{11}a_{23}^2 - a_{22}a_{13}^2 - a_{33}a_{12}^2 + 2a_{12}a_{23}a_{31}. \quad (24)$$

Передаточные функции по координатам y_1 , y_2 запишем в виде:

$$W_1(p) = \frac{y_1}{Q_{\text{экв}1}} = \frac{(a_{22}a_{33}-a_{23}a_{32})+\alpha(a_{13}a_{32}-a_{12}a_{33})}{A_0}, \quad (25)$$

$$W_2(p) = \frac{y_2}{Q_{\text{экв}1}} = \frac{(a_{23}a_{31}-a_{21}a_{33})+\alpha(a_{11}a_{33}-a_{13}a_{31})}{A_0}. \quad (26)$$

Передаточная функция межпарциальной связи, на основе которой может быть определено необходимое сочетание параметров, примет вид

$$W(p) = \frac{y_2}{y_1} = \frac{(a_{23}a_{31}-a_{21}a_{33})+\alpha(a_{11}a_{33}-a_{13}a_{31})}{(a_{22}a_{33}-a_{23}a_{32})+\alpha(a_{13}a_{32}-a_{12}a_{33})}. \quad (27)$$

При использовании виброзащитной системы пассивного типа при помощи полученной математической модели можно получить такой подбор параметров, при котором будет минимальна передача кинематического возмущения от дорожного покрытия на корпус автомобиля. Также снижается влияние вращательной степени свободы в том случае, если соотношение координат движения y_2/y_1 стремится к единичному значению.

Для построения амплитудно-частотной характеристики различных значений коэффициента связности примем следующие значения параметров, характерных для легкового транспортного средства: $M = 250$ кг, $J = 1000$ кг·м², $m_1 = 28$ кг, $m_2 = 28$ кг, $m_3 = 100$ кг, $k_{11} = 10000$ Н/м, $k_{12} = 70$ Н/м, $k_{21} = 10000$ Н/м, $k_{22} = 70$ Н/м, $k_3 = 10000$ Н/м, $b_{11} = 110000$ Нсек/м, $b_{12} = 100000$ Нсек/м, $b_{21} = 110000$ Нсек/м, $b_{22} = 100000$ Нсек/м, $b_3 = 100000$ Нсек/м, $I_0 = 0,3$ м, $I_1 = 2$ м, $I_2 = 2$ м, $\alpha = 0,1; 0,3; 0,6; 1$. Изменение частоты ω в пределах от 0 до 1000 Гц для оценки изменения соотношения в этом диапазоне частот, что условно может соответствовать движению с установленной скоростью по неровной дороге (рисунок 3).

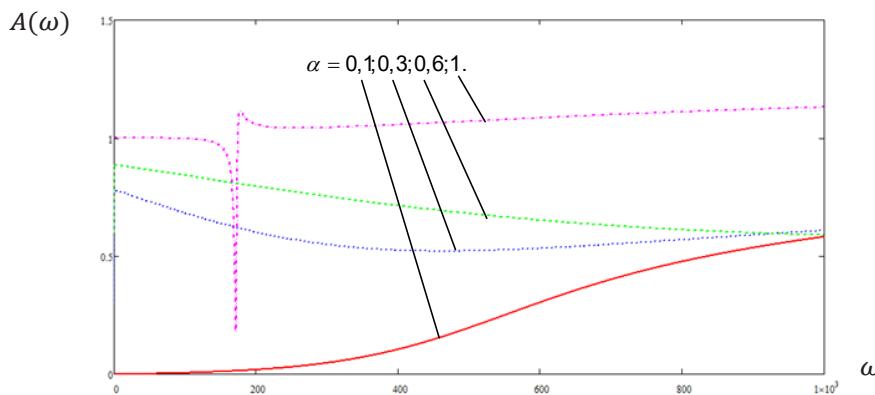


Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики передаточной функции соотношения y_2/y_1
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Amplitude-frequency characteristics of the y_2/y_1 ratio transfer function
Source: compiled by the authors.

Анализ полученных кривых показывает, что при увеличении α соотношение между координатами движения y_2/y_1 стремится к 1, а также при $\alpha = 1$ присутствует резонансная частота и частота динамического гашения колебаний.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён анализ современного состояния теоретических исследований в области построения математической модели транспортного средства. Выявлен ряд вопросов, недостаточно проработанных в этом направлении научных исследований. Предложено использование методов структурной теории виброзащитных систем для оценки динамического состояния подвижного состава, характерного для автомобильного транспорта. Представлены аналитические соотношения, позволяющие произвести подбор параметров, при которых можно исключить вращательную степень свободы движения транспортного средства в линейной постановке задачи.

Таким образом, теоретические положения структурной теории виброзащитных систем позволяют в первом приближении улучшить динамические характеристики подвески автомобиля как системы автоматического управления. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку возможностей активных и полуактивных виброзащитных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котиев Г.О., Дьяков А.С., Дубровский А.Ф. [и др.]. К анализу эффективности пневматической подвески автобуса на базе полноприводного автомобиля «Урал» // Грузовик. 2023. № 10. С. 3–8. [Https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-3-8](https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-3-8)
2. Евсеев К.Б., Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Стадухин А.А. К вопросу оценки управляемости гусеничных поездов на этапе проектирования с использованием комплекса натурно-математического моделирования // Труды НАМИ. 2022. № 1(288). С. 35–51. [Https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-1-35-51](https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-1-35-51)
3. Zheglov L., Fominykh A. Vehicle vibration safety estimation area // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, 01–02 октября 2019 года. Vol. 820. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012028. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012028](https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012028)
4. Lahtukhov M., Zheglov L. Automatization of calculation of dynamic characteristics of the car suspension system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, 01–02 октября 2019 года. Vol. 820. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012031.
5. 6. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
6. Deubel C., Ernst S., Prokop G., Objective evaluation methods of vehicle ride comfort—a literature review. J. Sound Vib. 2023. 548: 117515. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117515>
7. Zhang B., Wang H., Li Z. et al. Stiffness design and mechanical performance analysis of transverse leaf spring suspension. J Mech Sci Technol. 2023. 37:1339–1348. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0220-47>
8. Clarence W. de Silva. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
9. Harris C. M., Crede C.E. Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw – Hill Book Co, 2002. 1457 p.
10. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Series: Studies in Systems, Decision and Control, Springer International Publishing, Cham, 2020. Vol.252: 521 p.
11. Gorobtsov A.S., Kartsov S.K., Polyakov Y.A. Estimation of the vibration loading vehicle with pneumatic-hydraulic suspensions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, 27–29 октября 2016 года. Vol. 177. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2017. P. 012086. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012086](https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012086). EDN YVLWDD. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012086](https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012086)
12. Polyakov Y.A. The choice of rational stiffness joints parameters of the cabin suspension levers in the vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 12–14 декабря 2018 года. Vol. 560. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012151. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012151](https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012151). EDN TOWPUZ.
13. Zhang B., Su X. Dynamic modeling and elastic characteristic analysis of the transverse leaf spring suspension. J Mech Sci Technol. 2024. 38: 1051–1058. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0203-0>
14. Li P., Xu X., Liang C. et al. Modeling and Control of the Linear Motor Active Suspension with Quasi-zero Stiffness Air Spring System Using Polynomial Chaos Expansion. Chin. J. Mech. Eng. 2025. 38: 105. <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01273-z>
15. Li Q., Zhao W.H. Uncertainty analysis of motion accuracy on single-axis feed drive systems. Advances in Mechanical Engineering, 2024. 16(1): 1–15. <https://doi.org/10.1177/16878132231222790>
16. Xu X., Liu H., Jiang X., et al. Uncertainty analysis and optimization of quasi-zero stiffness air suspension based on polynomial chaos method. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2022. 35(1): 1–19. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00758-5>
17. Ma Z., Xu X., Xie J. et al. Negative Stiffness Control of Quasi-Zero Stiffness Air Suspension via Data-Driven Approach with Adaptive Fuzzy Neural Network Method. Int. J. Fuzzy Syst. 2022. 24: 3715–3730. <https://doi.org/10.1007/s40815-022-01357-1>

18. Jiang X.W., Xu X., Liang C., et al. Robust controller design of a semi-active quasi-zero stiffness air suspension based on PCE. *Journal of Vibration and Control.* 2024; 30(3-4): 906-925. <https://doi.org/10.1177/107754632311537>
19. Chen L., Xu X., Liang C., et al. Semi-active control of a new quasi-zero stiffness air suspension for commercial vehicles based on $h2H^\infty$ state feedback. *Journal of Vibration and Control.* 2022; 10775463211073193. <https://doi.org/10.1177/10775463211073193>
20. Kulkarni C.D., Sail P.P., Kalaskar A.V. et al. Real-time road testing and analysis of adjustable passive suspension system with variable spring stiffness. *JMST Adv.* 2024; 6: 233–246. <https://doi.org/10.1007/s42791-024-00082-0>
- REFERENCES**
1. Kotiev G.O., Dyakov A.S., Dubrovsky A.F. [et al.] To analyze the effectiveness of the pneumatic suspension of a bus based on the Ural four-wheel drive car. *Truck.* 2023; No. 10. pp. 3-8. [Https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-3-8](https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-3-8)
 2. Evseev K.B., Kositsyn B.B., Kotiev G.O., Stadukhin A.A. On the issue of caterpillar trains controllability evaluation at the design stage using a complex of natural-mathematical modeling. *Trudy NAMI.* 2022;(1): 35-51. (In Russ.) <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-1-35-51>
 3. Zheglov L., Fominykh A. Vehicle vibration safety estimation area. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, 01–02 октября 2019 года.* Vol. 820. Moscow: *Institute of Physics Publishing*, 2020; P. 012028. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012028](https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012028)
 4. Lahtyukhov M., Zheglov L. Automatization of calculation of dynamic characteristics of the car suspension system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, 01–02 октября 2019 года.* Vol. 820. Moscow: *Institute of Physics Publishing*, 2020; P. 012031. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012031](https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012031)
 5. Makhutov N.A. Safety and risks: system research and development. Novosibirsk: Nauka Publ., 2017; 724 p.
 6. Deubel C., Ernst S., Prokop G., Objective evaluation methods of vehicle ride comfort—a literature review. *J. Sound Vib.* 2023; 548: 117515. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117515>
 7. Zhang B., Wang H., Li Z. et al. Stiffness design and mechanical performance analysis of transverse leaf spring suspension. *J Mech Sci Technol.* 2023; 37:1339–1348. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0220-47>. Clarence W. de Silva. *Vibration. Fundamentals and Practice.* Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000; 957 p.
 8. Clarence W. de Silva. *Vibration. Fundamentals and Practice.* Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000; 957 p.
 9. Harris S.M., Crede C.E. *Shock and Vibration Handbook.* New York: McGraw. Hill Book Co, 2002; 1457 p.
 10. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Series: Studies in Systems, Decision and Control. 2020; Vol.252, Springer International Publishing, Cham. 521 p.
 11. Gorobtsov A.S., Kartsov S.K., Polyakov Y.A. Estimation of the vibration loading vehicle with pneumohydraulic suspensions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, 27–29 октября 2016 года.* Vol. 177. Tomsk: Institute of Physics Publishing. 2017; P. 012086. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012086](https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012086). EDN YVLWDD.
 12. Polyakov Y.A. The choice of rational stiffness joints parameters of the cabin suspension levers in the vehicle // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 12–14 December 2018.* Vol. 560. *Novosibirsk: Institute of Physics Publishing.* 2019; P. 012151. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012151](https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012151). – EDN TOWPUZ.
 13. Zhang B., Su X. Dynamic modeling and elastic characteristic analysis of the transverse leaf spring suspension. *J Mech Sci Technol.* 2024; 38: 1051–1058. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0203-0>
 14. Li P., Xu X., Liang C. et al. Modeling and Control of the Linear Motor Active Suspension with Quasi-zero Stiffness Air Spring System Using Polynomial Chaos Expansion. *Chin. J. Mech. Eng.* 2025. 38: 105. <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01273-z>
 15. Li Q., Zhao W.H. Uncertainty analysis of motion accuracy on single-axis feed drive systems. *Advances in Mechanical Engineering.* 2024; 16(1): 1-15. <https://doi.org/10.1177/16878132231222790>
 16. Xu X., Liu H., Jiang X., et al. Uncertainty analysis and optimization of quasi-zero stiffness air suspension based on polynomial chaos method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering.* 2022; 35(1): 1–19. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00758-5>
 17. Ma Z., Xu X., Xie J. et al. Negative Stiffness Control of Quasi-Zero Stiffness Air Suspension via Data-Driven Approach with Adaptive Fuzzy Neural Network Method. *Int. J. Fuzzy Syst.* 2022; 24: 3715–3730. <https://doi.org/10.1007/s40815-022-01357-1>
 18. Jiang X.W., Xu X., Liang C., et al. Robust controller design of a semi-active quasi-zero stiffness air suspension based on PCE. *Journal of Vibration and Control.* 2024; 30(3-4): 906-925. <https://doi.org/10.1177/107754632311537>
 19. Chen L., Xu X., Liang C., et al. Semi-active control of a new quasi-zero stiffness air suspension for commercial vehicles based on $h2H^\infty$ state feedback. *Journal of Vibration and Control.* 2022; 10775463211073193. <https://doi.org/10.1177/10775463211073193>
 20. Kulkarni C.D., Sail P.P., Kalaskar A.V. et al. Real-time road testing and analysis of adjustable passive suspension system with variable spring stiffness. *JMST Adv.* 2024; 6: 233–246. <https://doi.org/10.1007/s42791-024-00082-0>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Корнеев С.В. Вклад в общую работу заключается в постановке цели и задач исследования, анализе результатов математического моделирования, подготовке текста статьи.

Большаков Р.С. Вклад в общую работу заключается в проведении анализа литературных источников, разработке математической модели, анализе результатов математического моделирования, подготовке текста статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Korneev S.V. Setting the research goals and objectives, analyzing the results of mathematical modeling, and writing the manuscript.

Bolshakov R.S. Conducting literary review, developing a mathematical model, analyzing the results of mathematical modeling, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнеев Сергей Васильевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Химия и химическая технология» Омского государственного технического университета (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7243-1841>,

SPIN-код: 7617-5239,

AuthorID: 684645,

e-mail: svkorneev51@mail.ru

Большаков Роман Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>

SPIN-код: 2025-4049,

AuthorID: 628220,

e-mail: bolshakov_rs@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korneev Sergey V. – Professor, Department of Chemistry and Chemical Technology, Omsk State Technical University (Mira Av., 11, Omsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7243-1841>,

SPIN-code: 7617-5239,

AuthorID: 684645,

e-mail: svkorneev51@mail.ru

Bolshakov Roman S. – Associate Professor, Department of Control of Operational Work, Irkutsk State Transport University (Chernyshevsky St., 15, Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>,

SPIN-code: 2025-4049,

AuthorID: 628220,

e-mail: bolshakov_rs@mail.ru

Научная статья

УДК 621.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-882-894>

EDN: SJTQEL



Check for updates

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕНЗИНОВЫМ И ДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

В.Д. Габидулин , В.Н. Добромиров, И.О. Черняев

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

г. Санкт-Петербург, Россия

ответственный автор
toymail_2014@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Двигатель внутреннего сгорания является сложным агрегатом, работоспособность которого тесно связана с исправностью различных систем управления, в частности электронных. Отказы в электронных системах управления вызывают нарушение нормального режима работы двигателя, переводя его в режим ограниченной функциональности. Акустические шумы, издаваемые двигателем при различных режимах работы, могут быть параметром, с помощью которого возможно произвести диагностику двигателя и идентифицировать неисправность. В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по сравнительному анализу методов акустического диагностирования электронных систем управления бензиновым и дизельным двигателем внутреннего сгорания.

Материалы и методы. Совершенствование силовых установок современных транспортно-технологических машин (НТТМ) было и остается актуальной задачей. Одним из векторов реализации этой задачи является использование автоматизированных систем управления и контроля работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС), основанных на применении электронных и микропроцессорных технологий. Благодаря использованию таких систем значительно повышается эффективность работы ДВС. Однако сложность устройства и конструктивные особенности этих систем увеличивают возможность возникновения потенциальных неисправностей двигателя, связанных с их отказами. Вследствие этого существует необходимость разработки и реализации различных методов их диагностирования. Предлагаемая оценка функциональности таких электронных систем по издаваемым двигателем акустическим сигналам является одним из способов оперативного технического контроля. Регистрация шумовых характеристик осуществляется портативным звукозаписывающим устройством, в дальнейшем обрабатывается и анализируется с использованием специализированного программного обеспечения. Простота и оперативность применения метода являются преимуществом в сравнении с другими традиционными методами диагностирования, в особенности при работе в полевых условиях, непосредственно в местах применения машин. Авторами статьи ранее производилась экспериментальная оценка возможности применения метода акустического диагностирования функциональности электронных систем бензинового двигателя. В данной статье представлены результаты исследования по применению подобного метода на дизельном двигателе, и произведена сравнительная оценка полученных результатов. Объектом исследования является дизельный двигатель, входящий в состав обучающего стенда фирмы GNFA. Стенд предназначен для изучения электронных систем управления работой дизеля. Возможности стенда позволяют задавать различные неисправности электронных систем путем размыкания электрической цепи в блоке предохранителей, вызывая тем самым полный отказ двигателя или переход его работы в режим ограниченного функционирования. Авторами статьи замерялись и анализировались акустические параметры двигателя при различных режимах ограниченного функционирования и сравнивались с шумовыми параметрами ДВС в нормальном режиме работы.

Результаты. В работе произведен анализ различного рода неисправностей электронных систем управления дизельного ДВС. Выделены три состояния работы двигателя: двигатель работает в нормальном режиме функционирования; двигатель не работоспособен (не запускается); двигатель работает в режиме ограниченной функциональности.

© Габидулин В.Д., Добромиров В.Н., Черняев И.О., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Представлен анализ и сравнение акустических параметров работы дизельного двигателя в условиях этих состояний, с последующим обоснованием правил идентификации неисправностей электронных систем путем спектрального разложения шумового фона. Произведена сравнительная оценка по результатам исследований на бензиновом и дизельном двигателях.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования могут стать научной основой метода оперативного технического контроля состояния ДВС НТМ путем акустической оценки качества работы электронных систем управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двигатель внутреннего сгорания, электронные системы управления и контроля, акустическое диагностирование, спектральный анализ

Статья поступила в редакцию 28.09.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Габидулин В.Д., Добромиров В.Н., Черняев И.О. Сравнительная оценка диагностирования электронных систем управления бензиновым и дизельным двигателем по акустическим параметрам // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 882-894. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-882-894>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-882-894>

EDN: SJTQEL

COMPARATIVE EVALUATION OF DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS OF GASOLINE AND DIESEL ENGINES BY ACOUSTIC PARAMETERS

Vladimir D. Gabidulin ✉, Viktor N. Dobromirov, Igor O. Chernyaev

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
moymail_2014@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. An internal combustion engine is a complex unit, the performance of which is closely related to the functionality of various control systems, in particular electronic ones. Failures in electronic control systems cause disruption of the normal engine operation, rendering it into a limited function mode. Acoustic noises emitted by the engine during various operating conditions can be used as a parameter for engine diagnostics and malfunction identification. The article presents the results of theoretical and experimental studies comparing acoustic diagnostic methods for electronic control systems of gasoline and diesel internal combustion engines.

Materials and methods. Improving the powertrains of modern transport and technological vehicles has been and remains an urgent task. One of the vectors to achieve this goal is the use of automated control and monitoring systems for internal combustion engine operation based on the application of electronic and microprocessor technologies. Thanks to the use of such systems, the efficiency of the internal combustion engine is increased significantly. However, the complexity and design features of these systems increase the possibility of potential engine malfunctions connected with their failures. As a result, there is a need to develop and implement various diagnostic methods. The proposed assessment of the functionality of such electronic systems based on acoustic signals emitted by the engine is one of the ways of operational technical control. The recording of noise characteristics is carried out by a portable sound recorder, which is further processed and analyzed with the use of specialized software. The simplicity and application speed of the method are the advantage in comparison with other traditional diagnostic methods, especially in the field conditions, directly in the places where vehicles are used. The authors of the article previously conducted the experimental assessment of the application possibility of acoustic diagnostics to the functionality of gasoline engine electronic systems. This article presents the results of the same method use on diesel

© Vladimir D. Gabidulin, Viktor N. Dobromirov, Igor O. Chernyaev, 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

engine and provides a comparative evaluation of the results. The object of the study is a diesel engine, which is part of the GNFA training stand. The stand is designed to study electronic control systems for diesel engines. The capabilities of the stand make it possible to set various malfunctions of electronic systems by opening the electrical circuit in the fuse box, thereby causing a complete engine failure or switching its operation to a limited mode. The authors of the article measured and analyzed the acoustic parameters of the engine in various modes of limited operation and compared them with the noise parameters of the internal combustion engine in normal operation.

Results. Various kinds of malfunctions of electronic control systems of the diesel internal combustion engine have been analyzed. Three engine operating states have been identified: normal operation mode of the engine; inoperative (engine does not start); limited operation mode of the engine.

The analysis and comparison of acoustic parameters of the diesel engine operation under these conditions were carried out, with the subsequent substantiation of the rules for identifying electronic system malfunctions by spectral decomposition of the noise background. A comparative assessment was made based on the results of studies on gasoline and diesel engines.

Discussion and conclusion. The results of the study can become the scientific basis for the method of fast technical monitoring of the internal combustion engine operational condition of modern transport and technological vehicles by acoustic assessment of the performance of electronic control systems.

KEYWORDS: internal combustion engine, electronic control and monitoring systems, acoustic diagnostics, spectral analysis

The article was submitted: September 28, 2025; **approved after reviewing:** December 1, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Gabidulin V.D., Dobromirov V.N., Chernyaev I.O. Comparative evaluation of diagnostics of electronic control systems of gasoline and diesel engines by acoustic parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 882-894. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-882-894>

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития дорожной отрасли в России предполагают массовое строительство в сложных климатических условиях и ужесточение стандартов содержания дорог, создавая потребность в применении современных наземных транспортно-технологических машин. В современных условиях наиболее востребованы НТМ с быстро развивающимися автоматизированными системами управления и контроля технического состояния агрегатов, основанные на использовании электронных и микропроцессорных систем. Это диктует необходимость в техническом контроле и поддержании их работоспособности. В особенности это относится к диагностированию электронных систем управления двигателями внутреннего сгорания (ДВС), что подтверждается активными исследованиями как отечественных специалистов [1, 2], так и зарубежных [3]. Принимая во внимание удаленность пунктов дислокации баз технического обслуживания машин при работе в труднодоступных регионах [4], а также сложные условия эксплуатации НТМ [5], приоритет среди различных методов диагностирования ДВС отдается методам неразрушимого контроля [6]expertise is a key element of this assessment. Industrial safety review is conducted to assess the state of the object, confirmation of

compliance with the requirements established by the legislation in the sphere of industrial safety, determine the level of risk of accidents and threats to life and health of people. Today no examination passes without NDT methods. Non-destructive testing is an assessment of reliability, working capacity and parameters of the object or some of its elements, not requiring the removal of the object from the work or dismantling. It is an essential element of the system of industrial safety expertise, providing technical safety at hazardous production facilities. The main purpose of nondestructive testing is reliable detection of defects by analyzing the interaction of the test object with fields of different nature (magnetic, electric, acoustic, etc.).

Методы, реализуемые на сегодняшний день (например, метод сканирования), основаны на контроле и анализе показаний встроенных датчиков. Однако стоит понимать, что внешние негативные воздействия (влага, пыль, экстремальные температуры и т.п.) способны значительно исказить достоверность показаний датчиков ввиду их уязвимости к действию факторов окружающей среды. Стоит отметить, что показания датчиков обрабатываются электронным блоком управления (ЭБУ), встроенным в транспортное средство. Неисправность самого ЭБУ также искачет достоверность информации о состоянии

транспортного средства. Данные факты говорят о недостаточном несовершенстве современных методов диагностирования ДВС [7].

Решение проблемы видится в исследованиях по развитию метода акустического диагностирования. Преимущество метода заключается в том, что он, относясь к методам неразрушимого контроля [8, 9], не требует опираться на показания датчиков. На сегодняшний день в автомобильной отрасли активно ведется изучение таких вопросов, как акустическая оценка состояния систем впрыска топлива [10], процесса его сгорания [11], а также интенсивности механических износов. В других отраслях также успешно ведется практическое внедрение акустического контроля, например, в сфере железнодорожного транспорта при диагностировании силовых трансформаторов железных дорог [12, 13], или же в сфере авиационной отрасли как отечественными [14, 15], так и зарубежными [16, 17] специалистами. Наличие подобных научных исследований говорит о повышенном интересе к изучению возможности внедрения акустического диагностирования технических систем и актуальности данного вопроса.

В современной научно-технической литературе результаты акустических исследований ДВС в основном касаются оценки механических систем, таких как износ трибоспряженций цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма, а также сопряженных элементов систем впрыска топлива. Не выявлено исследований по внедрению метода для оценки отказов электронных систем управления двигателем. Авторами статьи были проведены натурные эксперименты по акустическому диагностированию электронных систем управления бензинового ДВС [18, 19]. В данной статье изложены результаты подобного исследования на дизельном ДВС и проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами, выявленными на бензиновом ДВС.

Цель исследования: оценить и сопоставить полученные результаты по применению метода акустического диагностирования дизельного и бензиновых двигателей.

Задачи эксперимента:

- определить возможные неисправности электронных систем управления работой дизеля и оценить их влияние на акустический шум двигателя;

- установить зависимость частотно-шумовых характеристик дизеля от вида неисправностей электронной системы на основе спектрального разложения;

- сравнить полученные результаты с исследованием на бензиновом двигателе.

Важность проведенного исследования

Важность исследования состоит в полезном опыте практического внедрения метода акустического диагностирования для оценки технического состояния электронных систем управления работой ДВС в современные реалии технической эксплуатации НТМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является дизельный двигатель, входящий в состав обучающего стенда фирмы GNFA (рисунок 1).



Рисунок 1 – Стендовый дизельный двигатель
Источник: интернет-ресурс¹.

Figure 1 – Stand diesel engine
Source: internet resource «Maquette pedagogique: Moteur Injection Diesel»¹.

¹ «Maquette pedagogique: Moteur Injection Diesel». (дата обращения 07.05.2025). <http://y.odoul.free.fr/MT-MOTEUR-D>

Путем разрыва электрической цепи в блоке предохранителей (рисунок 2) воссоздаются различные неисправности электронных систем управления работой двигателя.

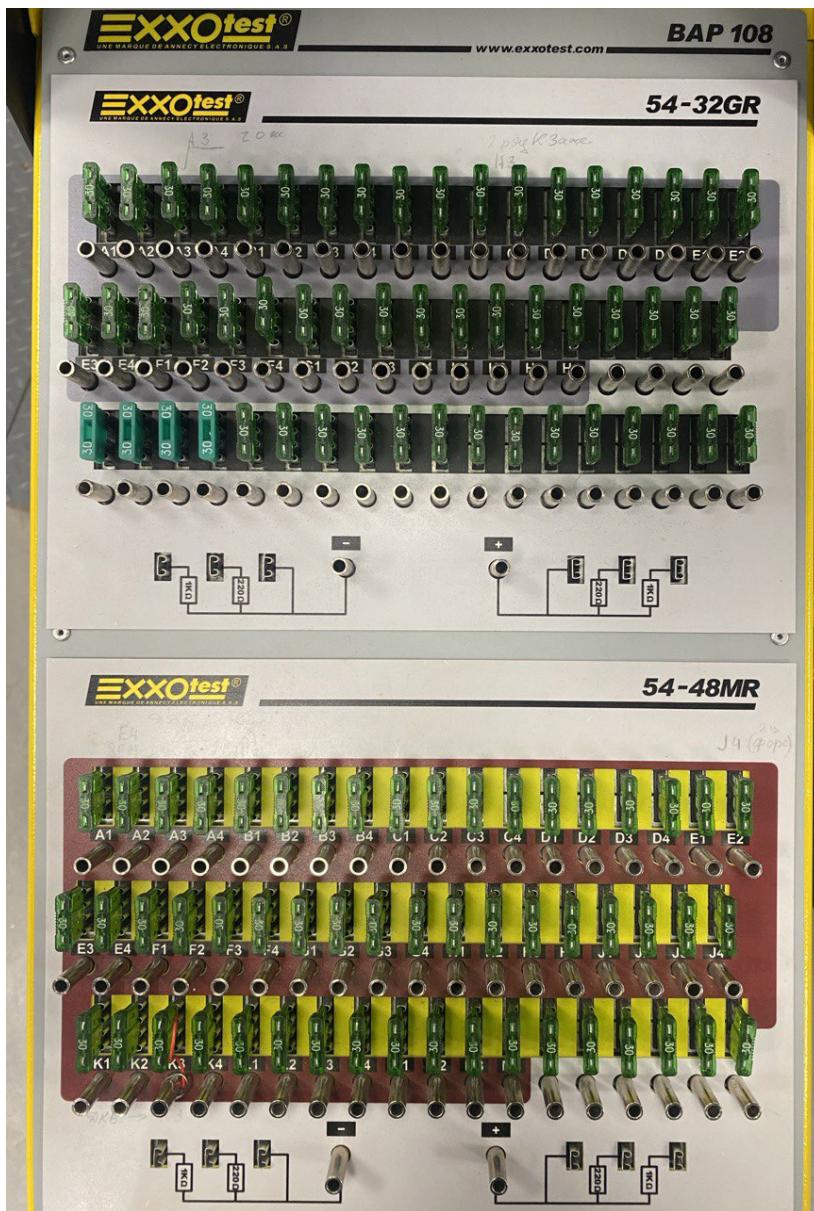


Рисунок 2 – Блок предохранителей
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Fuse box
Source: compiled by the authors.

Электрическая схема системы управления работой дизельного двигателя представлена на рисунке 3.

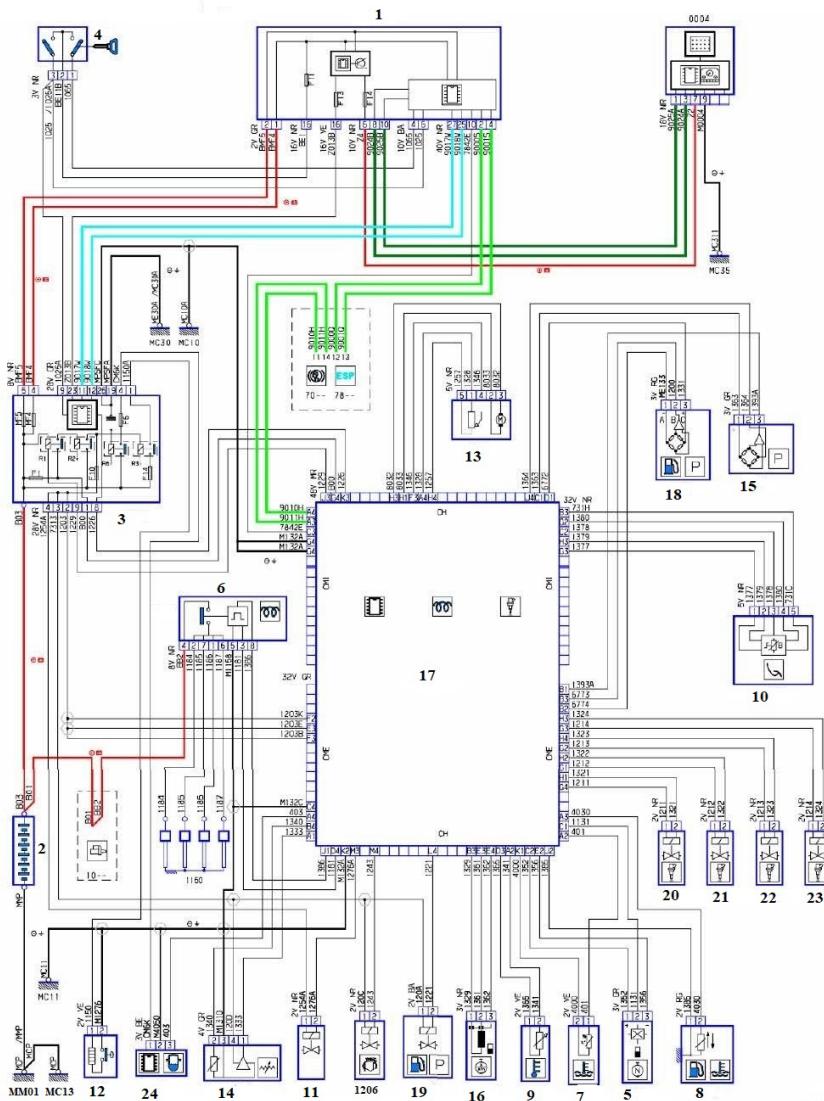


Рисунок 3 – Электрическая схема управления работой дизельного двигателя:
 1 – электронный блок управления; 2 – аккумуляторная батарея; 3 – блок предохранителей;
 4 – противоугонный выключатель; 5 – датчик соответствия цилиндра; 6 – блок предварительного подогрева;
 7 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 8 – терморезистор температуры топлива;
 9 – датчик температуры поступающего воздуха; 10 – датчик положения педали акселератора;
 11 – электроклапан EGR+дроссельная заслонка; 12 – подогреватель топлива;
 13 – электрический электроклапан EGR; 14 – датчик подачи воздуха;
 15 – датчик давления впускного воздуха; 16 – датчик оборотов двигателя; 17 – компьютер двигателя;
 18 – датчик высокого давления топлива; 19 – регулятор высокого давления топлива; 20 – инжектор цилиндра № 1;
 21 – инжектор цилиндра № 2; 22 – инжектор цилиндра № 3; 23 – инжектор цилиндра № 4;
 24 – датчик присутствия жидкости

Источник: интернет-ресурс².

Figure 3 – Electrical control scheme for diesel engine operation:
 1 – electronic control unit; 2 – rechargeable battery; 3 – fuse box; 4 – anti-theft switch; 5 – cylinder matching sensor;
 6 – preheating unit; 7 – coolant temperature sensor; 8 – fuel temperature thermistor; 9 – incoming air temperature sensor;
 10 – accelerator pedal position sensor; 11 – EGR solenoid valve + throttle valve; 12 – fuel heater;
 13 – EGR solenoid valve; 14 – air supply sensor; 15 – intake air pressure sensor; 16 – engine speed sensor; 17 – engine computer;
 18 – fuel high pressure sensor; 19 – fuel high pressure regulator; 20 – cylinder injector №1; 21 – cylinder injector №2;
 22 – cylinder injector №3; 23 – cylinder injector №4; 24 – fluid presence sensor.

Source: Internet resource «Maquette pedagogique: Moteur Injection Diesel»².

² «Maquette pedagogique: Moteur Injection Diesel». (дата обращения 07.05.2025). <http://y.odoul.free.fr/MT-MOTEUR-D>

Алгоритм испытаний

1. Производится пуск двигателя без заданных неисправностей. Состояние работы двигателя – стабильное. Количество оборотов на холостом ходу – 700–900 об/мин. На звукозаписывающее устройство зафиксируются шумовые параметры. Интервал времени записи – 5 сек. После записи двигатель выключается.

2. Поочередно задаются неисправности в блоке предохранителей. В журнал фиксируется состояние работы двигателя:

- двигатель работает в нормальном режиме функционирования;

– двигатель работает в ограниченном режиме функционирования;

- двигатель не запускается.

Если двигатель работает в режиме ограниченного функционирования – производится запись на звукозаписывающее устройство, по аналогии с первым пуском двигателя (п.1).

3. Результаты испытаний заносятся в таблицу с перечнем задаваемых неисправностей электронных систем управления двигателем, и фиксируется их влияние на его работу (таблица).

Результаты испытаний представлены в таблице.

Перечень неисправностей электронных систем управления двигателем и их влияние на его работу
Источник: составлено авторами.

Table
A list of malfunctions of electronic engine control systems, and their impact on engine operation
Source: compiled by the authors.

Вид неисправности	Режим функционирования двигателя	Двигатель функционирует исправно	Двигатель функционирует с нарушенным режимом работы	Двигатель не функционирует
Отключение расходомера и датчика температуры воздуха	✓			
Отключение датчика подачи воздуха	✓			
Отключение электроклапана EGR	✓			
Отключение датчика оборотов двигателя				✓
Отключение датчика соответствия цилиндров				✓
Отключение датчика температуры впускного воздуха	✓			
Отключение датчика высокого давления топлива				✓
Отключение регулятора подачи топлива				✓
Отключение терморезистора температуры топлива	✓			
Отключение датчика присутствия жидкости в топливе	✓			
Отключение электроклапана EGR+ дроссельной заслонки				✓
Отключение датчика давления впускного воздуха	✓			
Отключение датчика положения педали акселератора			✓	
Отключение одного инжектора цилиндра			✓	
Отключение двух инжекторов цилиндра			✓	
Отключение трех инжекторов цилиндра			✓	
Отключение электронного блока управления			✓	
Отключение аккумуляторной батареи			✓	

Из представленной в таблице информации можно сделать следующие выводы:

1. Двигатель не функционирует при введении глобальных неисправностей, таких как отключение аккумуляторной батареи, или ЭБУ. При отключении более одного инжектора цилиндра двигатель моментально глохнет из-за недостаточных мощностных возможностей по преодолению механических и компрессорных сопротивлений в отключенных цилиндрах. Также двигатель не запускается при отключении электроклапана EGR+ дроссельной заслонки, регулятора подачи топлива, датчика высокого давления топлива, датчика соответствия цилиндров и датчика оборотов двигателя.

2. Двигатель работает в нормальном режиме при отключении датчиков расходомера и датчика температуры воздуха, датчика подачи воздуха, электроклапана EGR, датчика температуры впускного воздуха, терморезистора температуры топлива, датчика присутствия жидкости в топливе и датчика давления впускного воздуха.

3. Двигатель работает в режиме ограниченного функционирования при отключении датчика положения педали акселератора и отключении инжектора одного цилиндра. Именно при этих двух неисправностях шумовые параметры работы двигателя будут подвергнуты спектральному разложению.

Обработка и анализ результатов

После оцифровки сигнала производилось спектральное разложение полученных данных. Математически спектральное разложение имеет вид [20, 21]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)},$$

где $X(k)$ – спектр сигнала;

$x(n)$ – амплитуда сигнала звука (в дискретном виде) в момент времени n ;

N – количество отсчетов;

j – мнимая единица;

k – номер частотной составляющей (бин).

Измерения производились при 700–900 об/мин, что соответствует диапазону частот от 12 до 15 Гц. Принимая во внимание смещение фаз работы циклов цилиндров двигателя, диапазон частот умножался на 4 (число цилиндров двигателя). Таким образом, рассматриваемый диапазон частот составляет от 48 до 60 Гц.

При помощи программного комплекса Sonic Visualiser визуализированы спектрограммы аудиосигналов. Программа использует метод нормализации, при котором самый громкий пиковый уровень в аудиофайле принимается равным 0 дБ, а остальные уровни шума изменяются относительно данного пика. Чем тише звук, тем будет больше по модулю значение уровня шума со знаком «минус».

На рисунке 4 представлена спектрограмма акустического шума исправно работающего дизельного двигателя.

Рассматриваемый диапазон частот от 48 до 59 Гц. Средний уровень шума составляет -36 дБ...-38 дБ. Спектр имеет плавный непрерывный характер.

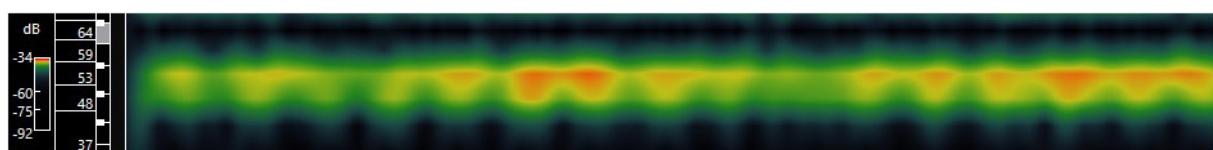


Рисунок 4 – Спектрограмма дизельного двигателя с исправным режимом работы
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Spectrogram of the diesel engine with a normal operation mode
Source: compiled by the authors.

На рисунке 5 продемонстрирована спектrogramма акустического шума дизельного двигателя с отключенным инжектором впрыска топлива в одном цилиндре.

Рассматриваемый диапазон частот от 48 до 59 Гц. Уровень шума на участках неравномерный. Имеются отчетливые значения, равные -32 дБ, но также наблюдаются шумовые «провалы», продолжительностью 100 мс, чередующиеся каждые 100 мс. Уровень шума на данных участках составляет -48 дБ...-52 дБ. Данный фактор объясним сильными колебаниями двигателя, а также смещением работы циклов цилиндро-поршневой группы, что создает разницу уровня шума в сравнении с исправным режимом работы в 4 дБ...6 дБ.

На рисунке 6 представлена спектrogramма

акустического шума двигателя с отключенным датчиком положения педали акселератора.

Ситуация аналогична при отключенном инжекторе впрыска топлива. Однако шумовые «провалы» (равные -48 дБ...-52 дБ), чередующиеся каждые 100 мс, в этом случае имеют длительность 50 мс. Основной уровень шума составляет -32 дБ...-30 дБ.

Сравнение полученных результатов со спектrogramмами бензинового двигателя, ранее полученными авторами, показывает, что у исправного бензинового двигателя спектrogramма имеет более плавный непрерывный характер (рисунок 7), в то время как с одним отключенным инжектором впрыска топлива также наблюдаются шумовые провалы (рисунок 8).

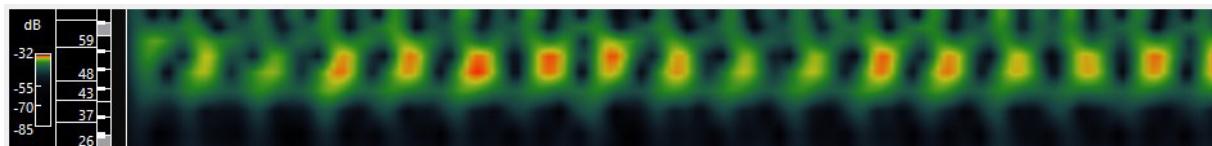


Рисунок 5 – Спектrogramма дизельного двигателя с отключенным инжектором впрыска топлива
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Spectrogram of the diesel engine with a disabled fuel injector
Source: compiled by the authors.

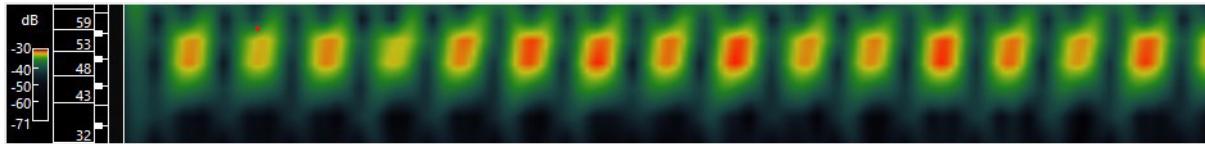


Рисунок 6 – Спектrogramма дизельного двигателя с отключенным датчиком положения педали акселератора
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – A spectrogram of a diesel engine with a disabled sensor of accelerator pedal position
Source: compiled by the authors.

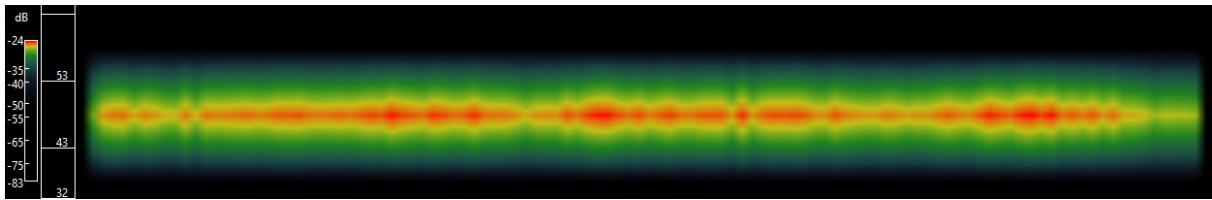
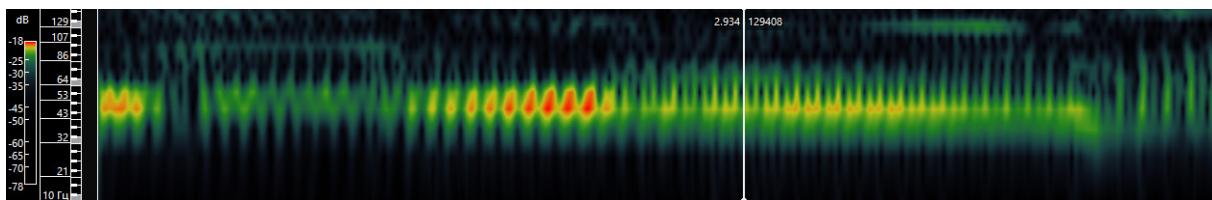


Рисунок 7 – Спектrogramма исправно работающего бензинового двигателя
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Spectrogram of the gasoline engine with a normal operation mode
Source: compiled by the authors.



*Рисунок 8 – Спектограмма бензинового двигателя с отключенным инжектором впрыска топлива
Источник: составлено авторами.*

*Figure 8 – Spectrogram of the gasoline engine with a disabled fuel injector
Source: compiled by the authors.*

Таким образом, при анализе полученных результатов выявлено:

- у исправно работающего дизельного двигателя средний уровень шума составляет 36 дБ...38 дБ на рассматриваемом диапазоне частот от 48 до 59 Гц;
- ключевым выделяющим фактором двигателя, работающего в режиме ограниченной функциональности в отличие от исправного, является наличие шумовых «провалов», при этом при отключенном инжекторе впрыска топлива их длительность составляет 100 мс, а при выключенном датчике положения педали акселератора – 50 мс;
- другим отличительным признаком является уровень шума, который у исправного двигателя тише на 4 дБ...6 дБ;
- при сравнении спектрограмм дизельного и бензинового двигателя наблюдается одинаковая логика идентификации неисправности, а именно наличие шумовых «провалов».

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований дизельного ДВС были определены неисправности его электронных систем управления, влияющие на работу. К таким неисправностям относятся отказ датчика положения педали акселератора и неисправность одного инжектора впрыска топлива. Были записаны акустические параметры двигателя при работе в режиме ограниченной функциональности из-за введения вышеперечисленных неисправностей. По результатам были сформированы спектральные графики, идентифицирующие ту или иную неисправность. Полученные графики имеют уникальный характер для каждого вида неисправности, в результате чего возможно идентифицировать тот или иной отказ в

электронной системе управления работой дизельного ДВС. Выполнен сравнительный анализ с подобным исследованием, проведенным на бензиновым двигателе. Признаки идентификации неисправностей идентичны, что свидетельствует об устойчивой зависимости издаваемых двигателем акустических сигналов от состояния электронных систем управления его работой. В дальнейшем планируется проведение исследований на натурных образцах НТММ, тем самым последовательно приближаясь к более реальным условиям их применения.

Практическая ценность заключается в возможности применения метода в полевых условиях, что обеспечит исключение недостатков традиционных методов диагностирования, сильно подверженных влиянию внешних факторов в экстремальных природно-климатических условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Храпов Ю.Н., Успенский И.А., Кокорев Г.Д. [и др.]. Диагностика современного автомобиля // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118: 1001–1025.
2. Гончаров А.А., Гончаров Н.С. Совершенствование методики диагностирования датчика кислорода автомобильных двигателей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10 (171): 236–240.
3. Deptuła A., Osiński P., Radziwanowska U. Decision Support System for Identifying Technical Condition of Combustion Engine // Archives of Acoustics. 2016. Vol. 41(3): 449-460.
4. Острецов Д.А. Проблемы грузоперевозок в России и пути их решения // Наука Без Границ. 2016. № 1 (1): 27–30.
5. Пушкирев А.Е., Терентьев А.В. Решение вопросов технического обеспечения доступно-

сти арктических регионов. Текст : электронный. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 12–18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50202238> (дата обращения: 31.08.2025).

6. Федосов А.В., Гайнуллина Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11(2): 73–78.

7. Сургутсов К.Н., Трегубова (Титла) И.М. Проблемы компьютерной диагностики современных автомобильных двигателей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52): 25.

8. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. Неразрушающий контроль в промышленности. Акустический контроль // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 4: 35–51.

9. Рыбочкин А.Ф., Савельев С.В., Смирнов А.В. Диагностирование состояния работающего автомобильного двигателя на основе анализа издаваемого им акустического шума // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2014. № 16 (156): 61–77.

10. Albarbar A., Gu F., Ball A.D. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis // Measurement. 2010. Vol. 43(10): 1376–1386.

11. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J. [et al.] Analysis of combustion acoustic phenomena in compression-ignition engines using large eddy simulation // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32(8): 085101.

12. Волчанина М.А. Статистические исследования сигналов акустического контроля при диагностировании силовых трансформаторов // Известия Транссиба. 2022. 3 (51): 80–89.

13. Черемисин В.Т., Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2020. 6(4): 161–171.

14. Виноградов В.Ю., Сайфуллин А.А. Контроль технического состояния авиационных гтд по акустическим параметрам, измеренным на срезе сопла двигателя // Контроль. Диагностика. 2013. № 3: 53–57.

15. Никитина Н.Е., Мотова (Шабанова) Е.А., Тарасенко Ю.П. Неразрушающий контроль рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2012. № 3.1 (34): 291–295.

16. Umair A., Fakhre A., Jennions I. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit // ISA Transactions. 2023. Vol. 137: 670–691.

17. Waligórska M., Batura K., Kucal K., Merkisz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement // Measurement. 2019. T 154: 107460.

18. Габидулин В.Д. Акустическое диагностирование двигателя внутреннего сгорания // Вестник СибАДИ. 2024. Т.21, № 4 (98): 502–511.

19. Габидулин В.Д., Добромиров В.Н. Выявление неисправностей электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания по акустическим параметрам // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22(3) 332–345.

20. Терехов А.В., Гужаковская К.П. Анализ спектра звукового сигнала // NBI-technologies. 2020. Т. 14(1): 23–28.

21. Данилов Д.Е. Анализ спектров // Наука, техника и образование. 2018. № 11 (52): 57–59.

REFERENCES

1. Khrapov Yu.N., Uspensky I.A., Kokorev G.D., & [i dr.] Diagnostika sovremennoego avtomobilya [Diagnostics of a modern car]. Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2016; 118: 1001–1025. (in Russ.)
2. Goncharov A.A., Goncharov N.S. Sovrshennostvovanie metodiki diagnostirovaniya datchika kisloroda avtomobil'nykh dvigatelei [Improving the method for diagnosing the oxygen sensor of automotive engines]. Vestnik of the Orenburg State University. 2014; 171 (10): 236–240. (in Russ.)
3. Deptuła A., Osiński P., Radziwanowska U.. Decision support system for identifying technical condition of combustion engine. Archives of Acoustics. 2016; 41 (3): 449–460. <https://doi.org/10.1515/aoa-2016-0043>
4. Ostretsov D.A. Problemy gruzoperevozok v Rossii i puti ikh resheniya [Problems of cargo transportation in Russia and ways to solve them]. Nauka Bez Granits. 2016; 1(1): 27–30. (in Russ.)
5. Pushkarev A.E., Terentiev A.V. Reshenie voprosov tekhnicheskogo obespecheniya dostupnosti arkticheskikh regionov [Solving issues of technical support for the accessibility of Arctic regions]. In Sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii .2022; (pp. 12–18). Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. (in Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=50202238>
6. Fedosov A.V., Gainullina L.A.. Metody nerazrushayushchego kontrolya [Methods of non-destructive testing]. Electrotechnical and Information Complexes and Systems. 2015; 11(2): 73–78.
7. Surgutskov K.N., Tigula (Tregubova) I.M.. Problemy komp'yuternoi diagnostiki sovremennykh avtomobil'nykh dvigatelei [Problems of computer diagnostics of modern automobile engines]. Inzhenernyi Vestnik Dona. 2019; 52 (1): 25. (in Russ.)
8. Gorbash V.G., Delendik M.N., Pavlenko P.N. Nerazrushayushchii kontrol' v promyshlennosti. Akusticheskii kontrol' [Non-destructive testing in industry. Acoustic testing]. Non-Destructive Testing and Diagnostics. 2011; 4: 35–51. (in Russ.)
9. Rybochkin A.F., Savelyev S.V., Smirnov A.V. Diagnostirovaniye sostoyaniya rabotayushchego avtomobil'nogo dvigatelya na osnove analiza izdavaemogo im akusticheskogo shuma [Diagnosis of the state of a running automotive engine based on the analysis of its acoustic noise]. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2014; 156 (16): 61–77. (in Russ.)

10. Albarbar A., Gu F., Ball A.D. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. *Measurement*. 2010; 43(10): 1376–1386. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.08.005>
11. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J. & [et al.]. Analysis of combustion acoustic phenomena in compression–ignition engines using large eddy simulation. *Physics of Fluids*. 2020; 32(8): 085101. <https://doi.org/10.1063/5.0013662>
12. Volchanina M.A. Statisticheskie issledovaniya signalov akusticheskogo kontrolya pri diagnostirovaniyu silovykh transformatorov [Statistical studies of acoustic control signals in the diagnosis of power transformers]. *Izvestiya Transsiba*. 2022; 51 (3): 80–89. (in Russ.)
13. Cheremisin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Izmerenie parametrov akusticheskikh signalov imitatora defektov silovykh transformatorov [Measurement of parameters of acoustic signals of a power transformer defect simulator]. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2020; 6(4): 161–171. (in Russ.)
14. Vinogradov V.Yu., Sayfullin A.A.. Control' tekhnicheskogo sostoyaniya aviationsionnykh GTD po akusticheskim parametram, izmerennym na sreze sopla dvigatelya [Monitoring the technical condition of aircraft GTE by acoustic parameters measured at the engine nozzle cut]. *Testing. Diagnostics*. 2013; 3: 53–57. (in Russ.)
15. Nikitina N.E., Motova (Shabanova) E.A., Tarasenko Yu.P. Nerazrushayushchiy kontrol' rabochikh kompressornykh lopatok aviatsionnogo dvigatelya [Non-destructive testing of operating compressor blades of an aircraft engine]. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. 34(3-1): 291–295. (in Russ.)
16. Umair A., Fakhre A., Jennions I. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit. *ISA Transactions*. 2023; 137: 670–691. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.12.031>
17. Waligórski M., Batura K., Kucal K., Merkisz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement. *Measurement*. 2019; 154: 107460. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107460>
18. Gabidulin V.D. Akusticheskoe diagnostirovaniye dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Acoustic diagnostics of an internal combustion engine]. *Vestnik of SibADI*. 2024; 21(4): 502–511. (in Russ.)
19. Gabidulin V.D., Dobromirov V.N. Vyavlenie neispravnostei elektronnykh sistem upravleniya dvigatelyem vnutrennego sgoraniya po akusticheskim parametram [Identifying malfunctions of internal combustion engine electronic control systems by acoustic parameters]. *Vestnik of SibADI*. 2025; 22(3): 332–345. (in Russ.)
20. Terekhov A.V., Guzhakovskaya K.P. Analiz spektra zvukovogo signala [Analysis of the sound signal spectrum]. *NBI-Technologies*. 2020; 14(1): 23–28. (in Russ.)
21. Danilov D.E. Analiz spektrov [Spectrum analysis]. Nauka, Tekhnika i Obrazovanie. 2018; 52(11): 57–59. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Габидулин В.Д. Анализ состояния вопроса, планирование и проведение экспериментальных исследований, снятие спектрограмм и спектральный анализ акустических параметров двигателя, оформление статьи.

Добромиров В.Н. Разработка замысла научного исследования, участие в экспериментальных исследованиях, анализ полученных результатов, формулировка выводов, общее редактирование статьи.

Черняев И.О. Предоставление аппаратуры для проведения исследования, анализ полученных результатов, формулировка выводов, общее редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Gabidulin V.D. Analysis of the problem status, planning and conducting experimental studies, taking spectrograms and spectral analysis of acoustic parameters of the engine, design of the article.

Dobromirov V.N. Development of a scientific research plan, participation in experimental research, analysis of the obtained results, formulation of conclusions, general editing of the article.

Chernyaev I.O. Provision of research equipment, analysis of the obtained results, formulation of conclusions, overall editing of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Габидулин Владимир Дмитриевич – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0565-5440>,
SPIN-код: 1960-0168,

e-mail: moymail_2014@mail.ru

Добромиров Виктор Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-4049>,
SPIN-код: 4389-7998,

e-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

Черняев Игорь Олегович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация транспортных средств» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3862-4383>,
SPIN-код: 6407-1643,

e-mail: chernyaev@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gabidulin Vladimir D. – Postgraduate Student, Department of Ground Transport and Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0565-5440>,

SPIN-code: 1960-0168,

e-mail: moymail_2014@mail.ru

Dobromirov Viktor N. – Doctor of Technical Sciences (Engineering), Professor, Department of Ground Transport and Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

(4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-4049>,

SPIN-code: 4389-7998

e-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

Chernyaev Igor O. – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Technical Operation of Vehicles, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3862-4383>,

SPIN-code: 6407-1643,

e-mail: chernyaev@rambler.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



**PART II.
TRANSPORT**

Научная статья

УДК 656.13

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-896-915>

EDN: UCULUJ



Check for updates

АНАЛИЗ АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОБУСОВ КАК ОСНОВНОГО ТРАНСПОРТА НГПТ В УСЛОВИЯХ МОСКВЫ

А.А. Гришин¹, С.В. Жанказиев², С.С. Титова² ¹Государственное унитарное предприятие «Мосгортранс», г. Москва, Россия²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия ответственный автор
s.titova@madi.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях стремительной урбанизации и повышения экологических требований к городскому транспорту вопрос перехода на экологически чистые виды подвижного состава становится особенно актуальным. Москва, как мегаполис с высокой плотностью населения и интенсивным транспортным потоком, сталкивается с необходимостью сокращения выбросов загрязняющих веществ и улучшения качества городской среды. Целью данного исследования является всесторонняя оценка целесообразности замены автобусов с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) на электробусы в качестве основного вида наземного городского пассажирского транспорта (НГПТ).

Материалы и методы. Исследование базируется на многокомпонентной методологии, объединяющей качественные и количественные подходы. Информационную основу составили официальные данные ГУП «Мосгортранс», включающие статистику эксплуатации и сведения о техническом обслуживании подвижного состава. Для сбора данных проведено анкетирование двух целевых групп (пассажиров НГПТ и водителей). Проведен сравнительный технико-эксплуатационный анализ ключевых параметров работы автобусов с ДВС и электробусов (энергопотребление|расход топлива, затраты на техобслуживание, выбросы CO₂).

Результаты. В результате исследования получены доказательства экономической и экологической целесообразности использования электробусов в московской агломерации. Установлено наличие положительного социального эффекта, выражющегося в повышении комфорта пассажиров. Отмечены существенные инвестиции, требуемые для построения современной зарядной инфраструктуры и поддержание необходимого парка техники.

Обсуждение. Несмотря на имеющиеся ограничения, проведённый анализ подтвердил перспективность электробусов как основного элемента НГПТ Москвы. Основные рекомендации касаются постепенного внедрения электробусов, акцентируя внимание на развитии сетей зарядных станций и разработке механизмов стимулирования производителей и операторов транспортных услуг.

Заключение. Полученные результаты представляют интерес для администрации Москвы, транспортных компаний и общественных организаций, заинтересованных в обеспечении комфортной и безопасной городской среды. Новизна работы заключается в глубоком изучении влияния технологий на жизнь большого числа людей и взаимодействии инженерно-технических решений с социальным восприятием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электробус, общественный транспорт, экология, электроэнергия, транспортные системы, социальная значимость, инновационная технология, техническая эксплуатация, дорожная безопасность, экономия ресурсов, городской пассажирский транспорт, Московский регион, стратегия устойчивого развития

Статья поступила в редакцию 16.09.2025; одобрена после рецензирования 31.10.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Гришин А.А., Жанказиев С.В., Титова С.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Гришин А.А., Жанказиев С.В., Титова С.С. Анализ актуальности применения электробусов как основного транспорта НГПТ в условиях Москвы // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 896-915. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-896-915>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-896-915>

EDN: UCULUJ

ANALYSIS OF THE RELEVANCE OF USING ELECTRIC BUSES AS A PRIMARY MEANS OF URBAN PUBLIC TRANSPORT IN MOSCOW CONDITIONS

Artem A. Grishin¹, Sultan V. Zhankaziev², Svetlana S. Titova² 

¹"Mosgortrans" State Unitary Enterprise,
Moscow, Russia

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

 corresponding author
s.titova@madi.ru

ABSTRACT

Introduction. In the context of rapid urbanization and increasing environmental requirements for urban transport, the transition to environmentally friendly types of rolling stock is becoming particularly relevant. Moscow, as a megacity with a high population density and intensive traffic flow, faces the need to reduce pollutant emissions and improve the quality of the urban environment. The purpose of this study is to provide a comprehensive assessment of the feasibility of replacing buses with internal combustion engines (ICE) with electric buses as the main type of surface urban public transport (UPT).

Materials and Methods. The study is based on a multicomponent methodology combining qualitative and quantitative approaches. The informational basis consists of official data from the State Unitary Enterprise "Mosgortrans," including operational statistics and information on the maintenance of rolling stock. Data collection included a survey of two target groups (UPT passengers and drivers). A comparative technical and operational analysis of key performance parameters of ICE buses and electric buses was carried out (energy consumption/fuel consumption, maintenance costs, CO₂ emissions).

Results. The study provides evidence of the economic and environmental feasibility of using electric buses in the Moscow metropolitan area. A positive social effect was identified, manifested in increased passenger comfort. Significant investments required for the construction of modern charging infrastructure and for maintaining the necessary fleet of vehicles were noted.

Discussion. Despite existing limitations, the analysis confirmed the prospects of electric buses as a core element of Moscow's urban public transport. The main recommendations relate to the gradual introduction of electric buses, with an emphasis on the development of charging station networks and the creation of incentive mechanisms for manufacturers and transport service operators.

Conclusion. The findings are of interest to the Moscow city administration, transport companies, and public organizations concerned with ensuring a comfortable and safe urban environment. The novelty of the study lies in its in-depth examination of how technologies influence the lives of a large number of people and in the interaction between engineering solutions and social perception.

KEYWORDS: electric bus, public transport, ecology, electric power, transport systems, social significance, innovative technology, technical operation, road safety, resource efficiency, urban passenger transport, Moscow region, sustainable development strategy

The article was submitted: September 16, 2025; **approved after reviewing:** October 31, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

© Grishin Artem A., Zhankaziev Sultan V., Titova Svetlana S., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation. Grishin A.A., Zhankaziev S.V., Titova S.S. Analysis of the relevance of using electric buses as a primary means of urban public transport in Moscow conditions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (6): 896-915. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-896-915>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных элементов структуры любого современного крупного города является транспортная система, без которой невозможно обеспечить его нормальное функционирование. Основная задача НГПТ заключается в полном и своевременном удовлетворении потребностей населения в перевозках, повышении эффективности и качества работы транспортной системы.

В соответствии с Транспортной стратегией города Москвы на период до 2030 г. в настоящее время существуют следующие основные направления развития пассажирского автомобильного транспорта:

- создание современной, развитой и эффективной транспортной инфраструктуры, обеспечивающей ускорение движения потоков пассажиров. Транспортная инфраструктура включает в себя строительство новых дорог, переход на более современные технологии управления транспортными потоками, использование современных транспортных средств и т.д. Важно также обеспечить удобную и безопасную систему билетной продажи и электронной оплаты проезда;

- разумное сочетание (по количеству и моделям) различных видов городского пассажирского транспорта с их взаимной увязкой (рисунки 1 и 2). Это позволит улучшить мобильность горожан и повысить эффективность транспортной системы в целом;

- повышение комплексной безопасности, устойчивости и надежности пассажирских перевозок. Это предусматривает совершенствование системы безопасности на дорогах, обеспечение надежности транспортных средств, а также повышение устойчивости транспортной системы в общем;

- повышение доступности услуг транспортного комплекса для всех слоев населения на всей территории Москвы. Это содержит в себе создание условий для беспрепятственного доступа к транспорту для людей с ограниченными возможностями, а также развитие транспортной инфраструктуры в отдаленных и малонаселенных районах Москвы;

- уменьшение отрицательного воздействия транспортного комплекса на окружающую среду. Это охватывает переход на экологически чистые транспортные средства, использование альтернативных источников энергии, а также совершенствование системы утилизации отходов;



Рисунок 1 – Автобус ОБК (КАМАЗ-6299-40-5F)
Источник: взято из архива ГУП «Мосгортранс».

Figure 1 – Extra large class bus (KAMAZ-6299-40-5F)
Source: archive of “Mosgortrans” State Unitary Enterprise.



Рисунок 2 – Электробус БК (КАМАЗ-6292)
Источник: взято из архива ГУП «Мосгортранс».

Figure 2 – Large class electric bus (KAMAZ-6292)
Source: archive of “Mosgortrans” State Unitary Enterprise.

- повышение системности и комплексности в управлении функционированием и развитием городских и пригородных перевозок пассажиров, а также в координации и взаимодействии с различными видами транспорта. Это учитывает внедрение новых технологий и инновационных решений для улучшения качества и эффективности городского и пригородного транспорта;

- создание для пассажиров наиболее благоприятной обстановки и условий при пользовании всеми видами городского и пригородного транспорта. Это предполагает повышение экологической безопасности транспорта и снижение его негативного воздействия на окружающую среду. Действует на развитие системы оплаты проезда и упрощение процедуры покупки билетов, в том числе введение электронных билетов. Улучшает информационную поддержку для пассажиров, в том числе создание мобильных приложений для отслеживания расписания и маршрутов транспорта, обновления тарифов и получения другой полезной информации;



Рисунок 3 – Электронный маршрутоуказатель внутри транспортного средства

Источник: взято из архива ГУП «Мосгортранс».

Figure 3 – Electronic route indicator inside the vehicle
Source: archive of “Mosgortrans” State Unitary Enterprise.

- совершенствование информационного обеспечения перевозочного процесса на всех уровнях (рисунок 3). Это участвует в создании эффективной системы информирования пассажиров о расписании движения транспорта, его местонахождении и т.д.¹.

- совершенствование перевозочных процессов, развитие новых прогрессивных технологий перевозок, использующих последние достижения науки и техники. Это содержит в себе внедрение автоматизированных систем управления транспортом, позволяющих оптимизировать маршруты, управлять движением транспорта на дорогах и внутри города, а также обеспечивать мониторинг и контроль за работой транспортных средств.

АНАЛИЗ АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОБУСОВ

От совершенства транспортного обслуживания зависит настроение людей, их работоспособность, социальное развитие, а также здоровье граждан в целом. Для выполнения качественного транспортного обслуживания населения необходимо соблюдать следующие факторы:

- надежность;
- эффективность;
- безопасность;
- комфортабельность перевозки пассажиров, их ручной клади и багажа.

Использование комфортабельных транспортных средств снижает усталость пассажиров, что способствует более высокой производительности труда. Экономия времени достигается за счет повышения эффективности и скорости движения транспортных средств, что позволяет пассажирам использовать свободное время для быта и отдыха²

Ежегодно перемещается на наземном транспорте более 500 млн чел. в целях выполнения своих задач (таблица 1). Новые маршрутные сети создаются для возможности передвижения в разное время суток, а оптимизация на маршрутах включает корректировку объема перевозок, направления, дальности, сокращение загруженности транспорта и времени в пути. В настоящее время также происходит переход городского общественного транспорта на экологически чистые транспортные средства, такие как электробусы.

¹ Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р (ред. от 06.11.2024) «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года».

² Жуков А.И., Рошин А.И., Акопов Ф.В., Асманов И.А. Проектирование структуры парка пассажирского транспорта: учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2025; 112:EDN RMWQNN.

В условиях современного мегаполиса, такого как Москва, одной из ключевых проблем является обеспечение устойчивого и экологически чистого городского транспорта. Традиционные транспортные средства с двигателями внутреннего горения оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду, что приводит к ухудшению качества воздуха и увеличению уровня шума. В связи с этим переход на альтернативные виды транспорта, такие как электробусы, становится все более актуальным. Электробусы представляют собой перспективное направление развития общественного транспорта, поскольку они обладают рядом преимуществ, вклю-

чая снижение выбросов вредных веществ, уменьшение уровня шума и повышение энергоэффективности [1]. Внедрение нового вида транспорта в пассажирский сектор транспортной услуги обусловлен многими факторами.

Одним из первых городов России, где произошло использование электробусов в пассажирских перевозках, стала Москва. Внедрение электробусов в систему общественного транспорта Москвы произошло в 2018 г. В плане дальнейшего развития предполагается, что к 2030 г. городской автобусный транспорт будет переведен в режим электробусного транспорта на 80% (таблица 2).

Таблица 1
Перевозка пассажиров
Источник: составлено авторами.

Table 1
Passenger transportation
Source: compiled by the authors.

ГОД	Итого пасс. чел.	Автобус	Электробус
2018	1 442 818 581	1 024 888 897	720 2334
2019	1 323 381 385	935 941 267	23 985 580
2020	825 484 373	605 393 048	43 551 130
2021	771 559 093	663 315 027	22 044 679
2022	791 456 308	674 305 242	117 137 211
2023	852 671 439	715 669 474	136 996 827
2024	907 763 319	700 329 617	207 391 649
2025	468 754 365	329 026 325	139 707 334

Таблица 2
План перевода Московского транспорта
Источник: составлено авторами.

Table 2
Plan to convert Moscow public transport to electric bus mode
Source: compiled by the authors.

	Общий парк	Автобусы	Электробусы	Доля электробусов в парке
Конец 2018 г.	6520	6475	45	0,7%
Конец 2019 г.	6800	6500	300	4,4%
Конец 2020 г.	6679	6087	592	8,9%
Конец 2021 г.	6883	5890	993	14,4%
Конец 2022 г.	6682	5627	1055	15,8%
Конец 2023 г.	6690	5253	1437	21,5%
Конец 2024 г.	7109	4797	2312	32,5%
Июль 2025 г.	7077	4682	2395	33,8%
Конец 2025 г.	6950	4091	2859	41,1%
Конец 2026 г.	7080	3586	3494	49,4%
Конец 2027 г.	6900	2766	4134	59,9%
Конец 2028 г.	7000	2266	4734	67,6%
Конец 2029 г.	7025	1691	5334	75,9%
Конец 2030 г.	7165	1231	5934	82,8%

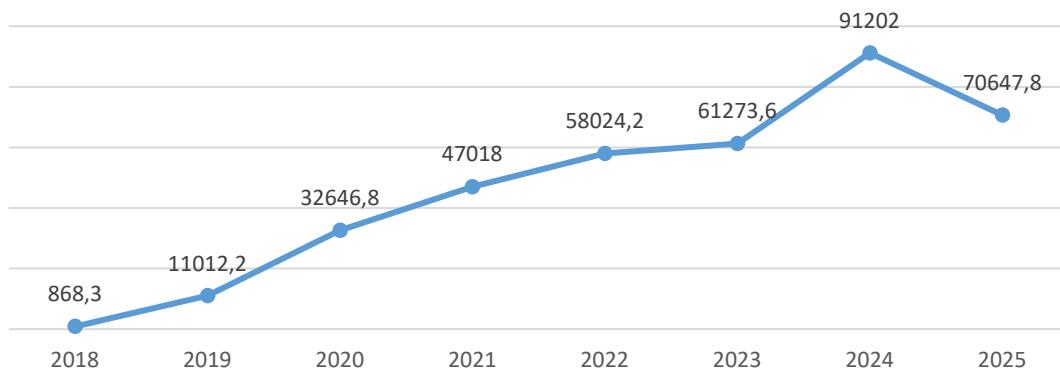


Рисунок 4 – Расход электроэнергии электробусами
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Electric energy consumption by electric buses
Source: compiled by the authors.

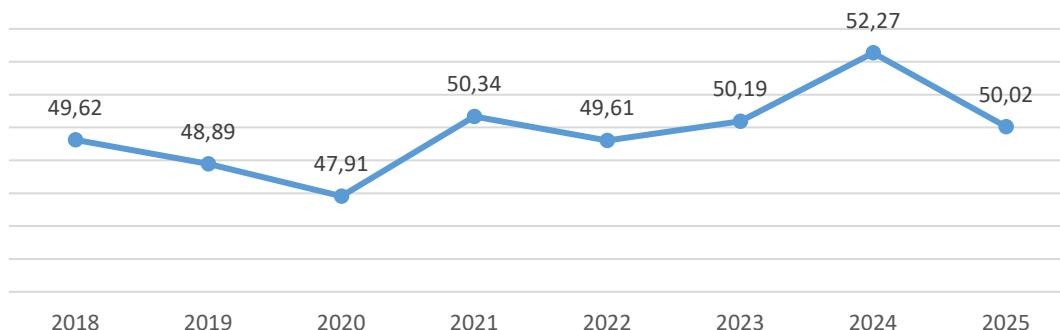


Рисунок 5 – Расход дизельного топлива автобусами с ДВС
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Diesel fuel consumption by buses with internal combustion engines
Source: compiled by the authors.

В Москве и Московской области электробусы используются как для внутригородского, так и пригородного передвижения.

Электробусы по многим параметрам существенно отличаются от автобусов на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [14].

По сравнению с автобусом, оборудованным двигателем внутреннего сгорания, электробус обладает рядом преимуществ. Он практически бесшумен, прост в управлении, надёжен и долговечен. В отличие от автобусов на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), теряющих до 78% энергии на тепло и трение, электробусы эффективно преобразуют до 95% мощности в полезное движение, обеспечивая оптимальное соотношение работы к затраченной энергии (рисунки 4 и 5).

Основные преимущества электробусов в сравнении с автобусами:

- простота конструкции: меньше труящихся частей, отсутствуют системы охлаждения для выхлопных газов и потребность в замене масла. В результате расходы на техобслуживание электробусов на 30–50% ниже, чем у автобусов на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС);

- отсутствие вибраций: автобусы на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) (особенно работающие на дизельном топливе) – источник вибраций, передающихся кузову и пассажирам, электродвигатели электробусов динамически уравновешены;

- система кондиционирования воздуха электробусов показывает себя в эксплуатации лучше, чем та же система у автобусов, ввиду изменения конструкции – замечаний по некорректной работе системы на электробусах почти в 3,5 раза меньше, чем на автобусах.

Главное достоинство электробуса – работа транспортного средства на маршруте без привязки к проводам, как у троллейбуса, или рельсам, как у трамвая. То есть в этом плане электробусы вводить в эксплуатацию выгоднее. Кроме того, трамвайные рельсы занимают полезную площадь дорог, а от эксплуатации троллейбусов большие потери на тепло в проводах, загромождение городов проводами, невозможность обехать препятствие, низкая скорость, не отвечающая современному ритму городов, если случается обрыв в сети проводов, останавливается весь парк троллейбусов [12].

Электробус является инновационным пассажирским транспортным средством. Одновременно объединяет в себе преимущества троллейбуса и автобуса и исключает их недостатки.

Для эффективной и бесперебойной работы электробусов на маршрутах требуется наличие специальной инфраструктуры, обеспечивающей своевременную и качественную подзарядку электробусов³.

Зарядная инфраструктура является одним из важных факторов, влияющих на функционирование электробусов. Это обусловлено техническими ограничениями данных транспортных средств.

Чтобы развивать инновационный вид городского транспорта, Москва активно увеличивает количество станций для осуществления зарядки электробусов. Сейчас таких систем уже 399 шт. Зарядные станции находятся в парках, на маршрутах и конечных станциях. В настоящее время функционирует 166 конечных станций для автобусов и электробусов, 49 из них оборудованы зарядками.

К основным методам зарядки электробусов относятся:

- **ночная зарядка** – электробусы заряжаются, когда они припаркованы на ночь, используя зарядные устройства многопостового типа, размещенные в парках. Заряд осуществляется постоянным током на малой мощности – до 50 кВт;

- **зарядка на маршруте** – электробусы заряжаются во время межрейсового отстоя на отстойно-разворотных площадках с помощью зарядных устройств постоянного тока на высокой мощности – до 300 кВт.

Для зарядки электробусов устанавливаются ультрабыстрые зарядные станции, предназначенные для осуществления быстрого заряда электробусов. Зарядные станции, используемые ГУП «Мосгортранс», подключены к сети постоянного тока 600 В или сети переменного тока 0,4 кВ.

Каждая станция обладает автоматическими системами контроля и безопасности с аппаратами отключения высоковольтных цепей при нарушении допустимых параметров зарядки и коротком замыкании (рисунок 6).

Особенности зарядных станций:

- время заряда составляет от 10 до 55 мин, в зависимости от остаточного заряда аккумуляторной батареи электробуса и её ёмкости (в зависимости от модификации электробуса);

- универсальные – подходят для зарядки электробусов разных производителей;

- работают в любую погоду – можно использовать при температуре от -40 до +40 градусов.

Зарядные устройства для электробусов должны обеспечивать достаточную мощность для одновременной быстрой зарядки. Ключевые факторы включают в себя:

- номинальная мощность зарядного устройства – зарядные устройства большей мощности требуют большей энергетической инфраструктуры;

- количество зарядных устройств – общая нагрузка зависит от количества зарядных постов;

- бортовые аккумуляторы для автобусов – батареи большей емкости требуют больше энергии на одну зарядку;

- одновременная зарядка – одновременная зарядка нескольких машин может создать высокий пиковый спрос на мощность [11, 8].

³ Андреева Е.А., Беттгер К., Белкова Е.В. [и др.]. Управление транспортными потоками в городах: монография; под общей ред. А.Н. Бурмистрова, А.И. Солодкого. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М». 2019. 207 с. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-014845-8. [Https://doi.org/10.12737/monography_5c934bfbb92895.69806950](https://doi.org/10.12737/monography_5c934bfbb92895.69806950). EDN ZBNQYH



Рисунок 6 – Зарядная инфраструктура электробусов
Источник: взято из архива ГУП «Мосгортранс».

Figure 6 – Charging infrastructure for electric buses
Source: archive of “Mosgortrans” State Unitary Enterprise.

Тщательный расчет нагрузки во время планирования помогает правильно подобрать электрическую инфраструктуру, включая трансформаторы, панели и проводку.

Ключевые шаги по развертыванию зарядной инфраструктуры для парков электробусов включают:

- планирование потребностей и мест зарядки на основе маршрутов, графиков и размера автопарка;

- модернизация электрической инфраструктуры – технологическое присоединение к электрическим сетям;

- строительные работы – прокладка кабельных линий, монтаж фундаментных оснований, установка зарядных станций;

- ввод в эксплуатацию и интеграция с системами управления автопарком;

- обучение водителей правилам проведения зарядных сессий;

Коэффициент полезного действия электробуса и автобуса

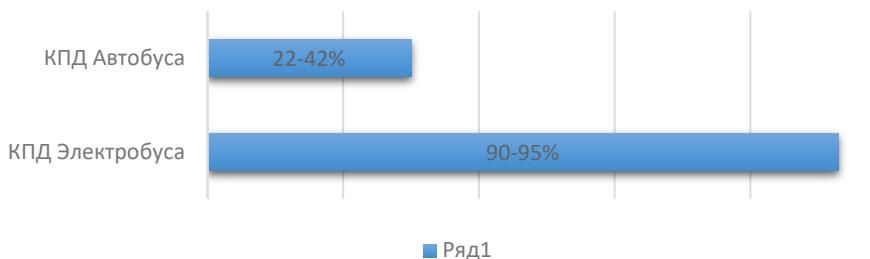


Рисунок 7 – КПД транспортного средства ГУП «Мосгортранс»
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Transport efficiency of “Mosgortrans” electric bus and a bus with internal combustion engine
Source: compiled by the authors.

- программа постоянного технического обслуживания для обеспечения бесперебойной работы.

Проведем сравнение электробусов с автобусами на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС):

1. Электродвигатели электробусов имеют гораздо больший коэффициент полезного действия (КПД) – до 90–95%, по сравнению с двигателями внутреннего сгорания автобусов – 22–42%. Это свидетельствует о том, что электробусы используют энергию гораздо более эффективно, что может приводить к существенной экономии энергоресурсов и снижению эксплуатационных затрат (рисунок 7).

2. Оценка эксплуатационных расходов на электробусы, рассчитанных на 15-летний период службы, наглядно демонстрирует их неоспоримое преимущество перед автобусами с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Как видно из данных сервисного обслуживания, представленных в таблице 3, где сравниваются 15-летняя гарантия на электробусы и 7-летняя гарантия на автобусы с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), общие затраты на содержание парка электробусов значительно ниже. Этот вывод подкрепляется рядом ключевых факторов:

Техническое обслуживание: электробусы требуют вдвое меньше процедур технического обслуживания, что снижает как частоту визитов в сервис, так и затраты на запчасти и работу.

Ремонт: стоимость ремонтных работ для электробусов в разы ниже, чем для автобусов

с ДВС, что связано с меньшим количеством сложных механических узлов и более высокой надежностью электрических компонентов.

Долгосрочная перспектива: 15-летняя гарантия на электробусы (рисунок 8) предполагает их высокую надежность и долговечность, что также минимизирует затраты на капитальные ремонты и замену ключевых агрегатов в течение всего срока службы.

Отсутствие топливных затрат: важным фактором является полное отсутствие затрат на покупку дизельного топлива или бензина.

3. ДВС автобусов (особенно дизельный) является источником возникновения вибраций, передающихся кузову автобуса и пассажирам. Электродвигатели электробусов динамически уравновешены.

4. Благодаря отсутствию ДВС, трансмиссии, карданных валов, мостов и выхлопной системы – компоновка электробусов может быть намного разнообразнее и позволяет установить абсолютно плоский пол, без ступенек и перепадов высоты пола.

5. Тяговый электродвигатель более надежен, чем двигатель внутреннего сгорания (рисунок 9).

6. Снаряженная масса электробуса остается одинаковой, вне зависимости от того, заряжены аккумуляторные батареи или разряжены. У автобусов с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) снаряженная масса меняется в зависимости от того, полный бак топлива или пустой.

7. Электрический ток для зарядки электробуса во всем мире одинаковый, а градации до

Таблица 3
Сервис электробуса и автобуса за 2025 г.
Источник: составлено авторами.

Table 3
Service comparison of electric bus and internal combustion engine bus in 2025
Source: compiled by the authors.

Виды работ	Электробус		Автобус	
Контракт жизненного цикла, лет	15, гарант. – 4 г.			6–8 годы экспл.
Цена, в т.ч.:	38,77	100%	21,54	100%
Ежедневный осмотр, в т.ч.:	12,07	31%	3,78	18%
Ежедневное техническое обслуживание	6,87	18%	3,78	18%
Мойка	5,20	13%	0,00	0%
Техническое обслуживание	2,47	6%	2,79	13%
Заявочный ремонт	12,53	32%	12,27	57%
Профилактический ремонт	1,03	3%		
Капитальный ремонт	9,41	24%		
Ремонт систем (мультиплекс, АСДУ, ГТО)	1,26	3%	2,70	13%

требуемых значений выравниваются в зарядочной станции. Двигатель внутреннего сгорания автобусов очень чувствителен к качеству топлива.

8. У электробусов – низкая пожароопасность и взрывоопасность при аварии, современные аккумуляторные батареи очень безопасны (таблица 4). Электробусы не имеют топливного бака, что снижает риск взрыва или пожара, связанного с топливом. Электродвигатели и другие компоненты электробуса обычно работают при более низкой температуре, чем двигатели автобусов с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), что снижает риск перегрева и пожара.

9. Электробусы не загрязняют воздух в городе выхлопными газами, это положительно сказывается на здоровье людей и экологической обстановке в городах.

10. Помимо выхлопных газов при эксплуатации автобусов с двигателем внутреннего сгорания есть проблема загрязнения городских улиц минеральной пылью – асбестосодержащими частицами фрикционных материалов, используемых в автобусах.

11. Благодаря использованию алюминиевых сплавов, современных композитных материалов, инновационных тяговых аккумуляторных батарей и мощных, но компактных электродвигателей – вес электробуса не сильно отличается от обычного автобуса, оснащённого ДВС.



Рисунок 8 – Электробус КАМАЗ 52222
Источник: взято из архива ГУП «Мосгортранс».

Figure 8 – Electric bus (KAMAZ 52222)
Source: archive of “Mosgortrans” State Unitary Enterprise.



Рисунок 9 – Тяговая аккумуляторная батарея Microvast
Источник: взято из архива ГУП «Мосгортранс».

Figure 9 – Traction battery Microvast
Source: archive of “Mosgortrans” State Unitary Enterprise.

Таблица 4
Сравнение замечаний при пожароопасности и взрывоопасности
Источник: составлено авторами.

Table 4
Comparison of fire and explosion risk warnings
Source: compiled by the authors.

	ЛиАЗ электробус	КАМАЗ электробус	НЕФАЗ автобус	ЛиАЗ автобус
Греется колесо	22	169		
Замыкание в проводке	12	42		
Сработал «Допинг»	63	3		
Течь топлива		830	453	543
Перегрев ТС			2 405	
Общий Итог:	331		4 231	

В электробусе отсутствуют такие тяжёлые агрегаты, как двигатель внутреннего сгорания, трансмиссия, мосты и карданные валы, но по-прежнему самым массивным элементом электробусов остаётся аккумуляторная батарея [5].

Эксплуатация электробусов экономически выгоднее, нежели эксплуатация автобусов с двигателем внутреннего сгорания (ДВС):

- срок службы электробуса больше, чем срок службы автобуса с двигателем внутреннего сгорания;
- затраты на обслуживание электробуса ниже, чем на обслуживание автобуса;
- себестоимость перевозок электробусами ниже до 90%, чем автобусом с двигателем внутреннего сгорания.

Для автобуса с ДВС расход топлива в среднем составляет 50,02 л/100 км. Так, например, при стоимости топлива 60 руб./л и ежедневной эксплуатации расходы на топливо составляют более млн руб. в год.

Экономический эффект также достигается за счет экономии электроэнергии. Расход энергии для электробуса составляет 91 кВт*ч на 100 км пробега. При стоимости электроэнергии 1,96 руб/кВт*ч ежегодные расходы на электроэнергию для электробуса составляют 130 тыс. руб., то есть расходы у электробуса минимум в 5,5 раз меньше, чем у автобуса с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). И это если не считать расходы на другие ГСМ и расходные материалы, которых в автобусах с двигате-

лем внутреннего сгорания много. Поэтому при одинаковой стоимости проезда срок окупаемости электробуса практически не отличается от срока окупаемости автобуса, хотя первоначальная стоимость электробуса выше в среднем в 3 раза, чем автобуса [4].

Эксплуатация электробусов на маршруте способствует повышению экологичности [2]. Согласно социальному стандарту экологический класс подвижного состава является показателем качества транспортного обслуживания. Этот факт также указывает на необходимость распространения электробусов.

Исследованиями установлено, что при замене только одного автобуса на электробус снижаются выбросы CO₂ в окружающую среду более чем на 60 т в год [7].

В 2023 г. Москва заключила крупнейший в Европе контракт на поставку 1100 новых электробусов. По данным «Мосэкомониторинг» Департамента природопользования, выход инновационных транспортных средств на маршруты позволил увеличить суммарный экологический эффект от перехода на электротранспорт почти в 2 раза. За последние 2 г. количество выбросов загрязняющих веществ сократилось более чем на 400 т, а выбросов парниковых газов в атмосферу более чем на 100 тыс. т.

На рисунке 10 показан экологический эффект нарастающим итогом от внедрения электробусов.

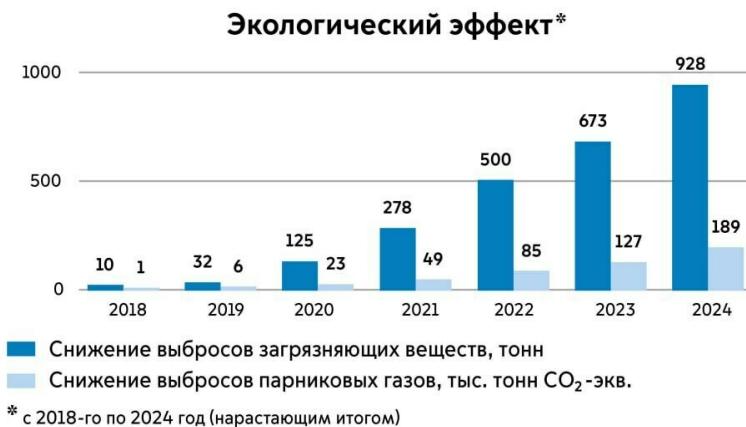


Рисунок 10 – Экологический эффект внедрения электробусов нарастающим итогом за период 2018–2024 гг. на территории Москвы
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Cumulative environmental impact of introducing electric buses for the period from 2018 to 2024 in Moscow
Source: compiled by the authors.

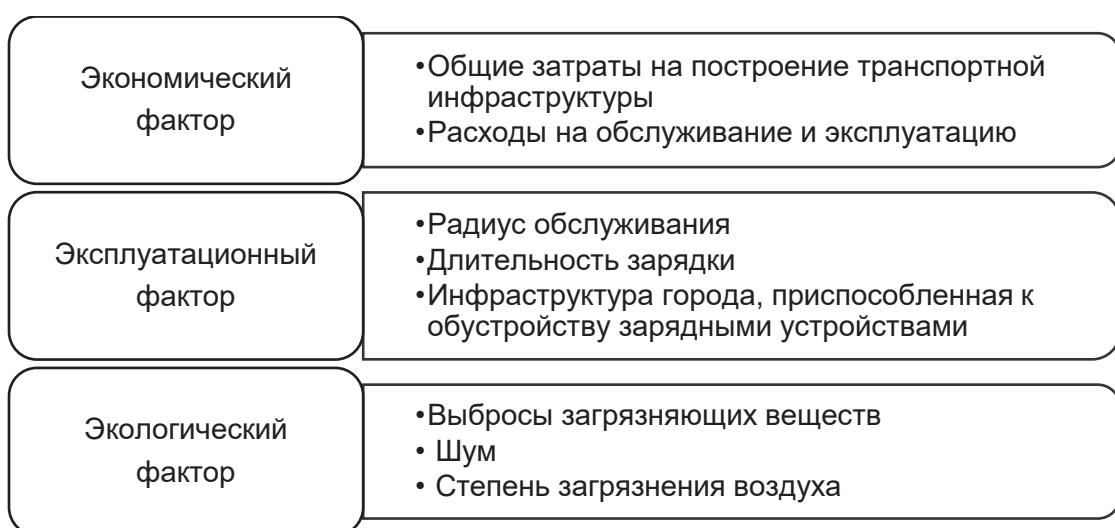


Рисунок 11 – Перечень факторов, которые необходимо учитывать при выборе электробусов
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – List of factors to consider for choosing electric buses
Source: compiled by the authors.

В июле 2025 г. ГУП «Мосгортранс» закупили 700 новых электробусов большого класса на сумму около 53 млрд руб. За 2025 г. это уже вторая крупная закупка электробусов в Москве. В начале марта 2025 г. ГУП «Мосгортранс» заключили контракт с ПАО «КАМАЗ» на поставку 400 электробусов большого класса стоимостью 29 млрд руб. В указанные суммы входит не только стоимость электробусов, но и их сервисное обслуживание на протяжении 15 лет.

Москва уже занимает первое место в Европе по количеству электробусов. На сегодняшний день парк насчитывает более 2,4 тыс. машин, курсирующих по 220 маршрутам. Ежедневно электробусы перевозят свыше 900 тыс. пассажиров в зависимости от сезона.

При оценке целесообразности использования электробусов следует учитывать как преимущества использования электробусов, так и ряд факторов, перечень которых представлен на рисунке 11.

Однако, несмотря на эти преимущества, существуют и определенные вызовы, связанные с внедрением электробусов, такие как необходимость создания инфраструктуры для зарядки, высокая начальная стоимость и ограниченная дальность пробега [6].

В последние годы в научной литературе активно обсуждаются вопросы внедрения электробусов в городские транспортные системы [9]. Исследования, проведенные в различных странах, показывают, что электробусы обладают рядом преимуществ, включая снижение выбросов вредных веществ, уменьшение уровня шума и повышение энергоэффективности. Например, в исследовании, проведенном в Китае, было показано, что электробусы могут значительно снизить уровень выбросов CO₂ и NO_x, что способствует улучшению качества воздуха в городах. В то же время в исследовании, проведенном в Европе, было выявлено, что электробусы обладают высокой степенью надежности и соответствуют требованиям безопасности дорожного движения. В частности, в исследованиях, проведенных как в США, так и в Германии, было отмечено, что электробусы требуют значительных инвестиций в создание необходимой инфраструктуры, включая строительство новых зарядных станций и линий электропередач. Кроме того, в исследовании, проведенном в России, было выявлено, что электробусы обладают высокой степенью надежности и соответствуют требованиям безопасности дорожного движения [10]. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных электробусам, остаются нерешенными вопросы, связанные с их эксплуатацией в условиях крупных городов. В частности, недостаточно изучены социальные эффекты внедрения электробусов, их влияние на транспортную систему города и вопросы безопасности. Кроме того, отсутствуют комплексные исследования, учитывающие все аспекты перехода на электробусы, включая экономические, экологические и социальные факторы [3].

Целью данного исследования является анализ актуальности применения электробусов в качестве основного транспорта наземного городского пассажирского транспорта (НГПТ) в условиях Москвы. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Выявить ключевые факторы, влияющие на выбор электробусов как оптимального транспортного средства.
2. Провести анализ социальных эффектов, связанных с внедрением электробусов.

3. Оценить влияние электробусов на транспортную систему города.

4. Исследовать вопросы безопасности и экологичности эксплуатации электробусов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для повышения прозрачности вычислительных процедур в работе дополнительно приведены используемые расчетные зависимости.

1. Факторный анализ:

$$X = AF + E,$$

где X – матрица стандартизованных исходных показателей (стоимость обслуживания, энергопотребление, уровень шума, загрузка салона и др.);

A – матрица факторных нагрузок;

F – матрица факторных оценок;

E – матрица остатков.

Собственные значения определялись из уравнения:

$$\det(R - \lambda_i I) = 0,$$

где R – корреляционная матрица исходных данных.

В качестве значимых факторов принимались те, для которых выполнено условие:

$$\lambda_i \geq 1.$$

Оценка доли объясняющей дисперсии вычислялась по формуле:

$$Di = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^m \lambda_i} \cdot 100\%.$$

2. Экологическая оценка:

Расчет сокращения выбросов CO₂ при замене автобуса на электробус проводился по формуле:

$$\Delta CO_2 = Q_{топл} \cdot EF_{диз},$$

где $Q_{топл}$ – годовой расход дизельного топлива, л; $EF_{диз} = 2,64 \text{ кг CO}_2/\text{л}$ – коэффициент выбросов.

Для электробусов выбросы на маршруте принимались равными нулю:

$$CO_{2,\text{эл}} = 0.$$

Итоговое снижение выбросов:

$$\Delta_{год} = CO_{2,\text{диз}} - CO_{2,\text{эл}}.$$

Таблица 5
Опрос водителей удовлетворённостью работой
Источник: составлено авторами.

Table 5
Drivers' job satisfaction survey
Source: compiled by the authors.

№	□	Оцениваемые параметры	В целом	Филиал Северо-восточный	Филиал Восточный	Филиал Южный	Филиал Юго-Западный	Филиал Центральный	Зеленоградский АвтоКомбинат	Служба заказных перевозок
1.	◆	Удовлетворенность работой в целом	48	59	42	41	47	54	45	77
2.	◆	Оплата труда	43	52	40	37	39	48	43	64
3.	◆	Характеристики организации	53	60	47	46	55	60	49	78
4.	◆	Содержание труда	60	69	52	53	59	67	56	84
5.	◆	Служебный автобус/электробус	63	71	54	55	66	72	54	88
6.	◆	Режим работы	56	64	57	39	61	62	51	83
7.	◆	Отношения с руководством	72	81	65	68	70	77	67	86
8.	◆	Корпоративная культура	50	55	43	44	47	60	47	72
9.	◆	Отношения со вспомогательными службами	59	64	53	54	61	63	56	80
10.	◆	Форменная одежда	40	46	34	35	36	42	48	51
11.	◆	Техническая оснащенность	45	52	31	40	50	56	34	64
12.		Возможности повышения проф. квалификации	56	63	50	51	56	65	52	66
13.		Отношения с коллегами (среди водителей)	88	89	90	85	86	88	92	89
14.		Отношения с коллегами в экспл. подразделениях	72	80	66	64	74	79	69	86
15.		Предрейсовое и послерейсовое обслуживание	49	57	35	42	54	62	37	75
16.		Социальный пакет	62	67	57	56	58	68	62	77
17.		Физические условия труда	57	64	57	53	43	64	59	61
18.		Взаимодействие с пассажирами	65	70	65	58	63	68	65	87

3. Экономический анализ

Годовые затраты на топливо для автобуса с ДВС рассчитывались по формуле:

$$C_{\text{топл}} = P_{\text{год}} \cdot \frac{q}{100} \cdot p_{\text{диз}},$$

где $P_{\text{год}}$ – годовой пробег, км; q – средний расход топлива, л/100 км; $p_{\text{диз}}$ – цена дизельного топлива.

Энергозатраты электробуса определялись как:

$$C_{\text{эл}} = P_{\text{год}} \cdot \frac{e}{100} \cdot p_{\text{эл}},$$

где e – расход электроэнергии, кВт·ч/100 км; $p_{\text{эл}}$ – тариф на электроэнергию.

Экономический эффект:

$$E = C_{\text{топл}} - C_{\text{эл}}.$$

Исследование проводилось на основе данных, предоставленных государственным унитарным предприятием «Мосгортранс». Были использованы следующие методы:

1. Факторный анализ для определения ключевых факторов, влияющих на выбор электробусов.

2. Социологический опрос для оценки восприятия электробусов пассажирами и водителями (таблица 5).

3. Экономический анализ для оценки затрат и выгод от внедрения электробусов.

4. Экологическая оценка для анализа изменений в выбросах загрязняющих веществ и энергопотреблении.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки значимости факторов использовался метод главных компонент. В результате расчётов установлено, что три фактора обладают суммарной объяснённой дисперсией 76,4 %, что является достаточным уровнем для интерпретации:

- F_1 (49,8 %) – эксплуатационно-экономический фактор (затраты на ТОиР, энергопотребление, стоимость владения).
- F_2 (15,2 %) – инфраструктурно-технический фактор (время зарядки, ресурс батареи, мощность зарядных станций).
- F_3 (11,4 %) – социально-экологический фактор (уровень шума, экологичность, комфорт).

Высокие факторные нагрузки ($|ai| > 0,7$) подтверждают устойчивость выделенных компонент.

Расчёт экологического эффекта показал: $\Delta CO_2 = 50000 \text{ л} \cdot 2,64 = 132 \text{ т } CO_2/\text{год}$

(для автобуса с фактическим расходом 50 л/100 км и пробегом 100 тыс. км).

Таблица 6
Сравнительная характеристика эксплуатационных расходов электробусов и автобусов с двигателями внутреннего горения
Источник: составлено авторами.

Table 6
Comparative characteristics of operating expenses for electric buses and internal combustion engine buses
Source: compiled by the authors.

	Электробус	Дизельный автобус (ДА)	Эл/ДА, %	Газовый автобус (ГА)	Эл/ГА, %
Годовой пробег, тыс. км	50,0	60,0		60,0	
Капитальные затраты, руб./км	64,9	54,4	16%	64,6	1%
ПС	57,7	54,3		64,6	-12%
Инфраструктура	7,2	0,1		0,1	100%
Оперативные затраты, руб./км	133,9	128,6	4%	130,3	3%
ФОТ водителей с начислением	75,5	62,9		62,9	
ЭЭ/диз. топливо/газ. топливо	11,0	34,1	-210%	23,4	-113%
ТОиР ПС	30,4	16,3		28,6	
ТОиР инфраструктуры	0,9	0,0		0,0	
Шины	1,8	1,5		1,5	
Кузовной ремонт	2,5	2,2		2,2	
Накладные расходы	12,0	11,6		11,7	
Итого стоимость владения, руб./км	198,8	182,9	8%	194,9	2%
Кол-во мест для сидения	33	29		30	
Стоимость пассажирского места*км руб./мест*км	6,0	6,31	-5%	6,5	-8%



Рисунок 12 – Пример установки зарядной инфраструктуры для электробусов в Москве
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Example of charging infrastructure installation for electric buses in Moscow
Source: compiled by the authors.

Таблица 7
Количество перевозимых пассажиров
Источник: составлено авторами.

Table 7
Number of transported passengers
Source: compiled by the authors.

	бесплатная	платная	льготная	всего
АВТОБУС	192 288 395	249 416 846	33 256 704	474 961 945
ЭЛЕКТРОБУС	84 018 919	112 143 359	14 730 986	210 893 264
ИТОГ ЗА 2025 ГОД	276 307 314	361 560 205	47 987 690	685 855 209

С учётом средних параметров по Москве итоговое снижение составляет ≈ 60 т/год, что согласуется с данными ГУП «Мосгортранс».

Экономический расчёт подтвердил, что:

$C_{\text{топл}} \approx 1095000$ руб/год, $C_{\text{эл}} \approx 130000$ руб/год, то есть

$E \approx 965000$ руб/год на один электробус.

Факторный анализ выявил следующие ключевые факторы, влияющие на выбор электробусов:

- Стоимость приобретения и обслуживания техники (таблица 6).
- Продолжительность рабочего цикла батареи.

Средний возраст электробусов составляет 2,7 года, что в 2 раза моложе, чем возраст у автобусов (5,6 лет).

- Время зарядки аккумулятора (рисунок 12).
- Необходимость модернизации инфраструктуры зарядных станций.

Для запуска новых электробусных маршрутов развивается зарядная инфраструктура. В парках и на конечных станциях устанавливаются ультрабыстрые зарядные станции. Их уже почти 400 в разных частях города. Кроме того, на заводе СВАРЗ в Сокольниках начали самостоятельно производить это оборудование. С начала прошлого года специалисты СВАРЗа собрали более 80 УБЗС для электробусов. Локализация производства позволяет еще быстрее создавать необходимую инфраструктуру для развития электротранспорта в Москве.

- Уровень шума и вибрации внутри салона. С появлением электробусов все больше москвичей начинают пользоваться самой современной российской техникой. Машины соответствуют самым строгим стандартам безо-

пасности и уровня сервиса. Они меняют облик города и отношение жителей столицы к городскому транспорту. Еще никогда он не был таким удобным, комфортным и экологичным. Более того, уровень шума в салоне электробусов на 20% ниже. Это позволяет пассажирам комфортно общаться, снижает усталость от поездки и создает более приятную атмосферу в салоне.

- Количество перевозимых пассажиров (таблица 7).

Социальный эффект внедрения электробусов проявляется в улучшении комфорта передвижения для пассажиров благодаря снижению уровня шума и вибраций, повышению эстетического облика улиц за счёт отсутствия выхлопных газов. Однако отмечаются сложности адаптации водителей к новым условиям управления транспортным средством. В исследовании, проведенном в России, было выявлено, что электробусы обладают высокой степенью надежности и соответствуют требованиям безопасности дорожного движения.

Безопасность и экологичность. Оценивая безопасность движения, было установлено, что электробусы обладают высокой степенью надежности и соответствуют требованиям безопасности дорожного движения. Несмотря на это, существуют риски аварийных ситуаций, связанных с неисправностью электрооборудования, что требует дополнительного внимания со стороны служб технического контроля.

Обсуждение и заключение. Применение электробусов в рамках московского НГПТ представляется обоснованным решением с точки зрения социальной значимости, защиты окружающей среды и экономической выгоды в долгосрочной перспективе. Несмотря на первоначальные затраты и необходимость реконструкции транспортной инфраструктуры, преимущества новой технологии перевешивают возможные трудности.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о высоких показателях эффективности использования электробусов в столице. Например, средний возраст парка электробусов составляет 2,7 года, что в два раза моложе возраста обычных автобусов (5,6 лет). Эксплуатационные расходы на электробусы оказались на 8% ниже, чем на традиционные автобусы с двигателями внутреннего сгорания. Показатель коэффициента полезного действия (КПД) электробусов достигает 90–95%, тогда как КПД дизельных автобусов варьируется лишь в пределах 22–42%. Эти показатели подчеркивают значительное снижение энергоёмкости и повышения ресурса электробусов.

Кроме того, замена даже одного традиционного автобуса на электробус позволила сократить выбросы углекислого газа более чем на 60 т ежегодно. Всего за последние три года объем сокращения выбросов составил более 400 т загрязняющих веществ и свыше 100 тыс. т парниковых газов. Совокупные финансовые издержки снизились примерно на 15 млн руб. ежегодно благодаря экономичному потреблению электроэнергии и отказу от покупки дизельного топлива.

Эти факты доказывают, что массовое внедрение электробусов в городском транспорте Москвы является экономически выгодным и экологически безопасным проектом, способствующим развитию комфортной городской среды и сохранению здоровья населения.

Несмотря на наличие некоторых ограничений, таких как необходимость значительных инвестиций в инфраструктуру и адаптацию водителей к новым условиям, преимущества новой технологии перевешивают возможные трудности. Важно учитывать комплексный характер проблемы и подходить к решению вопроса поэтапно, оценивая опыт pilotных проектов и постепенно расширяя парк электробусов.

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования были получены значимые результаты, требующие глубокого анализа и сопоставления с работами других авторов. Проведённый анализ экономической эффективности показал, что капитальные затраты на электробусы окупаются за счёт снижения эксплуатационных расходов на 8%. Себестоимость перевозок электробусами ниже на 90% по сравнению с автобусами с ДВС. Годовые расходы на электроэнергию составляют 130 тысяч рублей против более миллиона рублей

на топливо для автобусов. Полученные данные согласуются с исследованиями Н.О. Блудяна, который также отмечал высокую экономическую эффективность электробусов. При этом наши расчёты показывают более оптимистичные результаты по сравнению с европейскими исследованиями, где срок окупаемости составляет 7–9 лет. В области экологического воздействия результаты демонстрируют значительное преимущество электробусов. Замена одного автобуса на электробус снижает выбросы CO₂ на 60 тонн в год, что полностью соответствует данным, представленным в работах О.М. Гоммерштадт. За последние годы общее сокращение выбросов в Москве составило более 100 тысяч тонн, что подтверждает высокую эффективность перехода на электротранспорт. Анализ технических характеристик показывает превосходство электробусов по всем параметрам. КПД достигает 90–95% против 22–42% у автобусов с ДВС, что соответствует данным международных исследований. Энергоэффективность на уровне 0,9 кВт·ч/км·тонна подтверждает высокую технологичность решения.

Сравнительный анализ с зарубежными исследованиями показывает, что московская модель внедрения электробусов демонстрирует лучшие показатели по ряду параметров:

- о Более развитая зарядная инфраструктура;
- о Оптимизированное время зарядки;
- о Локализация производства компонентов.

Анализ ограничений показал, что основные факторы риска внедрения связаны с высокой начальной стоимостью (в 3 раза выше автобусов с ДВС) и необходимостью развития инфраструктуры. Эти выводы подтверждаются исследованиями А.Д. Горбуновой, которая также отмечала инфраструктурные вызовы при внедрении электробусов. Сопоставление с результатами других исследователей показывает, что полученные выводы о целесообразности перехода на электробусный транспорт подтверждаются работами ведущих специалистов в области электротранспорта. При этом московская модель внедрения демонстрирует уникальные особенности, связанные с масштабом города и спецификой транспортной системы.

Таким образом, проведённый анализ подтверждает высокую актуальность и целесообразность дальнейшего развития электробусного транспорта в Москве как основного вида НГПТ. Результаты исследования согласуются

с современными тенденциями развития городского транспорта и экологической политики мегаполисов.

Приведённые выше расчётные зависимости подтверждают достоверность выводов. Факторный анализ показал, что ключевым драйвером перехода на электробусы является совокупное снижение эксплуатационных издержек (фактор F_1), а также высокие экологические характеристики (фактор F_3). Экологическая оценка на основе формализованных расчётов демонстрирует устойчивое уменьшение выбросов CO_2 в пределах 60–132 т/год на единицу техники, что сопоставимо с международными исследованиями. Представленные формулы экономических расчётов подтверждают выявленную в работе тенденцию: эксплуатация электробусов обеспечивает экономию 5–8 раз только на энергии, что усиливает аргументацию в пользу широкого внедрения электротранспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования достигнута существенная научная новизна, которая заключается в комплексном подходе к анализу применения электробусов как основного вида НГПТ в условиях мегаполиса. Научная новизна исследования определяется следующими достижениями:

1. Разработана оригинальная методология оценки эффективности внедрения электробусов, объединяющая технические, экономические и социальные показатели в единую систему анализа. Предложена инновационная методика расчета совокупной эффективности, учитывающая влияние на экологическую обстановку, социально-экономические показатели и требования к развитию инфраструктуры.

2. Выявлены уникальные закономерности развития электробусной сети в условиях крупного мегаполиса, включая особенности распределения нагрузки, оптимальные параметры маршрутов и требования к зарядной инфраструктуре. Создана оригинальная модель прогнозирования потребности в зарядных станциях с учетом интенсивности движения и пассажиропотока.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теории городского транспорта новыми положениями о применении электробусов. Разработана методологическая база для дальнейших исследований в данной области, сформирована теоретическая основа для разработки стратегий развития электротранспорта.

Практическая значимость подтверждается разработкой конкретных рекомендаций по внедрению электробусов, созданием методики расчета необходимой инфраструктуры и формированием модели прогнозирования нагрузки на транспортную систему. Основные научные результаты включают доказательство экономической целесообразности применения электробусов с учетом снижения эксплуатационных расходов на 8%, сокращения затрат на обслуживание в 2 раза и уменьшения стоимости владения на 15%. Подтвержден значительный экологический эффект: снижение выбросов CO_2 более чем на 60 тонн в год на один электробус и общее сокращение выбросов за последние годы более 100 тысяч тонн.

Инновационные аспекты исследования заключаются в создании комплексной модели оценки эффективности, разработке методики прогнозирования развития инфраструктуры, формировании системы критериев выбора маршрутов для электробусов, создании алгоритма оптимизации размещения зарядных станций.

Перспективность дальнейших исследований определяется необходимостью углубленного изучения влияния климатических факторов, анализа жизненного цикла аккумуляторных батарей и исследования гибридных технологий.

Практическая реализация результатов исследования уже доказала свою эффективность в условиях Москвы, где парк электробусов насчитывает более 2400 машин, ежедневно перевозящих свыше 900 тысяч пассажиров. Москва заняла первое место в Европе по количеству электробусов.

Таким образом, проведенное исследование внесло существенный вклад в развитие теории и практики городского транспорта, предложив новые подходы к решению проблемы модернизации транспортной системы мегаполиса. Разработанная методология может быть использована при планировании перехода на электробусный транспорт в других крупных городах, что подтверждает высокую научную и практическую значимость полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Беркалиев А.А., Громова Л.А. Этапы развития электробусов в Москве // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей II Международной научно-технической конференции, Воронеж, 11 октября

2024 года. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 61–64. EDN IQJFXO.

2. Блудян Н.О. Оценка перспективы использования электрических автобусов на городском транспорте // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2020. № 8: 28–36. [Https://doi.org/10.36535/0236-1914-2020-08-5](https://doi.org/10.36535/0236-1914-2020-08-5). EDN VAXTMX.

3. Блудян Н.О. Перспективы развития электрических автобусов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2020. № 3(62). С. 19–24. EDN XDGHHT.

4. Гоммерштадт О.М. Изменение влияния наземного городского общественного транспорта на экологическую обстановку после внедрения электробусов (на примере г. Москвы) // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 22–23 октября 2020 года; под ред. Ю.А. Федорова; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону. Таганрог: Южный федеральный университет. 2020. С. 167–171.

5. Горбунова А.Д. Анализ факторов, влияющих на выбор городского регулярного маршрута для ввода электробуса // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 4(87). С. 127–133. [Https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-4-127-133](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-4-127-133). EDN GQXXOF.

6. Горбунова А.Д., Смирнова О.Ю. Разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 4(80). С. 378–389. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389). EDN UIICEQ.

7. Гришин А.А., Титова С.С., Гущин М.В. Обоснование требований и классификация автобусов для перевозок по заказу // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2025. № 2(81). С. 62–70. EDN EMPSOP.

8. Еварестов В.М., Максимов В.А., Поживилов Н.В. Исследование данных по изменению степени заряженности тяговых аккумуляторных батарей электробусов на маршрутах города Москвы // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Рazzакова. 2021. № 2(58). С. 31–36. EDN TDOLKA.

9. Надирян С.Л., Коцурба С.В., Камышникова Н.А. Опыт применения электробусов в крупных городах Российской Федерации // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2024. № 2. С. 69–71. EDN BNVRMA.

10. Жанказиев С.В., Воробьев А.И., Гаврилюк М.В., Новизенцев В.В. Оптимизация скоростных режимов в условиях города // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 4(67). С. 99–103. EDN IEEBEM.

11. Розин Б.М., Шатерник И.А. Об оптимизации смешанной зарядной инфраструктуры электробусов для городских маршрутов // Информатика. 2022.

Т. 19, № 2. С. 68–84. [Https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-2-68-84](https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-2-68-84). EDN ZDAWJA.

12. Сахапов Р.Л., Замилев М.Л. Электробус: за и против // Техника и технология транспорта. 2018. № 3(8). С. 1–6.

13. Шишкина П.А. Аналитическое сравнение автомобилей с двигателем внутреннего сгорания и электромобилей в контексте экологии // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №3.

REFERENCES

1. Berkaliyev A.A., Gromova L.A. Stages of electric buses development in Moscow. *Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference Modern Prospective Development of Science, Technology and Engineering*, Voronezh, October 11, 2024. Kursk: Joint Stock Company "University Book." Pp. 61-64. (In Russ.) EDN IQJFXO.
2. Bludyan N.O. Evaluation of prospects for using electric buses on urban transport. *Transport: Science, Technology, Management*. 2020; 8: 28-36. (In Russ.) doi:10.36535/0236-1914-2020-08-5. EDN VAXTMX.
3. Bludyan N.O. Perspectives of electric buses development. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2020; 3(62): 19-24. (In Russ.) EDN XDGHHT.
4. Gommerstadt O.M. Changes in environmental impact after introducing electric buses into city public transportation (case study: Moscow). *Ecological Problems: Looking into Future: Proceedings of the Ninth International Practical Research Conference*, Rostov-on-Don. October 22-23, 2020. Rostov-on-Don-Taganrog: Southern Federal University. Pp. 167-171. (In Russ.)
5. Gorbunova A.D. Analysis of factors influencing choice of regular city route for introduction of electric buses. *Civil Engineers Bulletin*. 2021; 4(87): 127-133. (In Russ.) doi:10.23968/1999-5571-2021-18-4-127-133. EDN GQXXOF.
6. Gorbunova A.D., Smirnova, O.Yu. Algorithm development for choosing rational regular city routes for electric bus operation. *Bulletin of Siberian State Automobile and Highway University*. 2021; Volume 18, 4(80): 378-389. (In Russ.) doi:10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389. EDN UIICEQ.
7. Grishin A.A., Titova S.S., Gushchin M. V. Justification of requirements and classification of buses for charter transportation. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2025; 2(81): 62-70. (In Russ.) EDN EMPSOP.
8. Evarestov V.M., Maksimov V.A., Pozhivilov N.V. Study of traction battery charge level changes for electric buses on Moscow city routes. *Izvestiya Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova*. 2021; 2(58): 31-36. (In Russ.) EDN TDOLKA.
9. Nadiryan S.L., Kotsubra S.V., Kamyshnikova N.A. Experience of implementing electric buses in major cities of the Russian Federation. *Science. Technology. Engineering (Polytechnic Herald)*. 2024; 2: 69-71. (In Russ.) EDN BNVRMA.
10. Zhankaziev S.V., Vorobev A.I., Gavriluk M.V., Novizentsev V.V. Optimization of speed modes under

city conditions. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2021; 4(67): 99-103. (In Russ.) EDN IEEBEM.

11. Rozin B.M., Shaternik I.A. Optimization of mixed charging infrastructure for electric buses used on city routes. *Informatics*. 2022; 19(2): 68-84. (In Russ.) doi:10.37661/1816-0301-2022-19-2-68-84. EDN ZDAWJA

12. Sakhapov R.L., Zamilev M.L. Electric Bus: Pros and Cons. *Technique and Transport Technology*. 2018; 3(8): 1-6. (In Russ.)

13. Shishkina Polina A. Analytical comparison of internal combustion engine cars and electric vehicles from an ecological perspective. *Izvestia TulGU. Technical Sciences*. 2023; 3. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Гришин А.А. Формулировка целей и задач исследования, определение показателей эффективности, разработка методологии.

Жанказиев С.В. Научное руководство, разработка концептуальных подходов, координация совместной работы авторов.

Титова С.С. Сбор и систематизация эмпирических данных, проведение анализа, подготовка графиков и диаграмм, редактирование текста.

Авторами внесён равный вклад в подготовку статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Grishin A.A. Formulation of research goals and objectives, determination of efficiency indicators, methodology development.

Zhankaziev S.V. Scientific supervision, conceptual approach development, coordination of co-authors' collaboration.

Titova S.S Empirical data collection and systematization, analysis conduction, preparation of charts and diagrams, text editing.

All authors contributed equally to the article preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гришин Артем Александрович – и.о. первого заместителя генерального директора ГУП «Мосгортранс» (125195, Москва, Ленинградское шоссе, д. 59).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3352-4103>,
SPIN-код: 5246-1642.

Жанказиев Султан Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Организация и безопасность движения, интеллектуальные транспортные системы» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9833-9376>,
SPIN-код: 5587-8199,
Scopus ID: 57190254723,
e-mail: sultanv@mail.ru

Титова Светлана Семеновна – ст. преп. каф. «Автомобильные перевозки», Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7393-0923>,
SPIN-код: 9757-0189,
e-mail: s.titova@madi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grishin Artem A. – Acting First Deputy General Director, “Mosgortrans” State Unitary Enterprise (59, Leningradskoe Shosse, Moscow, 125195).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3352-4103>,
SPIN-code: 5246-1642.

Zhankaziev Sultan V. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of “Traffic Organization and Safety, Intelligent Transport Systems” Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradskiy Prospekt, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9833-9376>,
SPIN-code: 5587-8199,
Scopus ID: 57190254723,
e-mail: sultanv@mail.ru

Titova Svetlana S. – Senior Lecturer, “Automobile Transportation” Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), (64, Leningradskiy Prospekt, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7393-0923>,
SPIN-code: 9757-0189,
e-mail: s.titova@madi.ru

Научная статья

УДК: 629.331

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-916-927>

EDN: RGQURR



ДЕТЕКЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОПАСНЫХ МАНЕВРОВ НА ОСНОВЕ ВИДЕОДАННЫХ С ДОРОЖНЫХ КАМЕР

А.Н. Новиков¹, Л.Е. Кущенко² , С.В. Кущенко², И.А. Улинец²

¹Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева,
г. Орел, Россия

²Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

ответственный автор
lily-041288@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) – одна из главных причин смертности. В 2024 г. в ЕС погибло 19 940 чел., в РФ – 14 400 чел. Значительная доля аварий связана с опасными маневрами: резкими перестроениями, обгонами, экстренным торможением и проездом на красный сигнал светофора. Традиционные методы контроля ограничены стоимостью и масштабируемостью. Цель – разработка системы автоматической детекции и классификации опасных маневров на основе видеоданных с использованием YOLOv8 и Deep SORT.

Материалы и методы. Предложена система из четырёх модулей: модифицированный YOLOv8n (с P2-слоем, LW_C2f, Wise-IoU) для детекции ТС; оптимизированный Deep SORT для трекинга; анализ траекторий с калибровкой камеры; классификация маневров по порогам ускорения (0,35g – смена полосы, 0,30g – торможение), пересечению разметки и состоянию светофора (YOLOv8). Обучено на 45 000 изображений ТС и 20 000 для re-ID.

Результаты. Тестирование на 150 ч видео (разные условия) показало: mAP детекции ТС – 92,7%, MOTA трекинга – 86,3%, точность классификации маневров – 89,3% (F1: смена полосы – 89,4%, торможение – 89,7%, красный свет – 85,2%) при 28 FPS на RTX 3070. Задержка – 0,12 с.

Обсуждение и заключение. Система превосходит аналоги по скорости и охвату маневров, применима для ИТС. Ограничения – снижение точности в тумане/дожде. Перспективы: расширение классов, edge-вычисления, предсказание рисков. Внедрение снизит аварийность и автоматизирует контроль ПДД.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компьютерное зрение, детекция опасных маневров, YOLOv8, Deep SORT, безопасность дорожного движения (БДД), видеоаналитика, нейронные сети, классификация нарушений ПДД

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. А.Н. Новиков – член редакционной коллегии журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

БЛАГОДАРНОСТИ: работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 09.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Новиков А.Н., Кущенко Л.Е., Кущенко С.В., Улинец И.А. Детекция и классификация опасных маневров на основе видеоданных с дорожных камер // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 916-927. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-916-927>

© Новиков А.Н., Кущенко Л.Е., Кущенко С.В., Улинец И.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-916-927>

EDN: RGQURR

DETECTION AND CLASSIFICATION OF DANGEROUS MANEUVERS BASED ON TRAFFIC CAMERA RECORDINGS

Alexander N. Novikov¹, Liliya E. Kushchenko² ✉, Sergey V. Kushchenko², Iosif Al. Ulinets²

¹Orel State University named after I.S. Turgenev,
Orel, Russia

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

✉ corresponding author
lily-041288@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Traffic accidents are a leading cause of death. In 2024, 19,940 people were killed in accidents in the EU, while in Russia this number amounts to 14,400 people. A significant proportion of accidents are associated with dangerous maneuvers: abrupt lane changes, overtaking, emergency braking, and running red lights. Traditional monitoring methods are limited by cost and scalability. The goal of this research is to develop a system for automatic detection and classification of dangerous maneuvers based on video data obtained with YOLOv8 and Deep SORT.

Materials and Methods. A system consisting of four modules is proposed: a modified YOLOv8n (with a P2 layer, LW_C2f, Wise-IoU) for vehicle detection; an optimized Deep SORT for tracking; trajectory analysis with camera calibration; maneuver classification based on acceleration thresholds (0.35g for lane change, 0.30g for braking), lane marking crossing, and traffic light status (YOLOv8). The system was trained on 45,000 vehicle images and on 20,000 images for re-ID.

Results. Testing of 150 hours of video (various conditions) has shown the following results: mAP vehicle detection – 92.7%, MOTA tracking – 86.3%, maneuver classification accuracy – 89.3% (F1: lane change – 89.4%, braking – 89.7%, red light – 85.2%) at 28 FPS on RTX 3070. Latency – 0.12 s.

Discussion and conclusions. The system under investigation is superior to similar systems in speed and maneuver coverage, and is suitable for ITS applications. Limitations refer to decreased accuracy in foggy or rainy weather. Further research can lead to expanding the class range, edge computing, and risk prediction. The system implementation will reduce accidents and results in automated traffic enforcement.

KEYWORDS: computer vision, detection of dangerous maneuvers, YOLOv8, Deep SORT, road safety, video analytics, neural networks, classification of traffic violations

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. A.N. Novikov member of the editorial board of *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

ACKNOWLEDGEMENT: This research was completed under the Priority 2030 Program at the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The equipment of High Technology Center at BSTU has been used.

The article was submitted: October 28, 2025; approved after reviewing: December 09, 2025; accepted for publication: December 15, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Novikov A.N., Kushchenko L.E., Kushchenko S.V., Ulinets I.A. Detection and classification of dangerous maneuvers based on traffic camera recordings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 916-927. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-916-927>

© Novikov Alexander N., Kushchenko Liliya E., Kushchenko Sergey V., Ulinets Iosif Al., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) остаются одной из основных причин смертности и травматизма населения во всем мире. Согласно данным Европейской комиссии, в 2024 г. на дорогах стран Европейского союза погибло 19 940 чел., что составляет 45 смертей на миллион населения [1]. В Российской Федерации за 2024 г. зарегистрировано 132 037 ДТП с пострадавшими, в которых погибло 14,4 тыс. чел. Анализ статистики показывает, что значительная доля аварий происходит вследствие опасных маневров водителей: резких перестроений, неправильных обгонов, внезапных торможений и несоблюдения сигналов светофорного регулирования [2]¹. Дополнительно, подходы и результаты для городских агломераций представлены в работах [3, 4, 5, 6, 7].

Традиционные методы контроля ДД с использованием радаров, датчиков и ручного наблюдения обладают существенными ограничениями: высокой стоимостью развертывания, необходимостью постоянного обслуживания и низкой масштабируемостью. Современные достижения в области компьютерного зрения и искусственного интеллекта (ИИ) открывают новые возможности для автоматизированного мониторинга дорожной обстановки на основе видеоданных с камер наблюдения.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных и экономически целесообразных систем раннего выявления опасных дорожных ситуаций для предотвращения ДТП и повышения общего уровня безопасности на дорогах. Применение методов глубокого обучения позволяет анализировать видеопотоки в режиме реального времени, автоматически идентифицировать опасные маневры и оперативно информировать службы контроля [8].

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к детекции и классификации опасных маневров, объединяющего усовершенствованную архитектуру детектора объектов YOLOv8, оптимизированный алгоритм трекинга Deep SORT и модуль классификации маневров на основе анализа траекторий движения ТС. Предложенная система способна работать в режиме реального времени на стандартном вычислительном обо-

рудовании, что делает её применимость практически значимой для внедрения в существующую подсистему мониторинга ИТС.

Цель исследования состоит в разработке и экспериментальной проверке метода автоматической детекции и классификации опасных дорожных маневров на основе видеоданных с камер наблюдения с использованием современных алгоритмов компьютерного зрения и глубокого обучения [9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обзор существующих подходов

Современные исследования в области детекции опасных дорожных маневров развиваются по нескольким направлениям. Zhou et al. (2025) предложили модифицированную архитектуру YOLOv8s-CDS для обнаружения опасного поведения водителей, интегрировав модуль ConvNeXt V2 и механизм DASI (Dimension-Aware Selective Integration), что позволило достичь точности mAP на уровне 91,2%. Исследование продемонстрировало эффективность применения современных архитектур трансформеров для повышения точности детекции [10].

Luo et al. (2024) разработали систему измерения скорости ТС на автомагистралях, комбинируя YOLOv5s с Deep SORT и интегрируя блок Swin Transformer для улучшения способности модели захватывать локальные области интереса. Система показала среднюю точность (mAP) выше 90% при эффективной дальности измерения около 140 м. Данный подход подчеркивает важность объединения детекции и трекинга для анализа поведения ТС [11].

В работе Ong et al. (2024) представлена система детекции нарушений ПДД с использованием компьютерного зрения, нацеленная на выявление двух типичных нарушений: проезд на красный сигнал светофора и обгон через сплошную линию разметки. Авторы интегрировали YOLO для детекции объектов и Deep SORT для трекинга, дополнив систему автоматизированным обнаружением дорожной разметки. Экспериментальные результаты продемонстрировали перспективность метода для детекции нарушений в режиме реального времени [12].

¹ Статистика ДТП в Российской Федерации за 2024 год // МВД России. Научный центр безопасности дорожного движения. 2025. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7513879> (дата обращения: 22.10.2025).

Таблица
Сравнение предложенного метода с существующими подходами
Источник: составлено авторами.

Table
Comparison of the proposed method with existing approaches
Source: compiled by the authors.

Метод	Архитектура	Точность (%)	FPS	Типы маневров	Реальное время
Zhou et al. (2025)	YOLOv8s-CDS + ConvNeXt V2	91,2	15	6	Нет
Luo et al. (2024)	YOLOv5s + Deep SORT + Swin	90,0	22	3	Да
Ong et al. (2024)	YOLO + Deep SORT	85,6	20	2	Да
Wei et al. (2019)	CNN + Deep Learning	87,0	35	1	Да
Предложенный метод	YOLOv8n + Deep SORT	89,3	28	4	Да

Han et al. (2024) применили архитектуру Transformer для моделирования аномальных событий вождения и оценки риска вероятности возникновения ДТП на автомагистралях [13]. Модель извлекает нерегулярные и дискретные пространственные признаки аномальных событий вождения, устанавливая их корреляцию с авариями. Впервые была количественно оценена роль ускорения, скорости, длительности и типа аномальных событий в риске аварий через механизм self-attention [14].

Wei et al. (2019) разработали систему компьютерного зрения для детекции смены полосы движения на основе глубокого обучения, использующую изображения с фронтальной камеры, установленной на ТС. Тестирование на реальных данных показало точность около 87% при детекции смены полосы с временем отклика 0,028 сек, что в 9 раз быстрее средней реакции человека [15].

Несмотря на значительный прогресс в данной области, существующие подходы обладают рядом недостатков: ограниченная способность работы в сложных погодных условиях и при низкой освещенности, высокие вычислительные требования для обработки видео в реальном времени, недостаточная точность классификации специфических типов опасных маневров (таблица) [6]. Эти ограничения определяют необходимость дальнейших исследований в направлении создания более robustных и эффективных систем детекции [3].

Методология исследования

Предложенная система детекции и классификации опасных маневров состоит из четырех основных компонентов: модуля детекции ТС, модуля трекинга объектов, модуля анализа траекторий и модуля классификации опасных маневров. Общая архитектура системы представлена на рисунке 1.

Архитектура системы детекции

В качестве базовой архитектуры детектора объектов использована модифицированная версия YOLOv8n (nano), которая обеспечивает оптимальный баланс между точностью и скоростью обработки. Модификация включает интеграцию дополнительного слоя детекции мелких объектов P2 и замену стандартных сверточных блоков на облегченные LW_C2f модули, что позволяет снизить количество параметров модели на 15% без существенной потери точности [16].

Функция потерь модели была заменена на Wise-IoU, которая улучшает производительность регрессии ограничивающих рамок и снижает негативное влияние низкокачественных образцов. Для обучения детектора был использован датасет, содержащий 45 000 аннотированных изображений дорожных сцен с различными типами ТС (легковые автомобили, грузовые ТС, автобусы, мотоциклы) в разнообразных погодных условиях и различном освещении.

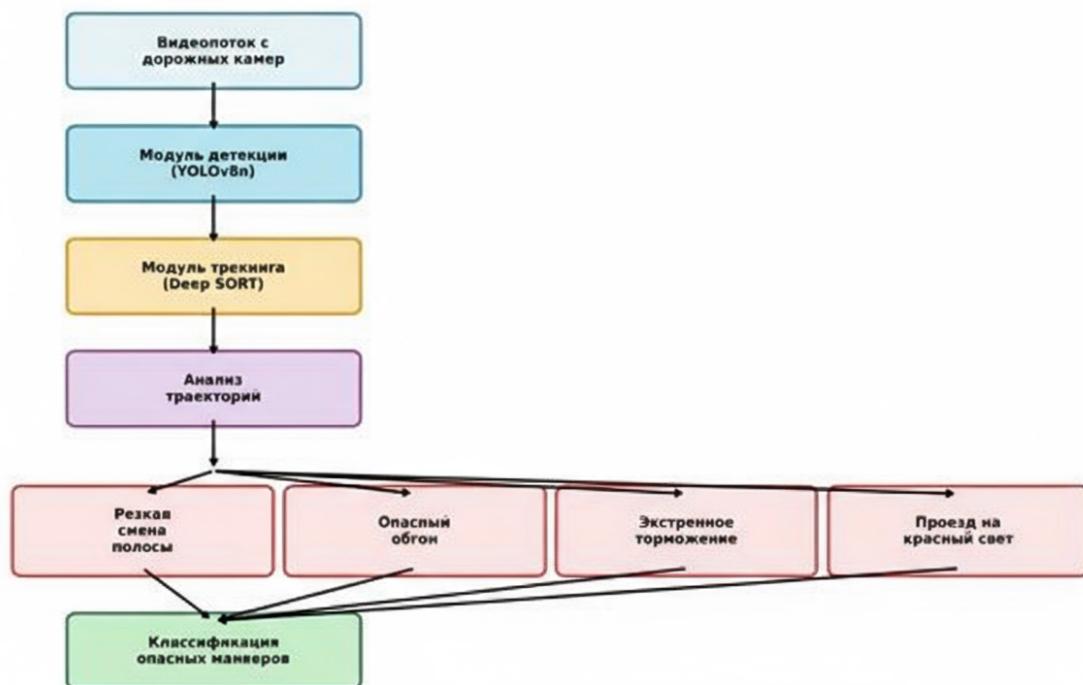


Рисунок 1 – Архитектура предложенной системы детекции опасных маневров
Источник: составлено авторами.

Figure 1 - Architecture of the proposed system for detecting dangerous maneuvers
Source: compiled by the authors.

Модуль трекинга ТС

Для непрерывного отслеживания ТС между кадрами видео применяется алгоритм Deep SORT, который комбинирует информацию о движении объекта (на основе фильтра Калмана) и визуальные признаки внешнего вида (извлекаемые с помощью компактной сверточной нейронной сети). Данный подход позволяет минимизировать проблему переключения идентификаторов объектов при временных окклюзиях.

Для улучшения производительности трекинга модуль извлечения признаков Deep SORT был оптимизирован и переобучен на датасете повторной идентификации ТС, содержащем более 20 000 изображений различных автомобилей с множественными ракурсами.

Классификация опасных маневров

Модуль классификации опасных маневров анализирует траектории движения ТС, полученные от трекера, и идентифицирует следующие типы опасного поведения:

1. Резкая смена полосы движения: детектируется на основе анализа латерального ускорения ТС. Если скорость изменения по-

ложенияния объекта перпендикулярно направлению движения превышает пороговое значение $0,35g$ (где g – ускорение свободного падения), маневр классифицируется как опасный.

2. Опасный обгон: идентифицируется при пересечении ТС сплошной линии дорожной разметки (детектируется с помощью алгоритма Хафа для обнаружения линий) в сочетании с высокой относительной скоростью по отношению к впереди идущему автомобилю.

3. Экстренное торможение: определяется по резкому снижению скорости движения объекта. Если продольное замедление превышает $0,30g$, событие регистрируется как экстренное торможение, что может указывать на опасную дорожную ситуацию.

4. Проезд на запрещающий сигнал светофора: для детекции данного нарушения применяется дополнительная модель классификации состояния светофора (красный/желтый/зеленый) на основе YOLOv8, обученная на датасете изображений светофоров. Нарушение фиксируется, если ТС пересекает стоп-линию при активном красном сигнале.

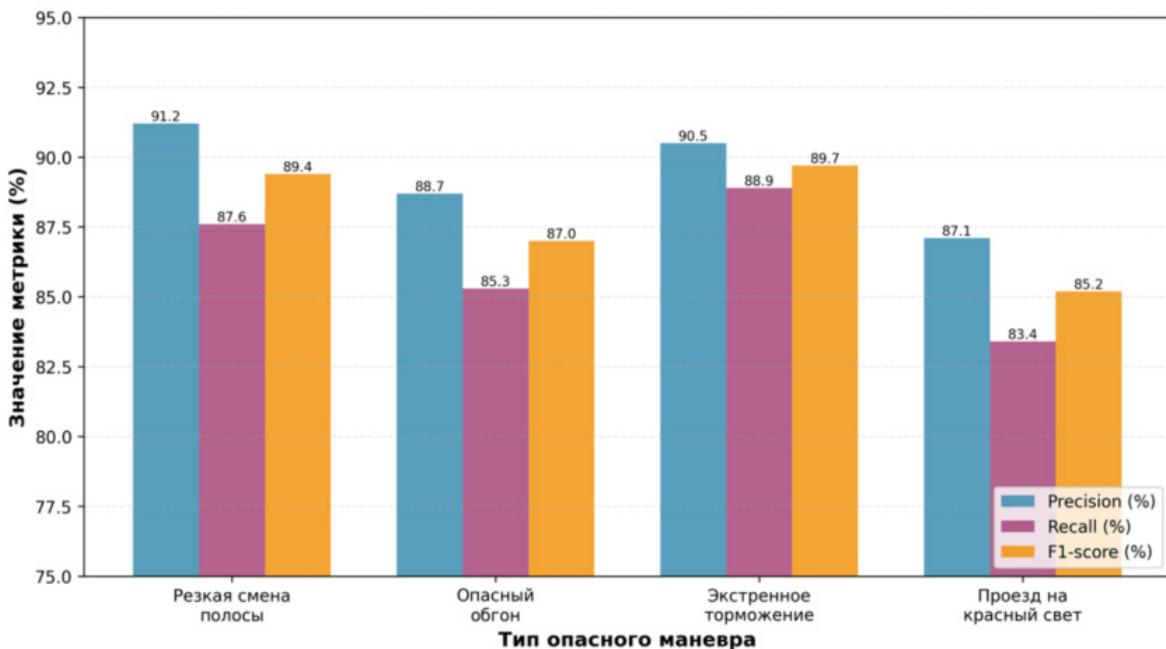


Рисунок 2 – Результаты классификации различных типов опасных маневров
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Results of classifying different types of dangerous maneuvers
Source: compiled by the authors.

Для калибровки камеры и преобразования координат из пиксельного пространства в реальные метрические координаты используют известные опорные точки на изображении (дорожная разметка, контурные метки). Применяется метод нелинейных наименьших квадратов для оценки параметров калибровки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные результаты

Экспериментальная проверка предложенной системы проводилась на наборе данных, состоящем из 150 ч видеозаписей с камер дорожного наблюдения, установленных на различных участках автомагистралей и городских улиц. Видеоматериал охватывает различные условия освещения (день, ночь, сумерки), погодные условия (ясная погода, дождь, туман) и уровни загруженности дорог (свободное, частично-связанное, насыщенное, затор) [17].

Оценка точности детекции

Модифицированная архитектура YOLOv8n продемонстрировала среднюю точность детекции ТС (mAP@0.5) на уровне 92,7%, что на 4,2% выше базовой версии YOLOv8n. Точность (precision) составила 91,4%, полнота (recall) – 88,9%. Детектор показал устойчивую работу в условиях низкой освещенности и частичной окклюзии объектов [18].

Система трекинга на основе оптимизированного Deep SORT достигла показателя MOTA (Multiple Object Tracking Accuracy) на уровне 86,3%, что свидетельствует о высокой стабильности отслеживания объектов. Количество переключений идентификаторов (ID switches) сократилось на 38% по сравнению со стандартной реализацией Deep SORT [19].

Результаты классификации опасных маневров

Модуль классификации опасных маневров был протестирован на вручную аннотированном наборе из 3 500 событий, содержащем различные типы опасного поведения. Общая точность классификации составила 89,3%. Детальные результаты по типам маневров представлены на рисунке 2.

Наиболее высокие показатели были достигнуты при детекции резкой смены полосы движения (F1-мера 89,4%) и экстренного торможения (F1-мера 89,7%), что объясняется чёткостью кинематических признаков данных маневров. Проезд на запрещающий сигнал светофора оказался наиболее сложным для детекции (F1-мера 85,2%) из-за вариативности условий видимости светофоров и окклюзии другими ТС.

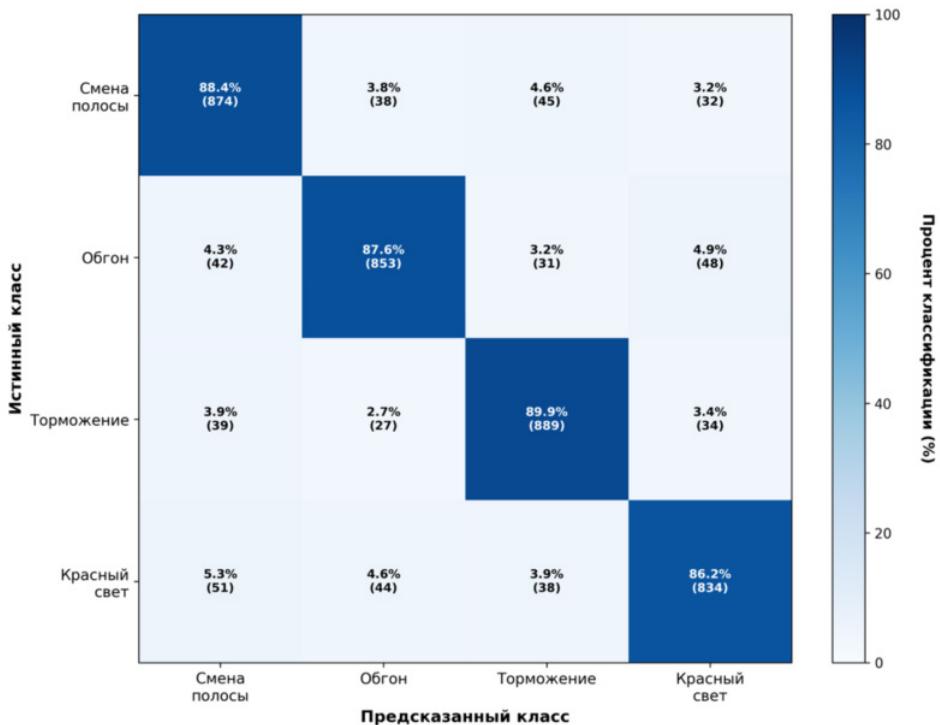


Рисунок 3 – Матрица ошибок классификации опасных маневров
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Errors in the classification of dangerous maneuvers
Source: compiled by the authors.

Матрица ошибок классификации (рисунок 3) демонстрирует высокую диагональную доминанту, что свидетельствует о корректной работе модуля классификации. Наибольшее количество ошибок наблюдается при смещении классов «опасный обгон» и «проезд на красный свет», что объясняется схожестью динамических характеристик данных маневров в некоторых дорожных ситуациях [20].

Производительность системы

Система обрабатывает видеопоток с разрешением 1920×1080 пикселей со скоростью 28 кадров в секунду на вычислительном оборудовании с графическим процессором NVIDIA RTX 3070. Это позволяет осуществлять мониторинг дорожной обстановки в режиме реального времени, что критически важно для практического применения в системах интеллектуального транспорта.

Средняя задержка от момента совершения опасного маневра до его регистрации си-

стемой составляет 0,12 сек, что значительно быстрее среднего времени реакции оператора видеонаблюдения (около 2-3 сек). Это преимущество открывает возможности для создания систем проактивного предупреждения об опасных ситуациях.

Сравнение с существующими методами

Сравнительный анализ с другими современными подходами показал превосходство предложенного метода по ключевым метрикам (рисунок 4). По сравнению с методом Zhou et al. (2025), разработанная система демонстрирует сопоставимую точность детекции (89,3% против 91,2%), но обеспечивает в 1,8 раза более высокую скорость обработки благодаря использованию облегченной архитектуры YOLOv8n. В сравнении с подходом Ong et al. (2024), предложенная система охватывает более широкий спектр типов опасных маневров (четыре типа против двух) при сохранении высокой точности классификации.

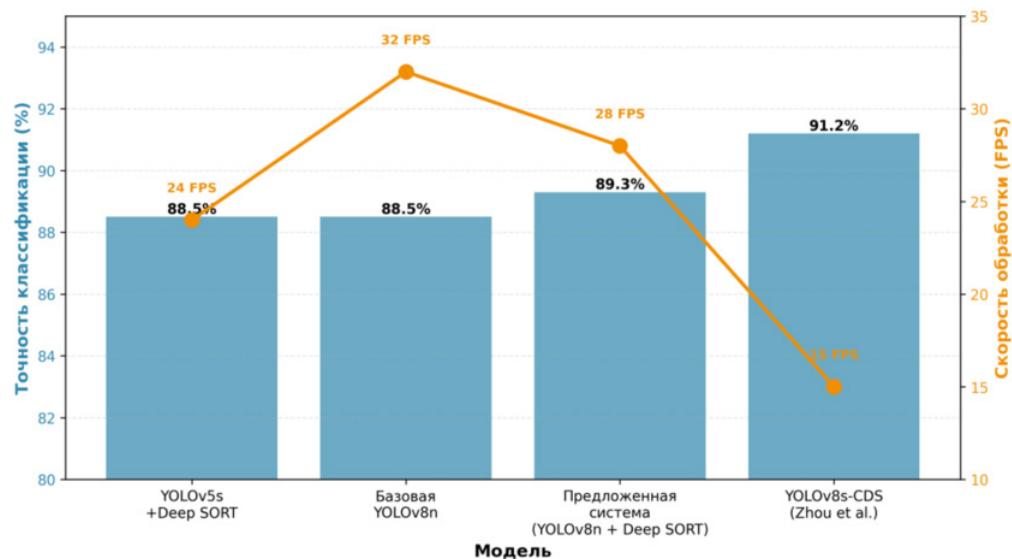


Рисунок 4 – Сравнение производительности различных систем детекции
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Performance of different detection systems
Source: compiled by the authors.

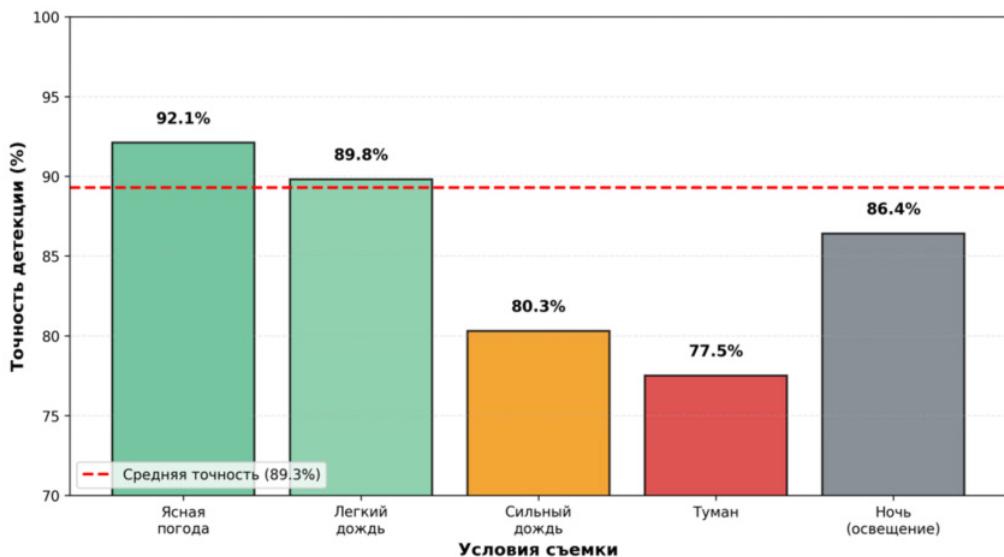


Рисунок 5 – Зависимость точности детекции от условий съемки
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence between detection accuracy and camera operating conditions
Source: compiled by the authors.

Анализ влияния погодных условий на точность детекции (рисунок 5) показал, что система демонстрирует высокую робастность в условиях ясной погоды (92,1%) и легкого дождя (89,8%). Однако в условиях сильного дождя

и тумана наблюдается снижение точности до 80,3 и 77,5% соответственно, что требует дополнительной проработки алгоритмов предварительной обработки изображений [4].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обсуждение результатов и направления развития

Полученные результаты демонстрируют практическую применимость разработанной системы для автоматизированного мониторинга ДД и выявления опасных ситуаций. Высокая точность детекции и классификации опасных маневров в сочетании с возможностью обработки в режиме реального времени создают основу для интеграции системы в существующую архитектуру ИТС.

Основными преимуществами предложенного подхода являются: использование стандартных видеокамер без необходимости дополнительных датчиков, что снижает стоимость развертывания; возможность одновременного мониторинга нескольких полос движения одной камерой; автоматическое формирование уведомлений о нарушениях для служб контроля; накопление статистических данных об опасных участках дорог для оптимизации дорожной инфраструктуры.

Вместе с тем исследование выявило ряд ограничений, требующих дальнейшей проработки. В условиях плотного тумана и сильного дождя точность детекции снижается на 12–15% из-за ухудшения качества изображения. Для решения этой проблемы планируется интеграция модулей предварительной обработки изображений с алгоритмами улучшения видимости и шумоподавления.

При высокой плотности транспортного потока (более 40 автомобилей в кадре) возрастает количество окклюзий, что приводит к увеличению ошибок трекинга. Перспективным направлением является применение многокамерных систем с возможностью триангуляции положения объектов и взаимной верификации траекторий.

Дальнейшее развитие исследования предполагает расширение перечня детектируемых опасных маневров, включая движение по обочине, опасное сближение с пешеходами и велосипедистами, агрессивное вождение с множественными нарушениями [21]. Также планируется интеграция модуля предсказания потенциально опасных ситуаций на основе анализа траекторий движения с использованием рекуррентных нейронных сетей и трансформеров [5].

Перспективным направлением является адаптация системы для работы на периферийных вычислительных устройствах (edge computing) непосредственно на дорожных

камерах, что позволит снизить нагрузку на сеть инфраструктуру и обеспечить распределенную обработку данных. Для этого необходима дальнейшая оптимизация моделей с применением методов квантизации и прунинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен комплексный подход к автоматической детекции и классификации опасных дорожных маневров на основе анализа видеоданных с камер наблюдения с использованием современных методов компьютерного зрения и глубокого обучения. Разработанная система интегрирует модифицированную архитектуру YOLOv8n для детекции ТС, оптимизированный алгоритм Deep SORT для трекинга объектов и модуль классификации опасных маневров на основе анализа кинематических параметров движения.

Экспериментальная проверка на реальных видеозаписях продемонстрировала высокую эффективность предложенного подхода: общая точность классификации опасных маневров составила 89,3% при скорости обработки 28 кадров в секунду. Система способна детектировать четыре основных типа опасного поведения водителей: резкую смену полосы движения, опасный обгон, экстренное торможение и проезд на запрещающий сигнал светофора.

Полученные результаты подтверждают практическую применимость разработанной системы для создания подсистемы мониторинга ДД ИТС, автоматизации процесса выявления нарушений ПДД и формирования аналитических отчетов об аварийно-опасных участках дорог. Внедрение подобных систем может способствовать существенному снижению количества ДТП и повышению общего уровня БДД [24].

Перспективы дальнейших исследований включают расширение функциональности системы за счет детекции дополнительных типов опасных маневров, повышение рабочести работы в неблагоприятных погодных условиях, интеграцию модулей прогнозирования аварийных ситуаций и адаптацию системы для развертывания на периферийных вычислительных устройствах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Еремин С.В., Кущенко Л.Е., Кущенко С.В., Новиков А.Н. Повышение безопасности дорожного движения в городских агломерациях: монография. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. 158 с.

2. Road Safety Statistics for 2024: Progress continues amid persistent challenges // European Commission. 2025. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/road-safety-statistics-2024-progress-continues-amid-persistent-challenges-2025-10-17_en (дата обращения: 22.10.2025).
3. Новиков А.Н., Кущенко Л.Е., Кущенко С.В., Новиков И.А. Анализ существующих методов оценки вероятности возникновения ДТП на участках улично-дорожной сети города // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 222–231.
4. Новиков И.А., Кравченко А.А., Шевцова А.Г., Васильева В.В. Научно-методологический подход к снижению аварийности на дорогах Российской Федерации // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 3 (66). С. 58–64. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64)
5. Kushchenko L.E., Kushchenko S.V., Kravchenko A.A., Shatova J.S. Improving traffic safety and accident prediction at pedestrian crossings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913. 042060. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/4/042060](https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/4/042060)
6. Kushchenko L., Kushchenko S., Novikov A., Koroleva L. The statistical assessment of the traffic situation based on sample data of traffic accidents in the urban agglomeration // Journal of Applied Engineering Science. 2023. Vol. 21, No. 4. [Https://doi.org/10.5937/jaes0-42852](https://doi.org/10.5937/jaes0-42852)
7. Зырянов В.В., Кочерга В.Г., Поздняков М.Н. Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 1. С. 28–33.
8. Петров А.И., Евтуков С.А., Колесов В.И. Новые подходы к управлению безопасностью дорожного движения: парадигма организованности процессов обеспечения безопасности дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. 2019. №3 (66) С. 65–74. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64)
9. Debbarma T., et al. Prediction of Dangerous Driving Behaviour Based on Computer Vision and Machine Learning // Procedia Computer Science. 2024. Vol. 235. P. 783–792. [Https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.178](https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.178)
10. Zhou T., Zhang X., Chen H. A Dangerous Driving Behavior Detection Method Based on Improved YOLOv8s // Engineering Letters. 2025. Vol. 33, Issue 3. P. 721–731.
11. Luo Z., Bi Y., Yang X., Li Y., Yu S., Wu M., Ye Q. Enhanced YOLOv5s + DeepSORT method for highway vehicle speed detection and multi-sensor verification // Frontiers in Physics. 2024. Vol. 12. Article 1371320. [Https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1371320](https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1371320)
12. Ong C.S., et al. Traffic Violation Detection Using Computer Vision Techniques // Journal of Imaging. 2024. Vol. 8, No. 3. P. 1264–1278. [Https://doi.org/10.62527/joiv.8.3-2.2941](https://doi.org/10.62527/joiv.8.3-2.2941)
13. Pramanik A., et al. A real-time video surveillance system for traffic pre-events detection // Accident Analysis & Prevention. 2021. Vol. 154. Article 106068. [Https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106068](https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106068)
14. Han L., et al. Transformer-based modeling of abnormal driving events for freeway crash risk evaluation // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2024. Vol. 156. Article 104481. <Https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104481>
15. Wei Z., et al. Vision-Based Lane-Changing Behavior Detection Using Deep Learning // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2019. Vol. 4, No. 3. P. 457–467. <Https://doi.org/10.1109/TIV.2019.2934567>
16. Li R., et al. YOLO-SGC: A Dangerous Driving Behavior Detection Method Based on Enhanced YOLOv8 // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2024. <Https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3456789>
17. Гай Л.Е., Шутов А.И., Воля П.А., Кущенко С.В. Заторовые явления. Возможности предупреждения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 166–169.
18. Wang G., et al. Traffic sign detection method based on improved YOLOv8 // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 3792. <Https://doi.org/10.1038/s41598-025-03792-0>
19. Dou H., Chen S., Xu F., Liu Y., Zhao H. Analysis of vehicle and pedestrian detection effects of improved YOLOv8 model in drone-assisted urban traffic monitoring system // PLOS ONE. 2025. Vol. 20, No. 3. Article e0314817. <Https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314817>
20. Hassan O.F., et al. Real-time driver drowsiness detection using transformer architecture and transfer learning // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 2111. <Https://doi.org/10.1038/s41598-025-02111-x>
21. Зырянов В.В., Кочерга В.Г., Поздняков М.Н. Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 1. С. 28–33.
22. Wojke N., Bewley A., Paulus D. Simple online and realtime tracking with a deep association metric // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2017. P. 3645–3649. <Https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296962>
23. Печатнова Е.В., Киришин И.И., Нагорный Н.Н. Факторы дорожно-транспортной аварийности в пригородной зоне // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5 (99).

REFERENCES

1. Eremin S.V., Kushchenko L.E., Kushchenko S.V., Novikov A.N. Improving Road Traffic Safety in Urban Agglomerations: Monograph. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2024. 158 pp. (In Russ.)
2. Road Safety Statistics for 2024: Progress continues amid persistent challenges. European Commission, 2025. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/road-safety-statistics-2024-progress-continues-amid-persistent-challenges-2025-10-17_en (accessed: October 22, 2025).
3. Novikov A.N., Kushchenko L.E., Kushchenko S.V., Novikov I.A. Analysis of existing methods for assessing the probability of road traffic accidents on sections of the urban street-road network. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; no. 2 (85): 222–231. (In Russ.)

4. Novikov I.A., Kravchenko A.A., Shevtsova A.G., Vasilieva V.V. Scientific and methodological approach to reducing road accidents in the Russian Federation. *World of Transport and Technological Machines*. 2019; no. 3 (66): 58–64. (In Russ.) [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64)
5. Kushchenko L.E., Kushchenko S.V., Kravchenko A.A., Shatova J.S. Improving traffic safety and accident prediction at pedestrian crossings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. vol. 913:042060. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/4/042060](https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/4/042060).
6. Kushchenko L., Kushchenko S., Novikov A., Koroleva L. The statistical assessment of the traffic situation based on sample data of traffic accidents in the urban agglomeration. *Journal of Applied Engineering Science*. 2023; vol. 21, no. 4. [Https://doi.org/10.5937/jaes0-42852](https://doi.org/10.5937/jaes0-42852)
7. Zyryanov V.V., Kocherga V.G., Pozdnyakov M.N. Modern approaches to developing comprehensive traffic management schemes. *Transport of the Russian Federation*. 2011; no. 1: 28–33. (In Russ.)
8. Petrov A.I., Evtyukov S.A., Kolesov V.I. New approaches to road traffic safety management: the paradigm of organized safety assurance processes. *World of Transport and Technological Machines*. 2019; no. 3 (66): 65–74. (In Russ.) [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64)
9. Debbarma T., et al. Prediction of Dangerous Driving Behaviour Based on Computer Vision and Machine Learning. *Procedia Computer Science*. 2024; vol. 235: 783–792. [Https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.178](https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.178)
10. Zhou T., Zhang X., Chen H. A. Dangerous Driving Behavior Detection Method Based on Improved YOLOv8s. *Engineering Letters*. 2025; vol. 33(3): 721–731.
11. Luo Z., Bi Y., Yang, X., Li Y., Yu S., Wu M., Ye Q. Enhanced YOLOv5s + DeepSORT method for highway vehicle speed detection and multi-sensor verification. *Frontiers in Physics*. 2024; vol. 12, Article 1371320. [Https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1371320](https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1371320)
12. Ong C.S. et al. Traffic Violation Detection Using Computer Vision Techniques. *Journal of Imaging*. 2024; vol. 8(3): 1264–1278. [Https://doi.org/10.62527/jiov.8.3-2.2941](https://doi.org/10.62527/jiov.8.3-2.2941)
13. Pramanik A. et al. A real-time video surveillance system for traffic pre-events detection. *Accident Analysis & Prevention*. 2021; vol. 154, Article 106068. [Https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106068](https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106068)
14. Han L., et al. Transformer-based modeling of abnormal driving events for freeway crash risk evaluation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024; vol. 156, Article 104481. [Https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104481](https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104481)
15. Wei Z., et al. Vision-Based Lane-Changing Behavior Detection Using Deep Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2019; vol. 4(3): 457–467. [Https://doi.org/10.1109/TIV.2019.2934567](https://doi.org/10.1109/TIV.2019.2934567)
16. Li R. et al. YOLO-SGC: A Dangerous Driving Behavior Detection Method Based on Enhanced YOLOv8. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2024; [Https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3456789](https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3456789)
17. Gay L.E., Shutov A.I., Volya P.A., Kushchenko S.V. Congestion phenomena: opportunities for prevention. *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2013; no. 3: 166–169. (In Russ.)
18. Wang G. et al. Traffic sign detection method based on improved YOLOv8. *Scientific Reports*. 2025; vol. 15, Article 3792. [Https://doi.org/10.1038/s41598-025-03792-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-03792-0)
19. Dou H., Chen S., Xu F., Liu Y., Zhao H. Analysis of vehicle and pedestrian detection effects of improved YOLOv8 model in drone-assisted urban traffic monitoring system. *PLOS ONE*. 2025; vol. 20(3). Article e0314817. [Https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314817](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314817)
20. Hassan O.F. et al. Real-time driver drowsiness detection using transformer architecture and transfer learning. *Scientific Reports*. 2025; vol. 15, Article 2111. [Https://doi.org/10.1038/s41598-025-02111-x](https://doi.org/10.1038/s41598-025-02111-x)
21. Zyryanov V.V., Kocherga V.G., Pozdnyakov M.N. Modern approaches to developing comprehensive traffic management schemes. *Transport of the Russian Federation*. 2011; no. 1: 28–33. (In Russ.)
22. Wojke N., Bewley A., Paulus D. Simple online and realtime tracking with a deep association metric. In: 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). pp. 3645–3649. [Https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296962](https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296962)
23. Pechatnova E.V., Kiryushin I.I., Nagorny N.N. Factors of road traffic accident rate in the suburban area; *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)*. 2024; vol. 21, no. 5 (99). (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Новиков А.Н. Вклад в общую работу заключается в постановке цели и задач исследования, анализе результатов разработанной системы на основе современных методов компьютерного зрения и глубокого обучения.

Кущенко Л.Е. Вклад в общую работу заключается в поиске способа интеграции разработанной системы в существующую архитектуру ИТС, анализе результатов работы системы, подготовке текста статьи.

Кущенко С.В. Проведение обзора, перевод.

Улинец И.А. Разработка системы и анализ результатов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Novikov A.N. Setting the research objectives, analyzing the results of the developed system based on modern methods of computer vision and deep learning.

Kushchenko L.E. Developing methods to integrate the system proposed into the existing architecture of intelligent transport systems, analyzing the results of the system, and writing the manuscript.

Kushchenko S.V. Conducting the literature review, writing the manuscript.

Ulinets I.A. Developing the system and analyzing the data obtained.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Александр Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Сервис и ремонт машин» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева (302002, г. Орел, ул. Московская, д. 77).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7086-6278>,
Scopus ID: 57225227480,
SPIN-код: 5917-3100,
Author ID: 143921,
Researcher ID: M-4302-2017,
e-mail: novikovan57@gmail.com

Кущенко Лилия Евгеньевна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-6026>,
Scopus ID: 57193997889,
SPIN-код: 8670-0131,
Author ID: 746460,
e-mail: lily-041288@mail.ru

Кущенко Сергей Викторович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6181-5790>,
Scopus ID: 57193997343,
SPIN-код: 2824-3132,
Author ID: 970275,
e-mail: serega_ku@mail.ru

Улинец Иосиф Алексеевич – аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

SPIN-код: 5570-8680,
Author ID: 1272489,
e-mail: ulinetz.iosif@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Novikov Alexander N. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev, Head of the Department of Machine Service and Repair (77, Moskovskaya str., Orel, 302002).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7086-6278>,
Scopus ID: 57225227480,
SPIN-code: 5917-3100,
Author ID: 143921,
Researcher ID: M-4302-2017,
e-mail: novikovan57@gmail.com

Kushchenko Liliya E. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Professor of the Department of Vehicle Operation and Traffic Management (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-6026>,
Scopus ID: 57193997889,
SPIN-code: 8670-0131,
Author ID: 746460,
e-mail: lily-041288@mail.ru

Kushchenko Sergey V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, Associate Professor of the Department of Vehicle Operation and Traffic Management (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6181-5790>,
Scopus ID: 57193997343,
e-mail: serega_ku@mail.ru
Ulinets Iosif A. – Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).
e-mail: ulinetz.iosif@yandex.ru

Научная статья

УДК 656.089

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-928-939>

EDN: GMBLVG



Check for updates

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВАРИЙНОСТИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

В.С. Асламова¹ A.A. Асламов², Е.А. Пряхина¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Россия

²Ангарский государственный технический университет,
г. Ангарск, Россия

ответственный автор
aslamovav@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Выполнен обзор подходов повышения безопасности дорожного движения и применяемых для этого методов и моделей. Выявлено, что детская безопасность на дорогах остается насущной проблемой всего мирового сообщества. Отмечено, что, несмотря на значительное сокращение числа дорожно-транспортных происшествий на иркутских автомобильных дорогах, их величина по-прежнему высока, поэтому исследование динамики всех показателей и влияющих факторов следует продолжить для выяснения тенденций их изменения.

Цель проведения исследования. Моделирование тенденций изменений количества ДТП и травмируемых в ДТП участников с использованием регрессионного анализа, исследования изменений показателей ДТП и влияющих факторов на автомобильных дорогах Иркутской области за период 2019–2024 гг.

Материалы и методы. Для прогнозирования численностей ДТП и травмируемых (сумма погибших и раненых) на иркутских дорогах за 2019–2024 гг. данные статистики ГИБДД обрабатывались в пакете Statgraphics. По наибольшей величине коэффициента детерминации выбирался вид регрессионной модели. Динамика аварийности показателей дорожного травматизма иллюстрирована в MS Excel. Применились методы: системного анализа, компьютерного моделирования на основе регрессионного анализа, статистического анализа связей факторов, провоцирующих реализацию ДТП.

Результаты. Выполнен анализ дорожной аварийности в Иркутской области за 2019–2024 гг. Получены регрессионные модели численностей ДТП и травмируемых с высокими коэффициентами детерминации 99,4–99,6%, что позволяет их использовать для прогноза.

Заключение. Исследование продемонстрировало устойчивое уменьшение числа ДТП и травмируемых в нем людей, получены статистически значимые модели регрессий их динамики. Показано, что в 2024 г. произошло 88,7% ДТП вследствие нарушения ПДД водителями. В 70,32% случаев нарушили правила водители легковых автомашин (из них в 14,5% водителей были пьяны), 41% водителей-нарушителей правил были возрастом от 30 до 50 лет. В 14,5% случаев нарушили ПДД водители со стажем управления, превышающим 30 лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожно-транспортное происшествие, безопасность дорожного движения, тяжесть последствий

Статья поступила в редакцию 24.11.2025; одобрена после рецензирования 10.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Асламова В.С., Асламов А.А., Пряхина Е.А. Динамика показателей аварийности на автомобильных дорогах Иркутской области // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 928-939. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-928-939>

© Асламова В.С., Асламов А.А., Пряхина Е.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-928-939>

EDN: GMBLVG

DYNAMICS OF ACCIDENT RATES ON THE ROADS OF THE IRKUTSK REGION

Vera S. Aslamova¹ , Alexandr A. Aslamov², Elizaveta A. Pryakhina¹

¹Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russia

²Angarsk State Technical University,
Angarsk, Russia

 corresponding author
aslamovav@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. A review of approaches to improve road safety, as well as the methods and models used for this purpose, has been conducted. It has been revealed that children safety on roads remains a pressing issue for the global community. It has been noted that, despite a significant decrease in the number of traffic accidents on Irkutsk roads, their quantity is still high, and further research on the dynamics of all indicators and influencing factors is necessary to identify their changing trends.

The purpose of the study. To model tendencies in the number of road accidents and injured traffic participants with the use of regression analysis, to study changes in road accident rates and influencing factors on Irkutsk region roads for the period from 2019 to 2024.

Materials and methods. To predict the number of traffic accidents and injured people (sum of hurt and fatal) on Irkutsk roads from 2019 to 2024, traffic police statistics were processed in the Statgraphics. The type of regression model was selected based on the highest value of the determination coefficient. The dynamics of traffic accident rates and road injuries were illustrated in MS Excel. The following methods were used: system analysis, computer modeling based on regression analysis, and statistical analysis of the factors that cause traffic accidents.

Results. The analysis of road accidents in the Irkutsk region for the period from 2019 to 2024 has been performed. Regression models of the number of road accidents and injured people have been obtained with high determination coefficients of 99.4 - 99.6%, which allow them to be used for forecasting.

Conclusion. The study has demonstrated a steady decrease in the number of road accidents and the number of people injured in them, and statistically significant regression models for their dynamics have been obtained. It was shown that in 2024, 88.7% of road accidents were caused by drivers violating traffic rules. In 70.32% of cases, drivers of passenger cars violated the rules (14.5% of which were drunk). 41% of traffic offenders were between 30 and 50 years old. In 14.5% of cases, traffic violations were committed by drivers with over 30 years of driving experience.

KEYWORDS: road traffic accident, road safety, severity of consequences

The article was submitted: November 24, 2025; **approved after reviewing:** December 10, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Aslamova V.S., Aslamov A.A., Pryakhina E.A. Dynamics of accident rates on the roads of the Irkutsk region. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 928-939. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-928-939>

© Aslamova V.S., Aslamov A.A., Pryakhina E.A., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасность дорожного движения (БДД) и уменьшение дорожного травматизма – это важные темы, которые активно исследуются учеными во всем мире в следующих ключевых аспектах:

1. Инженерные решения, которые акцентируют внимание на улучшении инфраструктуры, включая проектирование дорог и состояние дорожной инфраструктуры. Обсуждаются лучшие практики в инженерии, включая создание безопасных перекрестков и дорожных знаков, использование современных технологий, таких как интеллектуальные транспортные системы. Эти меры помогают снизить вероятность реализации ДТП и минимизировать его последствия [1, 2, 3, 4].

2. Образование и просвещение, утверждающие, что обучение водителей и пешеходов безопасному поведению на дороге играет ключевую роль. Исследования показывают, что обучение существенно изменяет поведение участников дорожного движения и снижает число аварий [5, 6, 7].

3. Использование современных технологий, таких как системы автоматического торможения, адаптивный круиз-контроль, автоматизированные транспортные средства (ТС) и интеллектуальные транспортные системы, а также системы мониторинга состояния водителя [8]. Ученые отмечают, что такие технологии, включая информационные [9, 10], могут помочь предотвратить человеческие ошибки, которые часто становятся причиной ДТП.

4. Анализ данных и прогнозирование аварийности позволяет более эффективно планировать меры по повышению БДД. Приводятся примеры успешного применения аналитики больших данных в разных странах, включая использование сенсоров, GPS-данных и социальных медиа для анализа дорожной ситуации. Обсуждаются преимущества, которые могут быть достигнуты с помощью этих технологий, такие как более точное планирование инфраструктуры и улучшение реакций служб экстренной помощи [11, 12, 13].

5. Психология поведения помогает понять, как различные факторы, такие как стресс, усталость и влияние алкоголя, влияют на поведение водителей и на принятие ими решений. Обсуждаются стратегии, направленные на снижение рисков, связанных с этими факторами, включая программы обучения водителей, использование технологий, таких как системы предупреждения об усталости [14, 15]. Исследователи подчеркивают важность

учета психологических аспектов при разработке мер, в том числе профилактических, по повышению БДД.

6. Международное сотрудничество. Многие ученые подчеркивают важность международного обмена практическим опытом в сфере БДД. Совместные проекты и исследования могут привести к более эффективным решениям [16, 17, 18].

7. Перечисленные аспекты подчеркивают многообразие подходов к решению проблемы обеспечения БДД и снижения травматизма. Система обеспечения БДД имеет очень сложную структуру со множеством подсистем и элементов, ее онтология представлена в статье [19]. Указанное требует использования системного подхода при анализе ДТП.

Проблема детской БДД – одна из насущных мировых проблем современности из-за увеличения количества ТС и интенсивности дорожного движения [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28], которая требует неукоснительного внимания по следующим причинам:

1. Защита уязвимых групп. Дети – одна из самых уязвимых категорий участников дорожного движения. Их физическое и психическое развитие делает их менее способными правильно оценивать дорожные риски и принимать безопасные решения.

2. Долгосрочные последствия. Смерть или травма ребенка может иметь разрушительные последствия не только для семьи, но и для общества в целом. Потеря ребенка вызывает огромную эмоциональную боль и может нанести психологическую травму родителям.

3. Профилактика. Многие случаи детской смертности на дорогах можно предотвратить с помощью применения эффективных мер безопасности, таких как использование детских автокресел, обучение детей ПДД (правилам дорожного движения), использование светоотражающих элементов на одежде и улучшение инфраструктуры автодорог.

4. Социальная ответственность. Общество несет ответственность за создание безопасной среды для своих членов, особенно для самых уязвимых. Устранение причин детской смертности на дорогах является частью этой ответственности.

5. Экономические затраты. ДТП с участием подростков и детей приводят к значительным экономическим затратам для системы здравоохранения и общества в целом. Эти затраты можно снизить, внедряя меры БДД и программы профилактики.

6. Мировые цели. В рамках глобальных инициатив, таких как «Десятилетие действий по безопасности дорожного движения», страны стремятся сократить количество жертв на дорогах, включая детей, что является важной частью достижения устойчивого развития.

Решение проблемы детской смертности на дорогах требует комплексного подхода, включая образование, законодательство, улучшение инфраструктуры и общественное сознание. Это не только вопрос безопасности, но и вопрос справедливости и заботы о будущем.

В статье [29] проанализированы этапы развития системы БДД: создание, развитие и консолидация, которая трансформирует структуру БДД и обеспечивает повышение её надёжности и эффективности. Указывается на четкую взаимосвязь между государственной политикой и мерами, которые ориентированы по повышение БДД. Уровень дорожного травматизма создает основательные последствия для государства из-за угрозы снижения численности и здоровья его населения. На решение проблем БДД большое влияние оказывает не только наличие национальной стратегии БДД, а также существующий механизм финансирования стратегических целей, ориентированных на снижение уровня смертности.

Уменьшения количества ДТП можно достичь путем устранения факторов риска. Как утверждает Херманс с соавторами [30], в качестве фактора риска может выступать любой фактор, усугубляющий тяжесть травмы или снижающий вероятность ее получения при ДТП. Так, важным фактором риска считается поведение участников дорожного движения. Управление автомобилем пьяным водителем ВОЗ относит к одному из главных факторов риска реализации ДТП [31, 32, 33, 34]. Существенным фактором риска является состояние усталости водителя [34].

Для прогнозирования показателей и риска реализации ДТП применяются методы и модели: математической статистики: модель Пуассона на основе данных о движении и характеристиках дороги [35], негативная биномиальная модель [36] для анализа аварийности на городских дорогах, учитывая такие факторы, как плотность населения и наличие светофоров; пространственная регрессионная модель для анализа влияния различных факторов на ДТП в зависимости от их местоположения [37]; модели временных рядов, позволяющие учитывать сезонные и временные

колебания [38, 39]; логико-вероятные методы, системно-когнитивный анализ [12], модели машинного обучения, такие как деревья решений, случайные леса и нейронные сети, семантические информационные модели [40, 41, 42] и др., которые все чаще используются для прогнозирования количества ДТП. Эти модели могут обрабатывать большие объемы данных и выявлять сложные зависимости.

Об актуальности проведенного исследования свидетельствуют также данные рейтинга МВД за 6 мес. 2023 г., согласно которому Иркутская область занимала 67 место среди регионов. Фактические значения социального и транспортного риска в области существенно превышают Российские показатели в 1,29 и 1,52 раза соответственно [27]. Несмотря на отмеченное снижение показателей травматизма в 2024 г. [27] и большое число работ, посвященных БДД, анализ динамики всех показателей ДТП необходимо продолжить, чтобы выяснить тенденции их изменения.

Цель исследования: моделирование тенденций изменений количества ДТП и травмируемых в ДТП участников с использованием регрессионного анализа, исследование изменений показателей ДТП и влияющих факторов на дорогах Иркутской области за период 2019–2024 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для прогнозирования количества ДТП и травмируемых (сумма погибших и раненых) на иркутских дорогах за 2019–2024 гг. данные статистики ГИБДД обрабатывались в пакете Statgraphics. По наибольшей величине коэффициента детерминации выбирался вид регрессионной модели. Проверка статистической значимости модели позволяет определить, насколько хорошо модель аппроксимирует реальные данные. Использованы следующие ключевые критерии статистической значимости для оценки качества предсказаний по модели: коэффициент детерминации R^2 , %, показывающий, какой процент данных (или процент дисперсии зависимой переменной) объясняется регрессией; скорректированный коэффициент детерминации R^2_c , %, описывающий тесноту связи между переменными (зависимой и независимой); среднеквадратичная ошибка σ , измеряющая среднее квадратов разностей между предсказанными и фактическими (наблюдаемыми) значениями; средняя абсолютная ошибка Δ , высчитывающая среднее значение абсолютных разно-

стей между предсказанными и фактическими значениями; коэффициент Дарбина-Уотсона DW использовали для проверки автокорреляции остатков. Он измеряет, насколько остатки зависят друг от друга. Значение коэффициента варьируется от 0 до 4. Если DW стремится к 2, то это говорит об отсутствии автокорреляции; если $0 \leq DW < 2$ – положительная автокорреляция (остатки, вероятно, связаны друг с другом). При выполнении неравенства $2 < DW \leq 4$ – отрицательная автокорреляция. Тогда вычисляется новое значение коэффициента $DW = 4 - DW$. Наличие автокорреляции может указывать на проблемы в модели, такие как пропущенные переменные или неправильная спецификация модели, что может привести к неверным выводам.

Визуально рассматривался график остатков (разности между предсказанными и фактическими значениями), оценивающий предсказательную способность модели. Остатки должны быть случайными и не иметь никаких аномальных выбросов. Для большей наглядности представлялся также график сравнения предсказанных по модели значений зависимой переменной с ее наблюдаемыми значениями. По стандартным ошибкам параметров модели оценивали надежность оценок коэффициентов в регрессионной модели. Все параметры разработанных моделей значимые.

Многофакторный анализ динамики аварийности показателей ДТП выполнялся в MS Excel. Применялись методы: системного анализа, компьютерного моделирования на основе регрессионного анализа, статистического анализа связей факторов, обуславливающих реализацию ДТП и его показатели.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены основные показатели ДТП с указанием относительного изменения текущего показателя АППГ,% (аналогичный показатель предшествующего года) и вычислением тяжести последствий, % в виде отношения числа летальных исходов при ДТП к 100 травмированным tr (сумма раненых и погибших). Видно, что количество ДТП сократилось значительно, но по-прежнему остается высокой, количество раненых и погибших снизилось незначительно, немножко возросла тяжесть последствий в 2024 г.

На рисунке 1 показано изменение количества ДТП в Иркутской области на интервале 2019–2024 гг., точки – наблюдаемые значения k , линия – регрессионная модель (1), критерии статистической значимости которой приведены в таблице 2. Описание критериев дано в разделе «Материалы и методы».

$$k = \exp(8,091 - 0,180 \cdot (g - 2019) + 0,022 \cdot (g - 2019)^2). \quad (1)$$

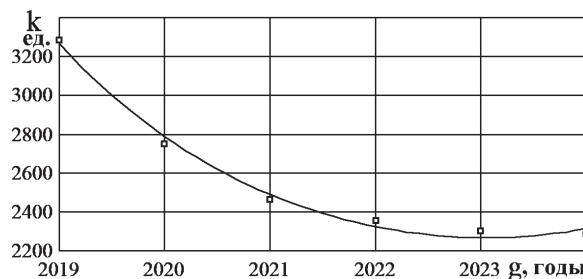


Рисунок 1 – Изменение количества ДТП
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Changes in the number of traffic accidents
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Показатели ДТП в 2023–2024 гг.
Источник: составлено авторами.

Table 1
Road accident rates in 2023 and 2024
Source: compiled by the authors.

Наименование показателя	2023 г.		2024 г.	
	Значение	АППГ,%	Значение	АППГ,%
k – количество ДТП	2959	25,54	2286	-22,74
Погибло, чел.	300	7,14	292	-2,7
Ранено, чел.	2917	-1,55	2836	-2,8
Тяжесть последствий, %	9,32		9,34	

Таблица 2
Критерии статистической значимости регрессионных моделей
Источник: составлено авторами.

Table 2
Criteria for statistical significance of regression models
Source: compiled by the authors.

Модель	$R^2, \%$	$R_c^2, \%$	DW	σ	Δ
(1) – количество ДТП, ед.	99,55	99,25	2,85	45,90	28,81
(2) – количество травмированных, чел.	99,43	99,05	2,85	51,79	32,18

На рисунке 2 для наглядности представлено сравнение значений k_p , рассчитанных по модели (1), с наблюдаемыми значениями k_h .

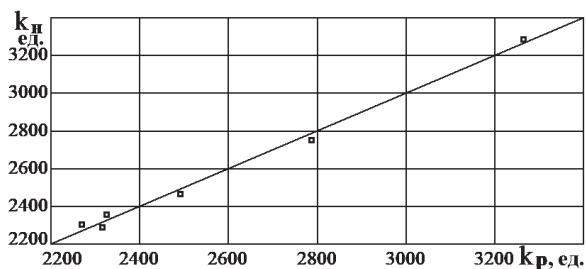


Рисунок 2 – Сравнение значений k_p , рассчитанных по модели (1), с наблюдаемыми значениями k_h
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Comparison of the values of k_p calculated using model (1) with the observed values of k_h
Source: compiled by the authors.

Изменение количества травмируемых tr описывается регрессионной моделью (2) и представлено на рисунке 3, критерии статистической значимости модели (2) приведены в таблице 2.

$$tr = \exp(8,421 - 0,210 \cdot (g - 2019)^{0,5} + 0,004 \cdot (g - 2019)^2), \quad (2)$$

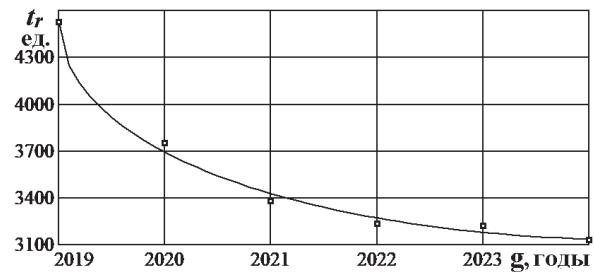


Рисунок 3 – Количество травмируемых (сумма раненых и погибших) в ДТП
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Number of injured people (sum of hurt and fatal) in road accidents
Source: compiled by the authors.

На рисунке 4 для наглядности представлено сравнение значений tr_p , рассчитанных по модели (2), с наблюдаемыми значениями tr_h .

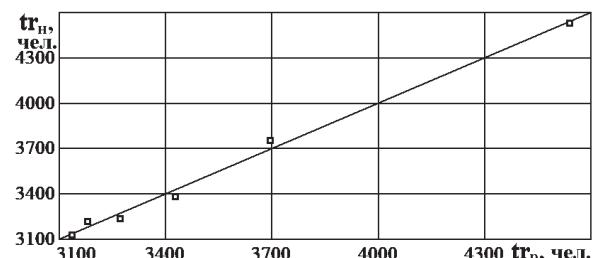


Рисунок 4 – Сравнение значений tr_p , рассчитанных по модели (2), с наблюдаемыми значениями tr_h
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Comparison of the values of tr_p calculated using model (2) with the observed values of tr_h
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Количество ДТП по видам
Источник: составлено авторами.

Table 3
Number of traffic accidents in accordance with their type
Source: compiled by the authors.

Виды ДТП:	2019	2020	2021	2022	2023	2024
при столкновениях ТС	1198	1078	999	969	1207	981
при опрокидываниях ТС	300	189	91	80	137	75
наезд на стоящее ТС	139	83	108	89	80	53
наезд на пешехода	1013	798	718	682	455	641
наезд на препятствие	194	158	125	121	119	117
наезд на велосипедиста	79	68	47	47	55	47
с падением пассажира	79	46	30	32	24	31
наезд на животное	13	17	16	16	19	16
съезд ТС с дороги	не учитывались			304	348	314
иные виды	272	314	332	17	13	11
Из-за НДУ в местах реализации ДТП	1122	1075	1129	1129	1264	1351

Изменение видов ДТП представлено в таблице 3. Следует отметить, что съезд ТС с дороги стал фиксироваться только с 2022 г. Видно, что в 2024 г. по видам ДТП лидируют по-прежнему столкновение ТС (42,9%), наезд на пешехода (28,0%), съезд ТС с дороги (13,7%). Все чаще (59,1%) в местах реализации ДТП выявлены неудовлетворительные дорожные условия (НДУ), что требует повышения качества ремонта дорог.

На рисунке 5 показано количество ДТП, в которых участвовали дети (возраст 0–15 лет) и подростки (возраст 16–18 лет). В 2024 г. произошло: 11% ДТП при перевозке детей без удерживающих устройств, 31,4% ДТП по неосторожности детей и 82,9% ДТП с подростками из-за нарушения ПДД водителями ТС. За шесть лет погибло 76 детей, 21 подросток; ранено 2277 детей, 479 подростков.

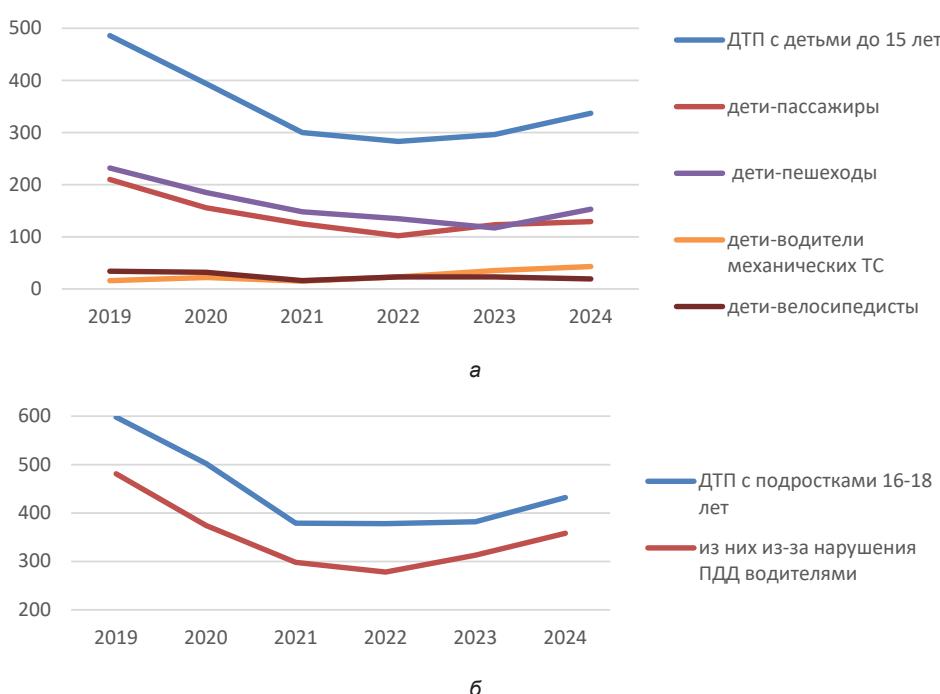


Рисунок 5 – Количество ДТП с участием детей (а) и подростков (б)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Number of road accidents involving children (a) and teenagers (b)
Source: compiled by the authors.

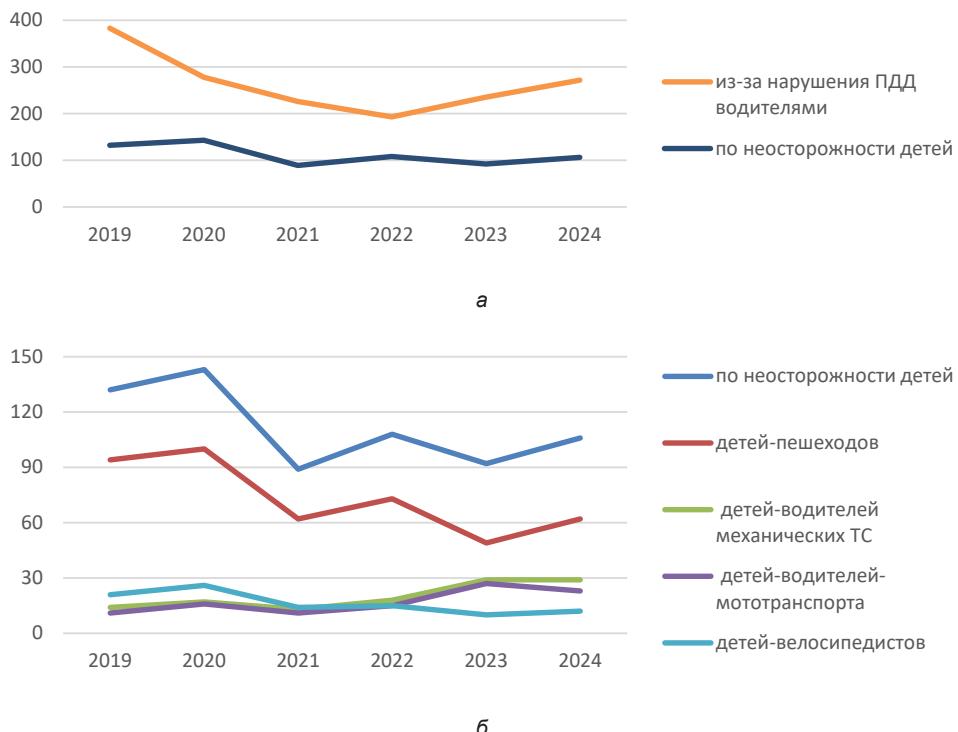


Рисунок 6 – Количество ДТП с участием детей, произошедших из-за нарушения водителями ПДД и по неосторожности детей (а) и распределение ДТП по неосторожности детей по категориям (б)
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Number of road accidents involving children caused by drivers' violations of traffic rules and due to the carelessness of children (a) and distribution of road accidents due to the carelessness of children by category (b)
Source: compiled by the authors.

На рисунке 6 показано количество ДТП при участии детей, произошедших по их неосторожности и вследствие нарушения ПДД водителями ТС.

Возникает вопрос: почему, несмотря на существенные прилагаемые усилия по обеспечению БДД, количество ДТП с участием несовершеннолетних в 2024 г. увеличилось. Частично это объясняется увеличением количества ДТП по неосторожности детей-водителей механических ТС и мототранспорта. Видимо выросло влияние ещё других, ранее не учитываемых факторов и низкой культуры поведения участников дорожного движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование динамики ДТП в Иркутской области позволило получить значимые результаты, которые формируют целостную картину состояния БДД в регионе:

– выявлено устойчивое снижение общего количества ДТП на дорогах, что свидетель-

ствует об эффективности реализуемых мер по повышению БДД;

– новые разработанные регрессионные модели динамики ДТП и числа травмированных участников движения демонстрируют высокую прогностическую способность (коэффициенты детерминации 99,4–99,6%), что подтверждает их научную и практическую значимость;

– анализ причин ДТП показал, что 88,7% всех происшествий в 2024 г. произошло по вине водителей, при этом: 70,32% случаев связаны с нарушениями ПДД водителями легковых автомобилей; в 14,5% случаев нарушения совершались нетрезвыми водителями; 41% нарушителей ПДД находились в возрастном диапазоне 30–50 лет; 14,5% нарушителей имели стаж вождения более 30 лет;

– установлено, что структура ДТП по видам происшествий характеризуется преобладанием: столкновений ТС (42,9%), наездов на пешеходов (28%), съездов ТС с дороги (13,7%);

– выявлено значительное влияние состояния улично-дорожной сети на БДД: 59,1% ДТП произошло из-за недостатков в содержании дорог.

Практические рекомендации:

– усилить работу по профилактике нарушений ПДД среди водителей со стажем более 30 лет, так как они демонстрируют снижение бдительности;

– особое внимание уделить контролю за соблюдением ПДД в возрастной группе 30–50 лет, составляющей основную долю нарушителей;

– разработать комплекс мер по улучшению содержания и эксплуатации улично-дорожной сети;

– усилить профилактическую работу по предотвращению управления ТС в состоянии алкогольного опьянения.

Полученные результаты исследования могут быть использованы для совершенствования системы управления БДД и разработки целевых программ по снижению аварийности на автодорогах Иркутской области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллов В.В., Романов А.С. Инженерные решения для повышения безопасности дорожного движения // Транспортное строительство. 2019. № 4. С. 12–18.
2. Kumar A., Sharma R. Engineering Solutions for Traffic Management: A Case Study Approach. International Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2020. 9(2): 45-53.
3. Shinar D. Road Safety and the Role of Infrastructure. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2016. 39: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.01.004>
4. Куракина Е.В., Склярова А.А. Повышение уровня безопасности дорожного движения в системе «участник дорожного движения – транспортное средство – дорога – внешняя среда» // Вестник СибАДИ. 2020; 17 (4): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499>.
5. Смирнова И.А. Образование в области безопасности дорожного движения: новые подходы и методы // Современные проблемы науки и образования. 2021. № 3. С. 22–28.
6. Davis R., Kearney A. Education and Awareness Programs in Traffic Safety: A Comparative Study. Journal of Safety Research. . 2018. 67: 123-130.
7. Shinar D. Road Safety and Human Behavior. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2007.10(3): 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2007.01.002>
8. Van der Laan, A.M.K.T.Z. Technological Innovations in Road Safety: A Review. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2018. 57: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.05.002>
9. Петров С.Н. Использование информационных технологий для управления дорожным движением // Научный вестник МГТУ. 2020. № 5: 34–40.
10. Zhang Y., Li J. The Role of Information Technology in Traffic Safety Management. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. . 2019.105: 1-12.
11. Иванов Д.И. Анализ данных о дорожно-транспортных происшествиях: методы и подходы // Анализ и профилактика несчастных случаев. 2022. № 50(1): 15–22.
12. Smith J., Brown T. Data Analysis and Prediction in Traffic Accident Research: A Machine Learning Approach. Accident Analysis & Prevention.2021. 150: 105-112.
13. de Oliveira J.C. Big Data Analytics for Road Safety Improvement. Transportation Research Procedia.2019. 45: 123-132. <Https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.01.015>
14. Regan M.A. Behavioral Factors in Road Safety: A Psychological Perspective. Accident Analysis & Prevention.2018. 120: 123-130. <Https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.08.001>
15. Чванов В.В. Методы оценки и повышения безопасности дорожного движения с учетом условий работы водителя. М.: ИНФРА-М, 2010. 416 с.
16. Николаев А.В. Международное сотрудничество в области безопасности дорожного движения: опыт и перспективы. Международные отношения. 2021. № 2: 78–85.
17. Müller M., Schmidt K. International Collaboration in Road Safety Research: Challenges and Opportunities. Journal of Transport Safety & Security.2020. 12(4): 345-360.
18. Van der Horst, P.J.W.F. International Collaboration in Road Safety: Sharing Best Practices. Journal of Transport and Health. 2021. 20: 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.100110>
19. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А., Асламова Е.А. Системный анализ травматизма с участием детей на российских автомобильных дорогах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 2 (70): 189–199. [Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.2\(70\).189-199](Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.2(70).189-199)
20. Летягина Е.Н., Кучеров А.С. Дорожно-транспортная безопасность на дорогах России // Теория и практика мировой науки. 2020. № 12: 30–34.
21. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А. Прогнозные модели травматизма с участием подростков на автомобильных дорогах общего пользования // Математические методы в технике и технологиях. 2021. № 1: 174–177.
22. Асламова В.С., Мелентьева А.А., Асламов А.А. Анализ статистики показателей дорожного травматизма за 2021 и 2022 гг. в Иркутском регионе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1(77): 194–20. [Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.1\(77\).194-206](Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.1(77).194-206)
23. Асламова В.С., Минко А.А., Асламов А.А. Регрессионные модели травматизма на автомо-

- бильных дорогах России // Образование – Наука – Производство : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2020. Т. 2. С. 109–113.
24. Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А. Анализ показателей травматизма в 2020 и 2021 гг. на иркутских автодорогах общего пользования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 2 (74): 188–201. [Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2\(74\).188-201](Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2(74).188-201)
25. Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А. Анализ показателей травматизма на федеральных автомобильных дорогах Иркутской области и их трендов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 1 (73): 75–85. [Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.1\(73\).75-85](Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.1(73).75-85)
26. Асламова В.С., Кузнецова П.А., Асламов А.А. Сравнительный анализ дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области и России // Вестн. Ангар. гос. техн. ун-та. 2021. № 15: 127–130.
27. Асламова В.С., Асламов А.А., Шуткин А.А. Сопоставительный анализ показателей травматизма на автодорогах Иркутского региона в 2022 и 2023 гг. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4(78): 54–66. [Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.2\(78\).54-66](Https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.2(78).54-66)
28. Малолеткина Н.С., Королева К.А. Детский дорожно-транспортный травматизм: причины в России и зарубежный опыт профилактики // Уголовно-исполнительное право. 2022. Т. 17(1–4), № 1: 85–90. [Https://doi.org/10.33463/2687-122X.2022.17\(1-4\).1.085-090](Https://doi.org/10.33463/2687-122X.2022.17(1-4).1.085-090)
29. Sakhapov R., Nikolaeva R. Traffic Safety System Management. In Proceedings of the Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities.2018. (SPbOTSC 2018).
30. Hermans E., Brijs T., Wets G., Vanhoof K. Benchmarking road safety. Lessons to learn from a data envelopment analysis. Accident Analysis & Prevention. 2009. 41 (1): 174–182. <Https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.10.010>
31. Зейналов Ф.Н. К вопросу реализации основных направлений Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы // Право и политика. 2019. № 10. С. 40–58.
32. Баканов К.С., Бурцев А.А. Предупреждение фактов управления транспортным средством в состоянии опьянения на этапах получения, приостановления, прекращения и возобновления права на управление транспортным средством: монография. М.: ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2021. 149 с.
33. Конорев Д.В., Сафонова Н.Л. Основные поведенческие реакции водителя, приводящие к дорожно-транспортным происшествиям // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, посвященной проведению в РФ Года науки и технологий в 2021 году и 55-летию учебного заведения. Иваново, 2021. С. 543–54.
34. Попов А.В., Суркаев А.Л., Моисеев Ю.И. К вопросу о диагностировании состояния утомления водителя транспортного средства // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XII Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2019. Т. 2. С. 175–182.
35. Lord D. Manner F. "The Statistical Analysis of Crash Frequency Data: A Review and Assessment of Methodologies". Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2010.
36. Miaou S.-P. Title: The Relationship between Truck Accidents and Traffic Flow Journal: Transportation Research Part A: Policy and Practice. 1994 Vol.: 28(5): 293-303 [Https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90003-0](Https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90003-0)
37. Anselin LTitle: Spatial Econometrics: Methods and Models Publisher: Springer.1988.
38. Ларионов К.О. Прогнозирование статистических данных автомобильных дорожно-транспортных происшествий. <Https://ipi1.ru/images/PDF/2021/163/prognozirovanie-statisticheskikh.pdf>.
39. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Title: Forecasting: Principles and Practice Publisher: OTexts.2018. URL: <Https://otexts.com/fpp3/>.
40. Скоробогатченко Д.А., Ерохин А.В. Нечеткая нейросетевая модель для прогнозирования числа ДТП региона в условиях ограниченной информации. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2014. С. 174–181.
41. Borkowski P., & Kaczmarek K. Application of Machine Learning Techniques for Road Traffic Accident Prediction. Transportation Research Procedia.2020.
42. Луценко Е.В., Коржаков В.Е. Адаптивная семантическая информационная модель прогнозирования рисков совершения ДТП. Майкоп: Адыгейский государственный университет (Майкоп), 2008. С. 55–59.

REFERENCES

1. Kirillov V.V., Romanov A.S. Engineering solutions for improving road safety. *Transport construction*. 2019, no. 4, pp. 12-18. (in Russ.)
2. Kumar A. Sharma R. Engineering Solutions for Traffic Management: A Case Study Approach. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*.2020; 9(2): 45-53.
3. Shinar D. Road Safety and the Role of Infrastructure. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2016; 39: 1-12. <Https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.01.004>
4. Kurakina E.V., Sklyarova A.A. Road safety improvement in road traffic participant – vehicle – road – external environment system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (4): . (in Russ.)
5. <Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499>
6. Smirnova I.A. Road safety education: new approaches and methods. *Modern problems of science and education*. 2021. No. 3: 22-28. (in Russ.)
7. Davis R. Kearney A. Education and Awareness Programs in Traffic Safety: A Comparative Study. *Journal of Safety Research*.2018; 67: 123-130.

8. Shinar D. Road Safety and Human Behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour.* 2007;10(3): 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2007.01.002>
9. Van der Laan A.M.K.T.Z. Technological Innovations in Road Safety: A Review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour.* 2018; 57: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.05.002>
10. Petrov S.N. Use of information technologies for traffic management. *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University.* 2020; no. 5: 34-40. (in Russ.)
11. Zhang Y. Li J. The Role of Information Technology in Traffic Safety Management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* 2019; 105: 1-12.
12. Ivanov D.I. Analysis of data on road traffic accidents: methods and approaches. *Analysis and prevention of accidents.* 2022; no. 50(1): 15-22. (in Russ.)
13. Smith J. Brown T. Data Analysis and Prediction in Traffic Accident Research: A Machine Learning Approach. *Accident Analysis & Prevention.* 2021; 150: 105-112.
14. de Oliveira J.C. Big Data Analytics for Road Safety Improvement. *Transportation Research Procedia.* 2019; 45: 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.01.015>
15. Regan M.A. Behavioral Factors in Road Safety: A Psychological Perspective. *Accident Analysis & Prevention.* 2018; 120: 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.08.001>
16. Chvanov V.V. Methods of assessing and improving road safety taking into account the driver's working conditions. Moscow: INFRA-M. 2010; 416 p. (Scientific Thought). (in Russ.)
17. Nikolaev A.V. International cooperation in the field of road safety: experience and prospects. *International relations.* 2021; no. 2: 78-85. (in Russ.)
18. Müller M. Schmidt K. International Collaboration in Road Safety Research: Challenges and Opportunities. *Journal of Transport Safety & Security.* 2020; 12(4): 345-360.
19. van der Horst P.J.W.F. International Collaboration in Road Safety: Sharing Best Practices. *Journal of Transport and Health.* 2021; 20: 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.100110>
20. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A., Aslamova E.A. System analysis of injuries involving children on Russian roads. *Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2021; no. 2 (70): 189-199. (in Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.2\(70\).189-199](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.2(70).189-199)
21. Letyagina E.N., Kucherov A.S. Road safety on Russian roads. *Theory and practice of world science.* 2020; no. 12: 30-34. (in Russ.)
22. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Predictive models of injuries involving adolescents on public roads. *Mathematical methods in engineering and technology.* 2021; no. 1: 174-177. (in Russ.)
23. Aslamova V.S., Melentyeva A.A., Aslamov A.A. Analysis of statistics on road injury rates for 2021 and 2022 in the Irkutsk region. *Modern technologies. Systems analysis. Modeling.* 2023; no. 1(77): 194-20. (in Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.1\(77\).194-20](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.1(77).194-20)
24. Aslamova V.S., Minko A.A., Aslamov A.A. Regression models of injuries on Russian roads. *Education – Science – Production: materials of the IV All-Russian scientific and practical conference Chita.* 2020; vol. 2: 109–113. (in Russ.)
25. Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A. Analysis of injury rates in 2020 and 2021 on public roads in Irkutsk. *Modern technologies. Systems analysis. Modeling.* 2022; no. 2(74): 188–201. (in Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2\(74\).188-201](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2(74).188-201)
26. Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A. Analysis of injury rates on federal highways of the Irkutsk region and their trends. *Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2022; no. 1(73): 75–85. (in Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.1\(73\).75-85](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.1(73).75-85)
27. Aslamova V.S., Kuznetsova P.A., Aslamov A.A. Comparative analysis of road accidents in the Irkutsk region and Russia. *Vestn. Angar. state tech. univ..* 2021; no. 15: 127–130. (in Russ.)
28. Aslamova V.S., Aslamov A.A., Shutkin A.A. Comparative analysis of injury rates on the roads of the Irkutsk region in 2022 and 2023. *Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2024; no. 4(78): 54-66. (in Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.2\(78\).54-66](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.2(78).54-66)
29. Maloletkina N.S., Koroleva K.A. Child road traffic injuries: causes in Russia and foreign experience of prevention. *Criminal-executive law.* 2022; vol. 17(1–4), no. 1: 85–90. [https://doi.org/10.33463/2687-122X.2022.17 \(1–4\). 1.085-090](https://doi.org/10.33463/2687-122X.2022.17 (1–4). 1.085-090).
30. Sakhapov R., Nikolaeva, R. Traffic Safety System Management. In Proceedings of the Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities. 2018; (SPbOTSC 2018).
31. Hermans E., Brijs T., Wets G., Vanhoof K. Benchmarking road safety. Lessons to learn from a data envelopment analysis. *Accident Analysis & Prevention.* 2009; 41 (1): 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.10.010>
32. Zeynalov F.N. On the issue of implementing the main directions of the Road Safety Strategy in the Russian Federation for 2018 – 2024. *Law and Politics.* 2019; no. 10: 40–58. (in Russ.)
33. Bakanov K.S., Burtsev A.A. Prevention of facts of driving a vehicle while intoxicated at the stages of obtaining, suspension, termination and renewal of the right to drive a vehicle: monograph. Moscow: Federal State Institution "National Center for Traffic Safety of the Ministry of Internal Affairs of Russia". 2021; 149 p. (in Russ.)
34. Konorev D.V., Safonova N.L. The main behavioral reactions of the driver leading to road accidents. Fire and emergency safety: collection of materials of the XVI International scientific and practical conference dedicated to the Year of Science and Technology in the Russian Federation in 2021 and the 55th anniversary

of the educational institution. Ivanovo. 2021; pp. 543-54. (in Russ.)

35. Popov A.V., Surkaev A.L., Moiseev Yu.I. On the issue of diagnosing the state of fatigue of a vehicle driver. Organization and safety of road traffic: materials of the XII National scientific and practical conference with international participation. Tyumen: Publishing house of Tyumen University. 2019; vol. 2, pp: 175–182. (in Russ.)

36. Lord, D. Mannering, F. The Statistical Analysis of Crash Frequency Data: A Review and Assessment of Methodologies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.2010;

37. Miaou S.-P. Title: The Relationship between Truck Accidents and Traffic Flow Journal:*Transportation Research Part A: Policy and Practice*.1994; Vol.: 28 (5): 293-303 [Https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90003-0)

38. Anselin, L. Title: Spatial Econometrics: Methods and Models Publisher: Springer.1988;

39. Larionov K.O. Forecasting statistical data on road traffic accidents: <https://ipi1.ru/images/PDF/2021/163/prognozirovaniye-statisticheskikh.pdf>. (in Russ.)

40. Hyndman, R.J., Athanasopoulos, G. Title: Forecasting: Principles and Practice Publisher: OTexts.: 2018; <https://otexts.com/fpp3/>.

41. Skorobogatchenko D.A., Erokhin A.V. Fuzzy neural network model for forecasting the number of road accidents in a region under conditions of limited information. Volgograd: Publisher: Volgograd State Technical University. 2014; pp. 174-181. (In Russ.)

42. Borkowski P., Kaczmarek K. Application of Machine Learning Techniques for Road Traffic Accident Prediction".*Transportation Research Procedia*. 2020;

43. Lutsenko E.V., Korzhakov V.E. Adaptive semantic information model for predicting the risks of road accidents. Maykop: Publisher: Adygea State University (Maikop). 2008; P. 55-59. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Асламова В.С. Формирование направления, цели и задач исследования, теоретических положений; подготовка обзора трудов отечественных и зарубежных ученых по обеспечению безопасности дорожного движения; анализ результатов статистических данных, написание статьи.

Асламов А.А. Моделирование в пакете Statgraphics, оформление рисунков, обсуждение статьи.

Пряхина Е.А. Сбор и обработка статистических данных.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aslamova V.S. Formation of the research direction, purpose and objectives of the study, theoretical principles; review of domestic and foreign scientific works on ensuring road safety; analysis of statistical data results, writing the article.

Aslamov A.A. Modeling in Statgraphics, design of figures, article discussion.

Pryakhina E.A. Collection and processing of statistical data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Асламова Вера Сергеевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Техносферная безопасность» Иркутского государственного университета путей сообщения (664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3306-0651>,

Scopus ID: 683194,

Researcher ID: ABG-8723-2021,

SPIN-код: 3063-0626,

e-mail: aslamovav@yandex.ru

Асламов Александр Анатольевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Машины и аппараты химических производств» Ангарского государственного технического университета (665835, г. Ангарск, квартал 85а, д.5)

Scopus ID: 504134,

SPIN-код: 7550-9381,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6548-8848>,

e-mail: aaa_mx@angtu.ru

Пряхина Елизавета Александровна – бакалавр по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» Иркутского государственного университета путей сообщения.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aslamova Vera S. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University (15, Chernyshevsky Street, Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3306-0651>,

SPIN-code: 3063-0626,

Scopus ID: 683194,

Researcher ID: ABG-8723-2021,

e-mail: aslamovav@yandex.ru

Aslamov Aleksandr A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Machines and Apparatus for Chemical Production Department, Angarsk State Technical University (Building 5, Block 85a, Angarsk, Irkutsk Oblast, 665835).

Scopus ID: 504134,

SPIN-code: 7550-9381,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6548-8848>,

e-mail: aaa_mx@angtu.ru

Pryakhina Elizaveta A. – Bachelor's degree in the program 20.03.01 "Technosphere Safety", Irkutsk State Transport University (15, Chernyshevsky Street, Irkutsk, 664074).

Научная статья

УДК 656.1:004.8

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-940-951>

EDN: YKUNTI



Check for updates

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ПРИМЕРЕ Г. КАЗАНИ

P.P. Загидуллин

Казанский (Приэволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается проблема повышения эффективности и безопасности городских транспортных систем за счет внедрения динамического управления скоростью движения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью адаптации параметров движения к изменяющимся дорожным и погодным условиям в реальном времени. Работа анализирует эволюцию от классических систем управления дорожным движением к усовершенствованным системам (УСУДД), интегрированным в интеллектуальные транспортные системы (ИТС). Особое внимание уделяется методам динамического управления скоростью с использованием табло переменной информации (ТПИ) и перспективам внедрения коммуникационных технологий «инфраструктура – транспортное средство» (V2I).

Материалы и методы. Основным методом исследования является имитационное моделирование в Aimsun на примере улично-дорожной сети г. Казани. Было разработано 12 стратегий зонального регулирования скорости (от 20 до 80 км/ч) и проведен их сравнительный анализ методами мезо- и микромоделирования для утреннего пикового периода.

Результаты. Результаты показали, что дифференцированное управление эффективно влияет на параметры потока. Наилучшие результаты продемонстрировала Стратегия С3 (ограничения 80, 60, 60 км/ч по зонам), обеспечив минимальные общие затраты времени (769 253 сек), максимальную среднюю скорость (35,33 км/ч) и пропускную способность (35 566,5 ТС/ч). Стратегии с равномерно низкими ограничениями ухудшили все показатели.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование подтверждает высокую эффективность динамического зонального управления скоростью для оптимизации транспортных потоков в городских условиях. Установлено, что дифференцированное регулирование (а не единое жесткое ограничение) позволяет находить баланс между пропускной способностью, скоростью движения и уровнем загрузки сети. Наилучшие результаты показала Стратегия С3, предполагающая относительно высокие допустимые скорости на магистральных направлениях. В перспективе повышения эффективности управления связано с интеграцией технологий V2I, позволяющих реализовать индивидуальное и непрерывное регулирование скорости для каждого транспортного средства, что приведет к дальнейшей гармонизации транспортного потока и повышению безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамическое управление скоростью, транспортный поток, интеллектуальные транспортные системы, имитационное моделирование, Aimsun, усовершенствованная система управления дорожным движением, табло переменной информации, городская транспортная сеть, пропускная способность, зональное регулирование

Статья поступила в редакцию 13.11.2025; одобрена после рецензирования 15.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Загидуллин Р.Р. Повышение эффективности дорожного движения динамическим управлением скоростью движения транспортных средств на примере г. Казани // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 940-951. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-940-951>

© Загидуллин Р.Р., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-940-951>

EDN: YKUNTI

IMPROVING TRAFFIC EFFICIENCY THROUGH DYNAMIC TRAFFIC SPEED CONTROL (KAZAN CASE STUDY)

Ramil R. Zagidullin

Kazan Federal University,
Kazan, Russia

ANNOTATION

Introduction. The article discusses the problem of improving the efficiency and safety of urban transport systems through the introduction of dynamic speed control. The relevance of the study is due to the need to adapt traffic parameters in real time to changing road and weather conditions. The work analyzes the evolution from classical traffic control systems to advanced systems integrated into intelligent transport systems (ITS). Particular attention is paid to dynamic speed control methods using variable information display (VMI) and the prospects for the introduction of infrastructure-vehicle (V2I) communication technologies.

Materials and methods. The main research method is simulation modeling in Aimsun using the example of the Kazan street and road network. 12 strategies for zonal speed control (from 20 to 80 km/h) were developed and their comparative analysis was carried out by means of meso- and micromodeling methods for the morning peak period.

Results. It has been shown that differentiated control has an effective impact on the flow parameters. The best results were demonstrated by the C3 Strategy (limits of 80, 60, 60 km/h by zone), ensuring the minimum total time spent (769,253 seconds), maximum average speed (35.33 km/h) and throughput (35,566.5 T/h). Strategies with uniformly low constraints resulted in deteriorated indicators.

Discussion and conclusion. The conducted research confirms the high efficiency of dynamic zonal speed control for optimizing traffic flows in urban conditions. It has been established that differentiated regulation (rather than a single strict restriction) makes it possible to find a balance between bandwidth, speed of movement and the level of network load. The best results have been shown by the C3 Strategy, which assumes relatively high speed limits on main routes. Further research will provide increased control efficiency associated with the integration of V2I technologies to allow for individual and continuous speed control for each vehicle, which will lead to further harmonization of traffic flow and increased safety.

KEYWORDS: dynamic speed control, traffic flow, intelligent transport systems, simulation modeling, Aimsun, advanced traffic management system, variable information display, urban transport network, capacity, zonal regulation

The article was submitted: November 13, 2025; **approved after reviewing:** December 16, 2025; **accepted for publication:** December 19, 2025.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Zagidullin R.R. Improving traffic efficiency through dynamic traffic speed control (Kazan case study). *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 940-951. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-22-6-940-951>

© Zagidullin Ramil R., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Рост интенсивности городского движения требует внедрения интеллектуальных систем для повышения безопасности и эффективности транспортных потоков [1, 3, 4]. Одним из ключевых инструментов такой оптимизации является динамическое управление скоростью, адаптирующее режим движения к реальным дорожным условиям [2, 5]. В статье исследуется эффективность различных стратегий зонального регулирования скорости в городской среде на примере сети г. Казани. Цель работы – оценить влияние дифференцированных ограничений скорости на ключевые параметры транспортного потока в пиковый период. Гипотеза исследования – дифференцированное регулирование дорожного движения эффективнее равномерного. Методологической основой исследования выступает имитационное моделирование с использованием программного комплекса Aimsun. Полученные результаты обосновывают практическую значимость внедрения подобных систем в структуру усовершенствованного управления дорожным движением (УСУДД).

В соответствии с общей схемой ИТС включают в себя систему управления и мониторинга, именуемую УСУДД, и систему информирования для пользователей, называемую сокращенно УСИУД (усовершенствованная система информирования участников движения).

Системе УСУДД переданы функции динамического управления характеристикаами элементов дорожно-транспортной ситуации и их мониторинга, а «передовой» характер системы обусловлен ее способностью оперировать данными, полученными в реальном времени, адаптированными с помощью оперативно выполненных расчетов по заранее определенным критериям [6, 7].

Хотя в данном случае речь идет больше о дорожной составляющей, необходимо отметить, насколько целесообразно сегодня начинать замену концепции системы дорожного регулирования на концепцию усовершенствованной системы управления мобильностью (УСУМ), которая объединяет в себе данные мониторинга различных транспортных систем и данные, получаемые от пользователей системы УСИУД, способствует оптимизации смешанных перевозок посредством управления пересадочными узлами, в интегрированной форме обеспечивает динамический контроль многофункциональной системы путем

введения «кредитов мобильности», быстрой оплаты проезда с учетом пробок, регулирования движения на выделенных полосах и регулируемых перекрестках, управления въездами в черту города.

Система УСУДД (рисунок 1), в свою очередь, состоит из трех подсистем:

- системы мониторинга;
- системы поддержки принятия решения;
- системы управления.

Система мониторинга, которая может существовать и независимо от установки системы УСУДД, была описана нами в предыдущих главах, где мы проанализировали работу датчиков движения, методы диагностики и прогнозирования, заложенные в функции системы наблюдения [8, 9].

Система УСУДД характеризуется и отличается от обычной системы наблюдения более точным использованием элементов «познавательных способностей» системы и возможностью применять стратегии вмешательства в ситуацию. Действительно, система мониторинга через сеть размещенных датчиков получает информацию об окружающей среде и посредством системы наблюдения применяет простую обработку данных, которые в реальном времени подают информационно-интеллектуальный импульс приложениям ИТС. В то время как система УСУДД основывается на более сложной системе поддержки принятия решений, которая посредством включения имитационной модели способна оценить совокупность стратегий регулирования и позволяет быстро выбрать из них оптимальную стратегию, задействованную через систему регулирования. Этот выбор может быть применен как в автоматическом режиме, так и с помощью оператора, который, в свою очередь, сможет удостовериться в соответствии выбранного решения политике действий, заданной руководящей организацией.

Следует уточнить, что общая схема систем ИТС, проиллюстрированная на рисунке 1, относится к классической системе управления, в основе которой цепь «датчики – обработка данных – исполнительные механизмы», она подсказывает использование того или иного инструмента автоматического регулирования режима системы. В высокотехнологичной системе управления движением, и тем более при контроле за его динамикой, на самом деле регулирование никогда не бывает полностью автоматическим, поскольку его целиевой основой является передача указания пользователю.

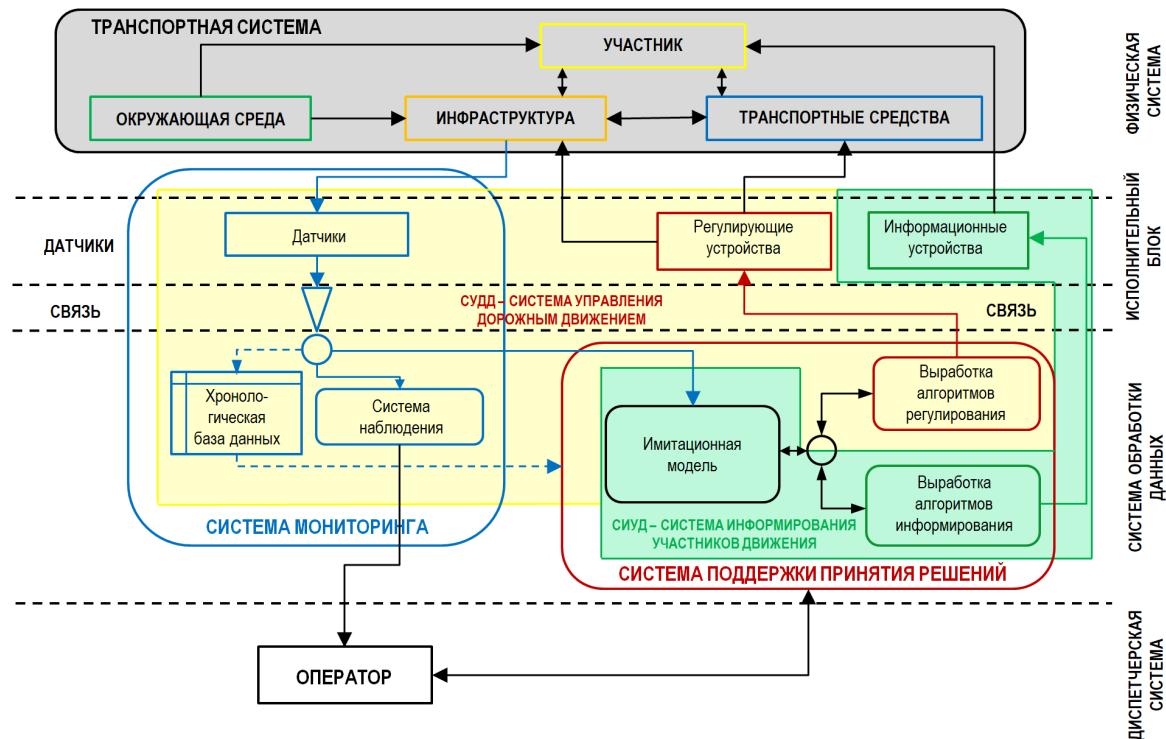


Рисунок 1 – Усовершенствованная система управления движением автотранспорта (УСУДД) в общей схеме ИТС
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Improved traffic control system within ITS
Source: compiled by the author.

При традиционном управлении движением автотранспорта, например регулировании посредством светофоров, такая передача указаний, или индикация, носит характер предписания, а случаи неуважительного отношения к индикации случаются редко, а если и бывают, то это можно принять за недостатки в работе системы [14]. Однако существуют и менее жесткие приемы в управлении мобильностью, основанные на применении своего рода экономического рычага, такого как динамическое взимание платы за проезд по загруженной автодороге, в котором автоматизм регулирования еще более ослаблен, поскольку в нем используются альтернативные атрибуты, оказывающие воздействие на водителя. Здесь действие непрямолинейно, и его эффект воздействия логически следует из всего набора решений, принимаемых пользователями, а их результирующая может быть оценена чисто статистически; как бы там ни было, схема контроля может сводиться и к регулированию

по замкнутому циклу, так как оплата за проезд транспорта варьируется с учетом загруженности дорог, а уровень их загруженности зависит от выбора водителей, на который, в свою очередь, как раз и влияет величина взимаемого сбора.

Динамическое управление скоростью может осуществляться с применением табло переменной информации (ТПИ), которые размещаются на обочинах дорог (со знаками ограничения скорости), или с помощью встроенных в автомобиль устройств, которые передают водителю информацию о том, какой скорости следует придерживаться (динамические ограничители скорости), или путем непосредственного регулирования скорости ТС, используя автомат постоянной скорости (так называемый совместный автоматический контроль скорости) [10, 11, 12, 13]. Этот последний из перечисленных типов управления с точки зрения технологичности входит в число передовых систем помощи при вождении (так

называемая система ADAS). Поэтому в данном разделе мы рассмотрим первые два типа средств непрямого (косвенного) управления скоростью и то, как они влияют на ситуацию на дороге, имея в виду, что движение по ней продолжает совершаться в независимой форме (свободная манера управления ТС, свободно образующийся транспортный поток, свободный выбор скорости движения).

К тому же ограничение скорости может иметь еще запретительную (предписывающее регулирование) и рекомендательную (косвенное, информационное регулирование) функции.

Введение варьирующихся ограничений скорости позволяет адаптировать этот параметр дорожного движения к условиям окружающей среды таким образом, чтобы восстановить желаемые условия безопасности движения даже в неблагоприятных погодных условиях, таких как снег, дождь и туман. Система мониторинга должна, очевидно, включать в себя датчики, реагирующие на состояние окружающей среды, и в первую очередь датчики, фиксирующие видимость на дороге и интенсивность выпадающих осадков.

Получение данных о дорожной ситуации, собранных детально и с достаточно высокой точностью, позволяет адаптировать ограничения скорости к дорожной обстановке. В жизни эту задачу самостоятельно решает для себя каждый отдельно взятый водитель, регулируя скорость своего ТС таким образом, чтобы поддерживать нужную дистанцию от впереди идущего автомобиля, которая в его понимании и при той скорости будет не меньше тормозного пути его автомашины в случае экстренного торможения.

У каждого водителя, впрочем, свое понимание степени безопасности, к тому же оно может весьма широко меняться в зависимости от его психофизических особенностей и состояния, и водитель может оценить дистанцию до впереди идущего автомобиля и относительную скорость, не учитывая при этом погрешности оценки, а пределы такой погрешности тоже меняются от одного водителя к другому.

Более эффективное регулирование в ближайшем будущем может быть осуществлено с использованием двунаправленных коммуникационных систем взаимной связи между инфраструктурой и ТС (называемых в современной технической литературе V2I или Vehicle to Infrastructure), которые позволяют системе управления определять скорость каждого отдельного ТС, рассчитывать оптимальную скорость в зависимости от дистанции, отделяю-

щей данный автомобиль от впереди идущего, набранную скорость, характер дорожной обстановки, рабочие параметры автомобиля и условия окружающей среды и передавать все это водителю автомобиля с помощью встроенных средств связи [2].

Бортовая двунаправленная коммуникационная система осуществляет таким образом индивидуальный и почти непрерывный контроль во времени и в пространстве. Разнородность движения может постепенно сглаживаться, и поведение транспортного потока (без учета совершаемых маневров для обгона) будет аналогичным движению ТС по автоматической магистрали.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Программа имитационного моделирования Aimsun позволила создать модель улично-дорожной сети с применением технологий подключенной мобильности по схеме деления территории г. Казани на 3 зоны (рисунок 2) с различными комбинациями регулирования скоростного режима по ним, от 80 до 20 км/ч с интервалом в 20 км/ч, учитывающий нормативный коэффициент безопасности, получилось 12 стратегий:

- С1: зеленая – 80 км/ч; розовая – 80 км/ч; красная – 80 км/ч.
- С2: зеленая – 80 км/ч; розовая – 80 км/ч; красная – 60 км/ч.
- С3: зеленая – 80 км/ч; розовая – 60 км/ч; красная – 60 км/ч.
- С4: зеленая – 80 км/ч; розовая – 60 км/ч; красная – 40 км/ч.
- С5: зеленая – 60 км/ч; розовая – 60 км/ч; красная – 60 км/ч.
- С6: зеленая – 60 км/ч; розовая – 60 км/ч; красная – 40 км/ч.
- С7: зеленая – 60 км/ч; розовая – 40 км/ч; красная – 40 км/ч.
- С8: зеленая – 60 км/ч; розовая – 40 км/ч; красная – 20 км/ч.
- С9: зеленая – 40 км/ч; розовая – 40 км/ч; красная – 40 км/ч.
- С10: зеленая – 40 км/ч; розовая – 40 км/ч; красная – 20 км/ч.
- С11: зеленая – 40 км/ч; розовая – 20 км/ч; красная – 20 км/ч.
- С12: зеленая – 20 км/ч; розовая – 20 км/ч; красная – 20 км/ч.

Данная программа предоставляет возможность осуществить не только статистическое, но и динамическое моделирование, что значительно упрощает общее восприятие дорожной ситуации.

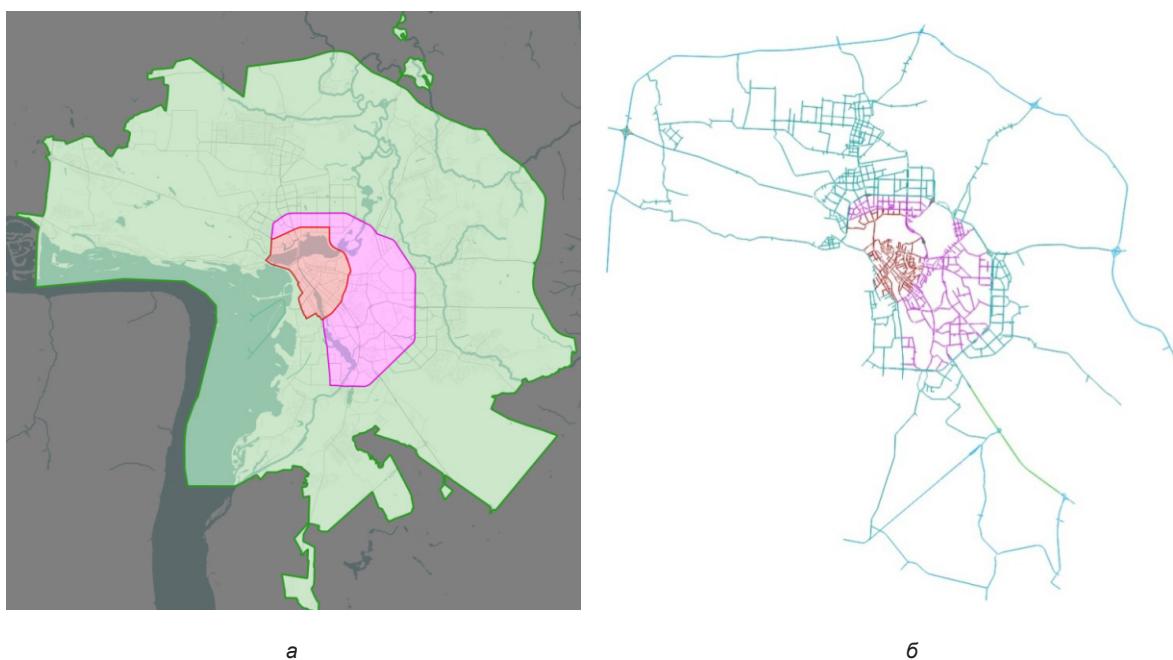


Рисунок 2 – Зонирование территории (а) и зонирование УДС (б) г. Казани
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – Zoning (a) and street network (б) in Kazan
Source: compiled by the author.

Создана модель улично-дорожной сети (УДС) г. Казани, позволяющая автоматизировать и значительно ускорить процесс обработки информации характеристик транспортного потока, необходимой для проведения оценки сложившейся ситуации [15, 16, 17].

Время разогрева модели составило 15 мин, а непосредственно моделирование выполнялось для утреннего пикового периода с 7:00 до 9:00 ч. Деление на зоны проводилось исходя из сложившейся конфигурации УДС по границам малого и большого казанских колец.

С помощью программы имитационного моделирования Aimsun и получения данных характеристик транспортного потока необходимо выяснить, как влияет зональное регулирование скоростного режима на движение транспортного потока в городских условиях при мезо- и микромоделировании [18, 19, 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты комплекса экспериментов методом мезомоделирования на УДС г. Казани

в утренний пиковый период представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

Количественный анализ результатов экспериментов мезомоделирования (см. рисунок 3, таблицу 1) показал минимальную среднюю загруженность сети при использовании Стратегии № 1 – 16,98%, минимальное общее пройденное расстояние в сети при использовании Стратегии № 5 – 696,687 км и минимальные общие затраты времени в сети при использовании Стратегии № 3 – 769,253 сек. Расчетные параметры варьируются следующим образом:

- средняя загруженность сети от 16,98% (C1) до 19,23 % (C12);
 - общая дистанция сети от 696 687 км (C5) до 1 525 940 км (C11);
 - общие затраты времени в сети от 760 353 сек (C2) до 4 767 200 сек (C12).

Результаты комплекса экспериментов методом микромоделирования на УДС г. Казани в утренний пиковый период (с 7:00 до 9:00) представлены на рисунке 4 и в таблице 2.

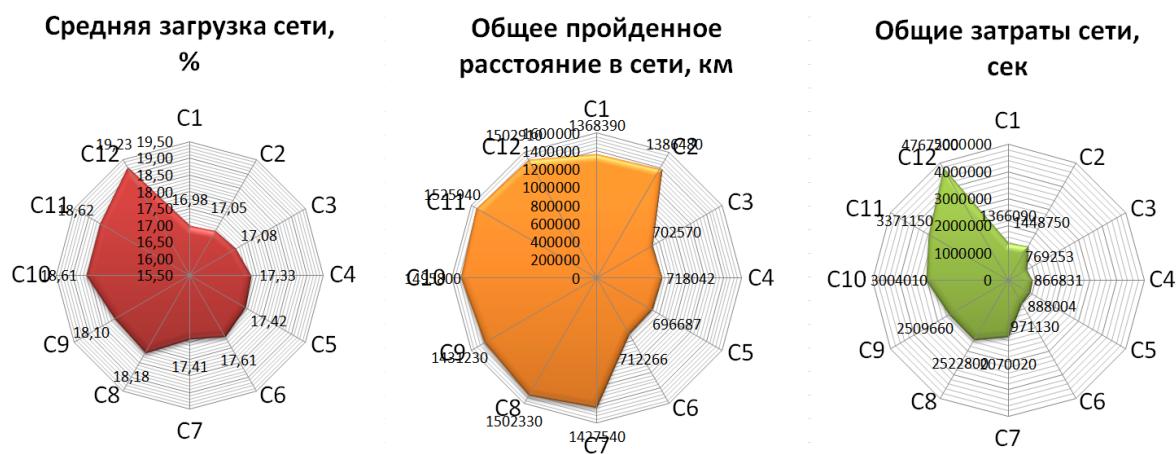


Рисунок 3 – Результаты имитационного мезомоделирования с ТПМ транспортных потоков с регулированием скорости движения
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Mesomodeling results for traffic flows with regulated speed
Source: compiled by the author.

Таблица 1
Расчетные параметры эффективности динамического управления скоростью движения ТПМ на основе мезомоделирования
Источник: составлено автором.

Table 1
Design parameters of dynamic traffic speed control efficiency based on mesomodeling
Source: compiled by the author.

Стратегия	Средняя загрузка сети, %	Общая дистанция сети, км	Общие затраты времени в сети, сек
C1	16,98	1368390	1366090
C2	17,05	1386480	1448750
C3	17,08	702570	769253
C4	17,33	718042	866831
C5	17,42	696687	888004
C6	17,61	712266	971130
C7	17,41	1427540	2070020
C8	18,18	1502330	2522800
C9	18,10	1431230	2509660
C10	18,61	1495800	3004010
C11	18,62	1525940	3371150
C12	19,23	1502910	4767200

Таблица 2

Расчетные параметры эффективности динамического управления скоростью движения с ТПМ по результатам микромоделирования

Источник: составлено автором.

Table 2
Design parameters of dynamic traffic speed control efficiency based on micromodeling
Source: compiled by the author.

Стратегия	Время проезда, сек/км	Время задержки, сек/км	Время остановки, сек/км	Средняя скорость, км/ч	Общее время в пути, ч	Общее пройденное расстояние, км	Плотность, ТС/км	Пропускная способность, ТС/ч
C1	102,32	59,72	47,32	35,18	19891,35	773071,1	5,99	32389
C2	102,62	58,13	45,69	35,08	21568,1	830223,7	5,62	34437,5
C3	101,89	53,31	41,98	35,33	22126,58	849642,9	5,48	35566,5
C4	112,53	60,73	49,71	31,99	22029,16	794298,2	6,14	32978,5
C5	107,61	52,29	42,17	33,45	22402,71	818216,08	5,76	34563
C6	113,24	54,56	44,89	31,79	22175,78	789321,1	6,16	32952,5
C7	117,26	50,74	41,87	30,7	22999,76	784994,1	6,26	33306
C8	140,57	65,63	55,9	25,61	25563,2	763158,9	7,19	31754
C9	128,42	48,4	40,97	28,03	22614,8	706718,2	7,11	30402,5
C10	143,83	55	48,19	25,03	23698,45	689463,7	7,65	28897
C11	173,39	61,11	54,98	20,76	25520,88	641249,5	8,52	27665,5
C12	218,54	64,1	60,05	16,47	27347,12	532607,3	9,69	24648,5

Расчетные параметры варьируются следующим образом:

- время проезда от 101,89 сек/км (C3) до 218,54 сек/км (C12);
- время задержки от 48,4 сек/км (C9) до 65,63 сек/км (C8);
- время остановки от 40,97 сек/км (C9) до 60,05 сек/км (C12);
- средняя скорость от 16,47 км (C12) до 35,33 км/ч (C3);
- общее время в пути от 19891,35 ч (C1) до 27347,12 ч (C12);
- общее пройденное расстояние от 532607,3 км (C12) до 849642,9 км (C3);
- плотность от 5,48 ТС/км (C3) до 9,69 ТС/км (C12);
- пропускная способность сети от 24648,5 ТС/км (C12) до 35566,5 ТС/км (C3).

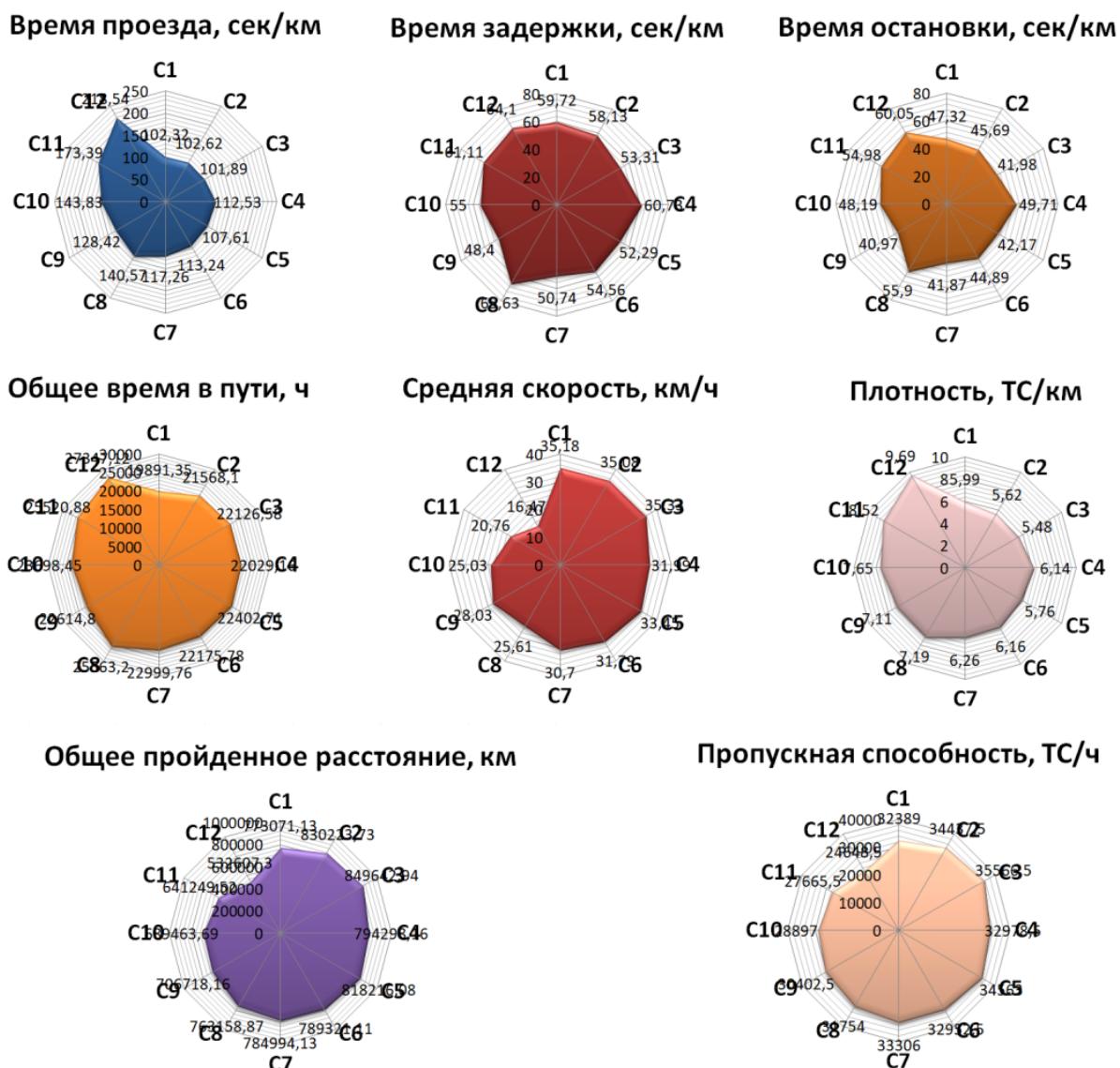


Рисунок 4 – Результаты имитационного микромоделирования с динамическим управлением скорости движения с ТПМ
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Micromodeling results for dynamic traffic speed control
Source: compiled by the author.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментов методом мезомоделирования можно сделать вывод, что применение ТПМ с регулированием скоростного режима в диапазоне от 80 до 20 км/ч с интервалом в 20 км/ч в целом имеет высокую эффективность в отношении снижения продолжительности заторовой ситуации и увеличении пропускной способности для сценария

№ 3 с минимальными общими затратами времени в сети от 769 253 сек.

По результатам экспериментов методом микромоделирования следует, что применение ТПМ с динамическим управлением скоростного режима также имеет высокую эффективность в отношении регулирования параметров транспортного потока и дорожно-транспортной ситуации с возможностью увеличения

пропускной способности в сценарии № 3 с минимальными показателями времени проезда по УДС 101,89 сек/км, плотностью 5,48 ТС/км и с максимальной средней скоростью 35,33 км/ч и пропускной способностью сети 35566,5 ТС/км.

По итогу комплекса экспериментов методами мезомоделирования и микромоделирования выявлены оптимальные стратегии зонального управления скоростным режимом на основе ТПМ. Установлено, что дифференциация скоростей по зонам (стратегия С3: 80/60/60 км/ч) позволяет достичь минимума общих затрат времени в сети и максимума пропускной способности. Наибольшая эффективность работы транспортной сети с применением технологий подключенной мобильности по схеме деления территории г. Казани на 3 зоны достигается в сценарии с комбинацией регулирования скоростного режима, от 80 км/ч в окраинной части, где низкая плотность УДС, 60 км/ч в срединной зоне и центральной части города, где плотность УДС выше.

Дальнейшие исследования будут направлены на выявление зависимости показателей плотности и протяженности УДС, а также частота расположения и тип пересечений на эффективность работы транспортной системы г. Казани.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев Е.О., Жанказиев С.В., Зырянов В.В., Павлов А.С. Развитие архитектуры интеллектуальных транспортных систем // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18 (1): 38–43. [Https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43). EDN HNTJMK
2. Булатова О.Ю. Концепция реализации технологии V2X для повышения эффективности дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 1 (76): 48–53. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-76-1-48-53](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-76-1-48-53). EDN YQUROE
3. Булатова О.Ю. Принципы функционирования транспортной инфраструктуры в умных городах // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-1 (78): 73–78. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-1\(78\)-3-73-78](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-1(78)-3-73-78). EDN LUOATD
4. Го А. Система управления дорожным движением на основе технологии блокчейн и интернета вещей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16(10): 28–35. [Https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-10-28-35](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-10-28-35). EDN RIIFVE
5. Грязнов Н.А. Обмен навигационной информацией для оперативного управления дорожным движением // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22(1): 33–56. [Https://doi.org/10.15622/ia.22.1.2](https://doi.org/10.15622/ia.22.1.2). EDN IEWXTR.
6. Грязнов М.В., Давыдов К.А. Увеличение скорости сообщения на регулярных автобусных маршрутах // Мир транспорта. 2019. Т. 17, № 6 (85): 202–220. [Https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-202-220](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-202-220). EDN KRMRMZ
7. Евстигнеев И.А., Шмыгинский В.В. Вопросы взаимодействия беспилотных транспортных средств с дорожной инфраструктурой // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2019. № 6 (85): 17–21. EDN QHGUJZ
8. Зырянов В.В., Феофилова А.А., Чуклин Н.Н. Динамическая маршрутизация транспортных потоков как метод снижения транспортной нагрузки на элементы УДС // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 1 (60): 74–80. EDN XMPWOL
9. Зырянов В.В., Го А., Линник Ю.Н., Кульев М.В. Моделирование гибких скоростных режимов на автомагистралях // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 4-1 (87): 104–111. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1\(87\)-104-111](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-104-111). EDN NCCROE
10. Курбатов Д.С., Старostenко А.В. Инновационные подходы к организации дорожного движения на основе цифровых двойников автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22(5): 772–785. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785). EDN ITMNZK
11. Новиков И.А., Шевцова А.Г., Кравченко А.А., Бурлуцкая А.Г. Разработка методики адаптации модели регулируемого пересечения // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 6 (76): 726–735. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735). EDN IMMDEC
12. Покусаев О.Н., Намиот Д.Е., Чекмарев А.Е. Об управлении трафиком в умном городе // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9, № 5: 66–71. EDN FRMUSZ
13. Солодкий А.И., Евтуков С.С., Черных Н.В. Цифровая трансформация транспортной отрасли Российской Федерации. Перспективы развития // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 1(76): 91–99. EDN DXSECG
14. Юнг А.А., Шевцова А.Г. Результат оценки характеристик транспортного потока с учетом движения средств индивидуальной мобильности с помощью моделирования участка дорожного движения // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 5 (87): 716–726. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726). EDN RLLOOR
15. Li H., Zhang Ju., Li Yu. [et al.] Modeling and simulation of vehicle group collaboration behaviors in an on-ramp area with a connected vehicle environment // Simulation Modelling Practice and Theory. 2021. Vol. 110: 102332. [Https://doi.org/10.1016/j.smp.2021.102332](https://doi.org/10.1016/j.smp.2021.102332). EDN MSKDZT
16. Mahmassani H.S. Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications // Networks and Spatial Economics. 2001. № 1(3): 267-292. [Https://doi.org/10.1023/A:1012831808926](https://doi.org/10.1023/A:1012831808926)

17. Niedzielski M.A., S. Goliszek, Górk A. Signals, tracks, and trams: public transport signal priority impact on job accessibility over time // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, No. 1: 23459. [Https://doi.org/10.1038/s41598-024-74960-x](https://doi.org/10.1038/s41598-024-74960-x). – EDN GQZJVB
18. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city // *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. T. 17(2): 175-181. [Https://doi.org/10.5937/jaes17-18117](https://doi.org/10.5937/jaes17-18117). EDN LYETQV
19. Xie N., Dong Ch., Wang H. Coordination of distributed adaptive signal control and advisory speed optimization based on shockwave theory // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2024. [Https://doi.org/10.1111/mice.13364](https://doi.org/10.1111/mice.13364). EDN ZOUIYR
20. Xu Te., Barman S., Levin M. W. [et al.] Integrating public transit signal priority into max-pressure signal control: Methodology and simulation study on a downtown network // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. Vol. 138: 103614. [Https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103614](https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103614). EDN OCBFIG

REFERENCES

- Andre E.O., Zhankaziev S.V., Zyryanov V.V., Pavlov A.S. Development of an architectural and engineering communication system. *T-Comm: Telecommunications and transport*. 2024; Vol. 18, No.1: 38-43. [Https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43). EDN HNTJMK
- Bulatova O.Y. The concept of implementing V2X communication technology to improve traffic efficiency. *The world of transport and technological machines*. 2022; № 1 (76): 48-53. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-76-1-48-53](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-76-1-48-53). EDN YQUROE
- Bulatova O.Y. Principles of functioning of transport infrastructure in smart cities. *The world of transport and technological machines*. 2022; No. 3-1 (78): 73-78. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-1\(78\)-3-73-78](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-1(78)-3-73-78). EDN LUOATD
- Guo A. Traffic management system based on blockchain technologies and the Internet of Things. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2022; Vol. 16, No. 10: 28-35. [Https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-10-28-35](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-10-28-35). EDN RIIFVE
- Gryaznov N.A. Exchange of navigation information for operational traffic management. *Informatics and automation*. 2023; Vol. 22(1): 33-56. [Https://doi.org/10.15622/ia.22.1.2](https://doi.org/10.15622/ia.22.1.2). EDN IEWXTP
- Gryaznov M.V., Davydov K.A. Increasing the speed of communication on regular bus routes. *World of transport*. 2019; Vol. 17, No. 6 (85): 202-220. [Https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-202-220](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-202-220). EDN KRMRMZ
- Evtigneev I.A., Shmytinsky V.V. Issues of interaction of unmanned vehicles with road infrastructure. *Transport of the Russian Federation. A journal about science, practice, and economics*. 2019; № 6 (85): 17-21. EDN QHGUJZ.
- Zyryanov V. V., Feofilova A. A., Chuklinov N. N. Dynamic routing of traffic flows as a method of reducing the transport load on the elements of the UDS. *The world of transport and technological machines*. 2018; № 1 (60): 74-80. EDN XMPWOL
- Zyryanov V.V., Guo. Aohua, Linnik Yu.N., Kulev M.V. Modeling of flexible speed modes on motorways. *The world of transport and technological machines*. 2024; № 4-1 (87): 104-111. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1\(87\)-104-111](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-104-111). EDN NCCROE
- Kurbatov D.S., Starostenko A.V. Innovative approaches to traffic management based on digital highway doubles. *Bulletin of SibADI*. 2025; Vol. 22(5): 772-785. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785). EDN ITMNZK
- Novikov I.A., Shevtsova A.G., Kravchenko A.A., Burlutskaya A.G. Development of a methodology for adapting the controlled intersection model. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2020; Vol. 17, No. 6 (76): 726-735. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735). EDN IMMDEC
- Pokusaev O.N., Namot D.E., Chekmarov A.E. On traffic control in a smart city. *International Journal of Open Information Technologies*. 2021; Vol. 9, No. 5: 66-71. EDN FRMUSZ
- Solodky A.I., Yevtyukov S.S., Chernykh N.V. Digital transformation of the transport industry of the Russian Federation. *Prospects of development. Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI)*. 2024; № 1(76): 91-99. EDN DXSECG
- Jung A.A., Shevtsova A.G. The result of assessing the characteristics of the traffic flow, taking into account the movement of means of individual mobility by modeling a section of traffic. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2022; Vol. 19, No. 5 (87): 716-726. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726). EDN RLLOOR
- Li H., Y. Zhang, Li Y. [et al.] Modeling the behavior of a group of vehicles when working together in the ramp entrance area with a connected vehicle. *Practice and theory of simulation modeling*. 2021; Volume 110: 102332. [Https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102332](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102332). EDN MSKDZT
- Mahmassani H.S. Methodology of dynamic network traffic distribution and modeling for advanced system management applications. *Networks and spatial economics*. 2001; № 1(3): 267-292. [Https://doi.org/10.1023/A:1012831808926](https://doi.org/10.1023/A:1012831808926)
- Nedzelski M.A., Golishek S., Gurka A. Signals, rails and trams: The influence of the priority of public transport signals on the accessibility of workplaces over time. *Scientific reports*. 2024; Volume 14, No. 1: 23459. [Https://doi.org/10.1038/s41598-024-74960-x](https://doi.org/10.1038/s41598-024-74960-x). EDN GQZJVB
- Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; T. 17, No 2: 175-181. [Https://doi.org/10.5937/jaes17-18117](https://doi.org/10.5937/jaes17-18117). EDN LYETQV
- Xie N., Dong C., Wang H. Coordination of distributed adaptive signal management and recommedatory speed optimization based on shock wave

theory. *Automated construction of buildings and infrastructure*. 2024. [Https://doi.org/10.1111/mice.13364](https://doi.org/10.1111/mice.13364). EDN ZOUIR

20. Xu Te., Barman S., Levin M.V. [et al.] Integration of the priority of the public transport signal into the control of the maximum pressure signal: methodology and simulation study of the network in the city center. *Research in the field of transport, part C: New technologies*. 2022. Volume 138: 103614. [Https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103614](https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103614). EDN OCBFIG

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Загидуллин Рамиль Равильевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование», ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальная мобильность» Казанского федерального университета (420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5185-2690>,
SPIN-код: 7207-8758,
Scopus ID: 57193743308,
Researcher ID: E-5671-2018,
e-mail: r.r.zagidullin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zagidullin Ramil R. – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Structural and Design Engineering, Leading Researcher at the Intelligent Mobility Scientific Research Laboratory, Kazan Federal University (Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5185-2690>,
SPIN-code: 7207-8758,
Scopus ID: 57193743308,
Researcher ID: E-5671-2018,
e-mail: r.r.zagidullin@mail.ru

Научная статья

УДК 656.13(571.150)

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-952-965>

EDN: HFTKBZ



Check for updates

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА УЧАСТКЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

Д.А. Лазарев

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
г. Белгород, Россия
avtotech31@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Аварийность в Российской Федерации, не смотря на общее снижение данного показателя за последние годы, все еще находится на достаточно высоком уровне. Смертность в результате дорожно-транспортных происшествий в нашей стране находится также на достаточно высоком уровне. Между тем возникновение дорожно-транспортного происшествия (ДТП) как явления зависит от наличия фактора или совокупности факторов, которые в своем состоянии выходят за пределы нормы, инициируя тем самым опасную совокупность событий, приводящих к ДТП. В связи с этим оценка влияния различных факторов на аварийность, их выявление и профилактика является актуальной научной задачей.

Материалы и методы. В данной статье сформулированы основные положения по формированию интеллектуальной информационной системы, основанной на интегральном учете весов взаимосвязанного массива критериев и подкритериев, получаемого путем нормализованной экспериментально-экспериментальной оценки основных конечных весовых элементов подсистем, образующих общую систему, на различных уровнях формирования общей оценки безопасности дорожного движения на отдельном участке улично-дорожной сети. В качестве объекта оценки выступает дорожно-транспортное происшествие как явление на участке улично-дорожной сети, сформированное из совокупности предикторов (конечных элементов) оценки, составляющих на разных уровнях оценки подкритерии, критерии и подсистемы общей системы оценки, один или несколько из которых имеет отклонение от нормального состояния, что приводит к аварийной ситуации и возникновению дорожно-транспортного происшествия как явления.

Выходы. В результате исследования сформирован многокритериальный метод оценки уровня безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети с использованием конечных предикторов оценки отдельных подсистем в рамках системы «Водитель – Транспортное средство – Дорога – Окружающая среда (ВАДС)», ранжирование и взаимовлияние которых реализовано в виде программного продукта, включающего в себя расчетные методы на основе правил нечеткого вывода. Оценка предикторов состояния системы оценивается исключительно экспериментально-экспериментальными методами мест концентрации дорожно-транспортных происшествий на участках улично-дорожной сети. Указанный метод универсален, имеет несколько уровней оценки различных факторов влияния, а также может быть дополнен при необходимости дополнительными предикторами оценки.

Рамки исследования/возможность последующего использования результатов научной работы. Предложенный метод может служить основой к формированию аналитической базы состояния транспортной среды в нашей стране на предмет ее безопасности, а также выступать в качестве основы для дальнейшего трансформирования системы ВАДС в более продвинутые системные формы.

Практическое значение. Результаты исследования могут использоваться при комплексной оценке безопасности дорожного движения с целью выявления факторов, влияющих на возникновение аварийной ситуации для проведения профилактических мероприятий по устранению данных факторов, как причины происшествий.

Оригинальность. Впервые к оценке безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети применяется комплексный подход с использованием декомпозиции взаимодействующих подсистем системы ВАДС на предикторы оценки, состояние которых определяется не прогнозными или статистическими методами, а путем экспериментально-экспериментального исследования с установлением критериев, выходящих за пределы нормы.

© Лазарев Д.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интеллектуальная система, безопасность дорожного движения, нечеткая логика, критерии оценки, дорожно-транспортное происшествие, интегральная оценка

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 17.09.2025; одобрена после рецензирования 09.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Лазарев Д.А. Многокритериальный метод оценки уровня безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 952-965. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-952-965>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-952-965>

EDN: HFTKBZ

MULTICRITERIA METHOD FOR ASSESSING THE ROAD TRAFFIC SAFETY LEVEL ON A STREET NETWORK SECTION

Dmitriy A. Lazarev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Belgorod, Russia

avtotech31@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Despite the general decrease in recent years, the accident rate in the Russian Federation remains at a sufficiently high level. Mortality as a result of road traffic accidents in our country is also at a fairly high level. Meanwhile, the occurrence of a Road Traffic Accident (RTA), as a phenomenon, depends on the presence of factor or on the combination of factors that exceed their normal state, thereby initiating a dangerous chain of events leading to an accident. In this regard, assessing the influence of various factors on the accident rate, their identification, and prevention is a relevant scientific task.

Materials and methods. This article outlines the main principles for the development of an Intelligent Informational System based on the integrated consideration of significance of an interconnected array of criteria and sub-criteria, obtained by normalized expert and experimental evaluation of the main final importance of subsystem elements that constitute the common system at various levels of forming a comprehensive assessment of road safety on a separate section of the street network. The object of assessment is a traffic accident as a phenomenon on a street network section, originated from a set of predictors (final elements) of the assessment, which at different evaluation levels make sub-criteria, criteria, and subsystems of the general assessment system, one or more of which has a deviation from the normal state, which leads to an emergency situation and the occurrence of a traffic accident as a phenomenon.

Conclusions. Multicriteria method for assessing road safety on a road network section using final predictors for evaluating individual subsystems within the Driver-Vehicle-Road-Environment (DVRE) system has been developed. The ranking and interinfluence of these predictors are implemented in the form of a software product that includes computational methods based on fuzzy inference rules. The assessment of the system state predictors is carried out exclusively by expert and experimental methods at locations of concentrated road traffic accidents on the street network section. The specified method is universal, employs several levels for evaluating various influencing factors, and can be supplemented with additional estimating predictors if necessary.

Research scope/Potential for further use of the scientific work results. The proposed method can serve as a basis for developing an analytical database on the state of the transport environment in our country in terms of its safety, as well as act as a foundation for the further transformation of the Driver-Vehicle-Road-Environment (DVRE) complex into more advanced systemic forms.

© Lazarev Dmitriy A., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Practical significance. The research results can be used in a comprehensive assessment of road traffic safety to identify factors influencing the occurrence of dangerous situations, for conducting preventive measures to eliminate these factors as causes of accidents.

Originality. For the first time, a comprehensive approach has been applied to assess road traffic safety on the street network section. This approach uses the decomposition of the interacting subsystems of the Driver-Vehicle-Road-Environment (DVRE) system into evaluation predictors whose state is determined not by predictive or statistic methods, but by the expert and experimental research with the establishment of criteria that exceed the norm.

KEYWORDS: intelligent system, road safety, fuzzy logic, evaluation criteria, road traffic accident, integral assessment

ACKNOWLEDGMENTS. The author expresses gratitude to the Editorial Board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal and to the Reviewers of the article.

The article was submitted: September 17, 2025; **approved after reviewing:** December 09, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Lazarev D.A. Multicriteria method for assessing the road traffic safety level on a street network section. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 952-965. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-952-965>

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом автомобилизация сфер деятельности в нашей стране растет. Транспорт становится неотъемлемой и очень важной частью экономики, оставаясь одним из основных ее драйверов. Однако увеличение количества транспортных средств на дорогах неизбежно приводит к формированию конфликтных ситуаций и росту количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [1, 2]. Даже несмотря на общее снижение смертности от ДТП, уровень аварийности на транспорте до сих пор достаточно велик, что приводит к потерям экономики и народного хозяйства, а также потенциала страны как в человеческом плане, так и в материальном. Причин возникновения аварийных ситуаций может быть множество, зависящих от отдельных факторов или проявляющихся в их совокупности. Нередко причины возникновения аварийности на отдельных участках улично-дорожной сети (УДС) носят системный характер [3]. Выявление влияющих на безопасность дорожного движения (БДД) факторов, которые выходят в своем состоянии за пределы нормы, позволит снизить их влияние на возникновение аварийных ситуаций и повысить уровень безопасности дорожного движения [4, 5].

Целью работы является формирование системы оценки уровня безопасности дорожного движения на участке УДС путем использования критериальных предикторов оценки, описывающих состояние отдельных элементов

системы «Водитель – Транспортное средство – Дорога – Окружающая среда».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для формирования методологии оценки безопасности дорожного движения на участке УДС была выбрана простая, понятная, а также устоявшаяся во времени система влияния «Водитель – Транспортное средство – Дорога – Окружающая среда» (система ВАДС), в которой известны основные предикторы (критерии) оценки. Однако для формирования оценки всей системы недостаточно использовать ее подсистемы, поскольку они достаточно сложны в своем формировании как подсистемы [2, 6]. Для этого система оценки БДД была декомпозирована на четыре уровня оценки вплоть до конечных элементов – подкriterиев, которые могут быть оценены на предмет их нормальности относительно нормированного состояния с помощью экспертно-экспериментальных исследований. Сама оценка системы формируется на пяти уровнях (рисунок 1) [7, 8].

Это реализовано для упрощения вычислительных мощностей системы, поскольку сама система содержит значительное количество предикторов и одновременный расчет их взаимовлияния и взаимного учета может усложнить расчет интегральной оценки и увеличить время ее формирования. Например, подсистема «Окружающая среда» содержит пять критериев оценки и пятнадцать подкriterиев, влияющих на них (рисунок 2) [7, 8].

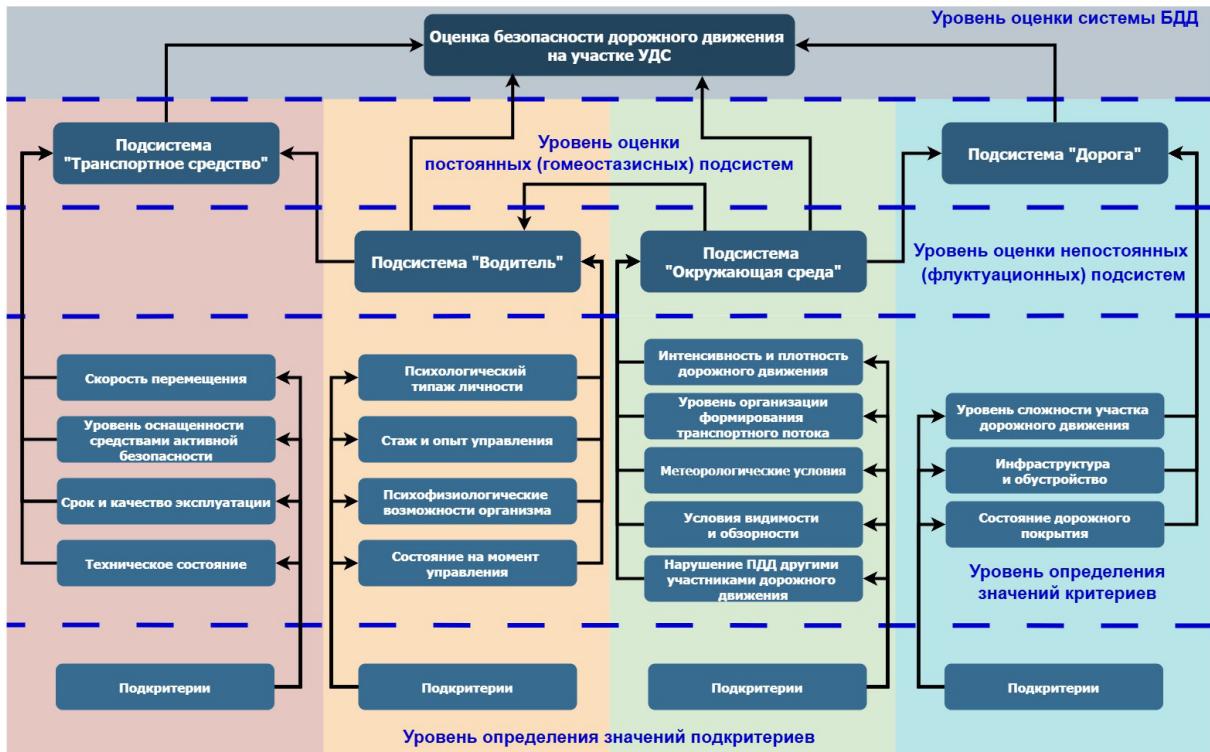


Рисунок 1 – Декомпозиция системы оценки безопасности дорожного движения на уровни оценки ее составных частей
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Decomposition of the road safety assessment system into evaluation levels of its components
Source: compiled by the author.



Рисунок 2 – Карта декомпозиции подсистемы «Окружающая среда» на критерии и подкритерии оценки
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Decomposition map of the "Environment" subsystem into evaluation criteria and sub-criteria
Source: compiled by the author.



Рисунок 3 – Карта декомпозиции подсистемы «Водитель» на критерии и подкритерии оценки
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Decomposition map of the “Driver” subsystem into evaluation criteria and sub-criteria
Source: compiled by the author.

Карты декомпозиций других подсистем показаны на рисунках 3, 4, 5 [7, 8].

Подобный многоуровневый подход к формированию итоговой интегральной оценки позволяет разложить интегральные вычисления и снизить нагрузку на систему, а многокритериальный принцип позволит охватить большее число предикторов оценки. Однако для формирования самой оценки с таким количеством предикторов, как и для реализации их гибкого взаимодействия в рамках подсистем, необходим адекватный математический аппарат [9, 10]. Для формирования общей архитектуры многокритериальной информационной интеллектуальной системы оценки уровня безопасности дорожного движения (МИИС БДД) необходимо сформировать правила математического взаимодействия предикторов оценки и вывода интегральной оценки на различных уровнях.

Для формирования математической модели, ориентируясь на необходимые цели работы программы МИИС БДД, были проанализированы математические и алгоритмические инструменты обработки нечетких

данных. Установлено, что наиболее подходящими для принятой концепции обработки информации являются алгоритмы Мамдани и Сугено, в зависимости от задач на разных уровнях и типа обрабатываемых данных. При этом для разных предикторов возможно формирование правил на основе разных алгоритмов, которые имеют свои сильные стороны и недостатки для конкретных задач. Например, особенностями алгоритма Мамдани является возможность нечеткой импликации путем использования операции минимизации и выполнения связки «and», которые на стадии агрегирования позволяют определить максимум. Процедуры фазификации, композиции базы правил, импликации, дефазификации в комплексе являются алгоритмом Мамдани. Если при импликации выходным сигналом лингвистического решения является не лингвистическое решение в виде нечетких функций, а конкретное число или линейная функция, то такой алгоритм называется алгоритмом Такаги-Сугено, иногда называемый просто алгоритмом Сугено.



Рисунок 4 – Карта декомпозиции подсистемы «Транспортное средство» на критерии и подкритерии оценки
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Decomposition map of the “Vehicle” subsystem into evaluation criteria and sub-criteria
Source: compiled by the author.



Рисунок 5 – Карта декомпозиции подсистемы «Дорога» на критерии и подкритерии оценки
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Decomposition map of the “Road” subsystem into evaluation criteria and sub-criteria
Source: compiled by the author.

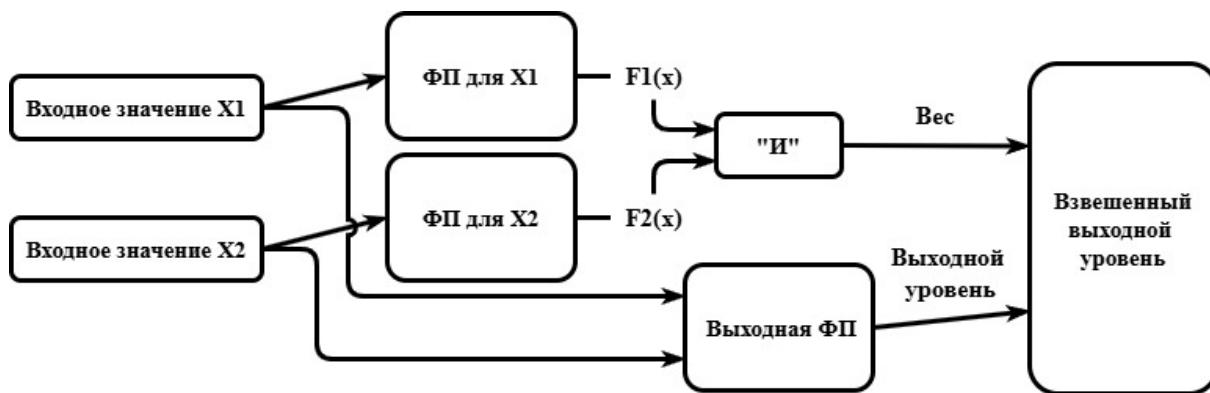


Рисунок 6 – Принципиальная схема формирования нечеткого вывода в алгоритме Сугено
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Functional diagram of fuzzy inference generation in the Sugeno algorithm
Source: compiled by the author.

В данной модели основной особенностью является то, что для итоговой функции принадлежности (далее ФП) проводится расчет средневзвешенного значения ряда данных, в то время как в алгоритме Мамдани вычисляется центр тяжести двумерной области, что на стадии дефазификации более предпочтительно с точки зрения точности вычислений. В случае двух входных предикторов схема алгоритма Сугено будет иметь вид, показанный на рисунке 6 [11, 12, 13, 14].

Для формирования правил нечеткого вывода используются два принципиальных значения:

- линейная функция $z_i = a_i x_1 + b_i x_2 + c_i$ с двумя входными переменными и константами a_i , b_i и c_i тождественная значению выхода каждого отдельного правила;
- весовое значение каждого правила w_i , формируемое импликацией функций принадлежности для двух входных переменных – $F_1(x)$ и $F_2(x)$.

Формирование нечеткого вывода значений оценки состояния системы реализуется поэтапно и последовательно. На первом этапе происходит введение нечеткости или процедура фазификации, которая устанавливает значения ФП для нечетких множеств (термов), используя четкие предикторы оценки. На вто-

ром этапе происходит нечеткий вывод, который объединяет функции принадлежности, лингвистические переменные (далее ЛП) или нечеткие логические операции в нечеткие заключения. Далее следует этап композиции, формирующий совокупность нечетких подмножеств для каждой переменной вывода. А завершающим этапом служит преобразование нечеткого вывода в числовую переменную или этап дефазификации, преобразующий ФП выходной ЛП в четкое (числовое) значение.

Этот процесс в математическом плане описан, известен и формируется с учетом следующих функций [11, 14]:

- функции принадлежности $\mu_{jp}(x_i)$ входного нечеткого терма a_{ijp} , определяемого по формуле,

$$a_{ijp} = \int_{x_i}^{\bar{x}_i} \mu_{jp}(x_i) / x_i dx, \quad x_i \in [x_i, \bar{x}_i];$$

- функции принадлежности $\mu_{dj}(y)$ выходного нечеткого терма d_j , определяемого по формуле,

$$d_j = \int_y^{\bar{y}} \mu_{dj}(y) / y dy.$$

Входной вектор $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ выходного терма d_j имеет степень принадлежности, которая определяется логическим операционным алгоритмом «ИЛИ (И)» из s -нормы (t -нормы) базы знаний:

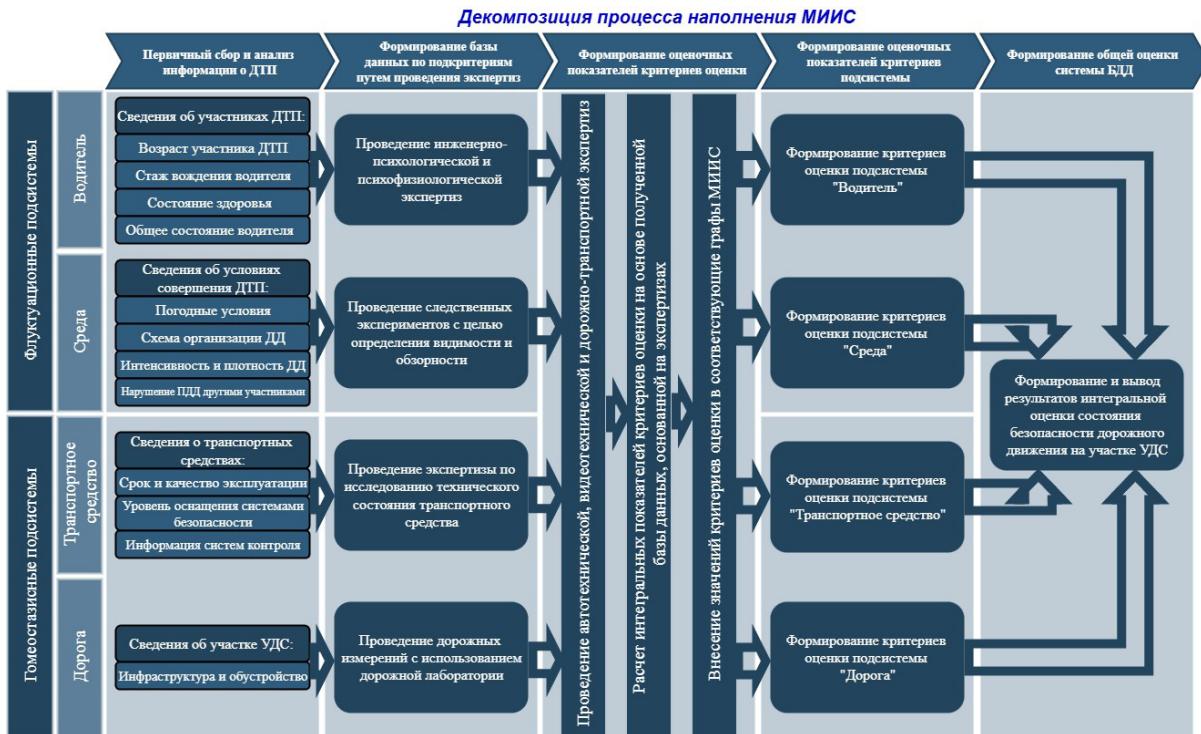


Рисунок 7 – Принципиальная схема декомпозиции процесса наполнения МИИС БДД с формированием этапов оценки на различных уровнях системы
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Functional decomposition diagram of the filling process of Multicriteria Information Intelligent System for assessing Road Traffic Safety, with the development of estimation stages at various system levels
Source: compiled by the author.

$$\mu_{dj}(X^*) = V_{p=1, k_j} w_{jp} \cdot \Lambda_{i=1, n} [\mu_{jp}(X_i^*)]. \quad (1)$$

В результате чего формируется выходное нечеткое множество y , тождественное входному вектору x^* [11, 14]:

$$y = \frac{\mu d_1(x^*)}{d_1} + \frac{\mu d_2(x^*)}{d_2} + \dots + \frac{\mu d_m(x^*)}{d_m}. \quad (2)$$

Сам процесс формирования логического нечеткого вывода на основе нечеткого терма второго порядка будет выглядеть так [10, 13]:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} \text{ с весом } w_{jp} \right) \rightarrow y = d_j. \quad (3)$$

При этом вначале четкое числовое множество формируется из нечетких множеств $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ срезанием ФП $\mu_{dj}(y)$ на уровне $\mu_{dj}(x^*)$, после чего происходит агрегация полученных нечетких множеств по следующей формуле [11, 14]:

$$\tilde{y} = \text{agg}_{j=1, m} \left(\int_{\bar{y}}^{\bar{y}} \min(\mu_{dj}(X^*), \mu_{dj}(y)) dy \right). \quad (4)$$

Функция «agg» предполагает определение максимума нечетких множеств, а четкое значение выхода y формируется с использованием метода определения центра тяжести путем дефазификации нечеткого множества \tilde{y} [11, 14]:

$$y = \frac{\int_{\bar{y}}^y u \cdot \mu_u(u) dy}{\int_{\bar{y}}^y \mu_{\bar{y}}(u) dy}. \quad (5)$$

Предлагаемый математический метод позволит универсализировать подход к оценке безопасности дорожного движения введением единой шкалы оценивания для всех критериев-предикторов, в том числе и тех, которые имеют нечисловые значения (значения лингвистических переменных без физически определенной базовой переменной).

Поскольку формирование оценки происходит на пяти уровнях (см. рисунок 1), то последовательное заполнение этих уровней исходной информацией имеет принципиальное значение, при этом ключевым уровнем следует считать сбор информации на участке УДС на первом подкритериальном уровне, который подчинен двум основным идеям [15]:

1. Оценка системы БДД происходит путем определения паттернов поведения участников дорожного движения или изменяемых, но прогнозируемых и измеряемых, параметров во флуктуационных подсистемах («Водитель», «Окружающая среда»).

2. Оценка системы БДД происходит путем определения устойчивых эксплуатационных, конструктивных или организационных особенностей дорожного движения на предмет их соответствия нормированным параметрам в гомеостазисных системах («Транспортное средство», «Дорога»).

При этом основным источником определения нормальности является экспертиза дорожно-транспортного происшествия как явления, которое содержит в себе код причины возникновения аварийной дорожно-транспортной ситуации, выраженный в ненормированном состоянии предиктора оценки – в данном случае одного подкритерия или совокупности подкритериев. При этом значительная часть значений подкритериев возможно определить на стадии первичного осмотра места происшествия, когда собирается основной массив информации о дорожно-транспортном происшествии, его участниках, транспортных средствах, участке улично-дорожной сети, где произошло проис-

шествие, его свойствах и характеристиках, а также о метеорологических и прочих окружающих условиях. Иные данные для формирования базы данных под оценку подкритериев и критериев возможно установить только путем проведения различных экспертиз и исследований. Полная декомпозиция процесса наполнения МИИС БДД показана на рисунке 7.

Как видно из схемы наполняемости МИИС, подсистемы и элементы их образующие не находятся в состоянии изолированности и взаимодействуют между собой, оказывая влияние на состояние того или иного предиктора. Например, менее опытный водитель будет воспринимать дорожную обстановку и принимать решения менее уверенно, чем опытный, в то время как наличие систем активной безопасности на одном транспортном средстве снижает риск возникновения ДТП в неблагоприятных дорожных условиях в отличие от транспортного средства, их не имеющего. Систематизация подобных закономерностей позволила объединить эти взаимосвязи в принципиальную схему взаимовлияния подсистем и критериев в когнитивную карту (рисунок 8) [16].

Такой подход к формированию оценки уровня БДД, несмотря на сложность в структуре формирования, позволяет упростить и расширить вычислительные возможности при формировании интегральной оценки и учесть значительное количество предикторов в совокупности путем научного подхода, исключая типовые или формализованные методы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации программного аппарата МИИС БДД использовался высокоуровневый язык программирования Python, особенность которого, применительно к нашим задачам, состоит в том, что на его базе реализована строгая динамическая типизация и автоматический контроль памяти. На рисунке 9 продемонстрирован конечный результат формирования информационной рабочей панели с визуализацией вывода результатов расчета итоговой оценки на основе входных предикторов оценки. На рисунке 10 продемонстрировано динамическое интегральное смещение ФП подсистем при изменении состояния одной из подсистем [16, 17].

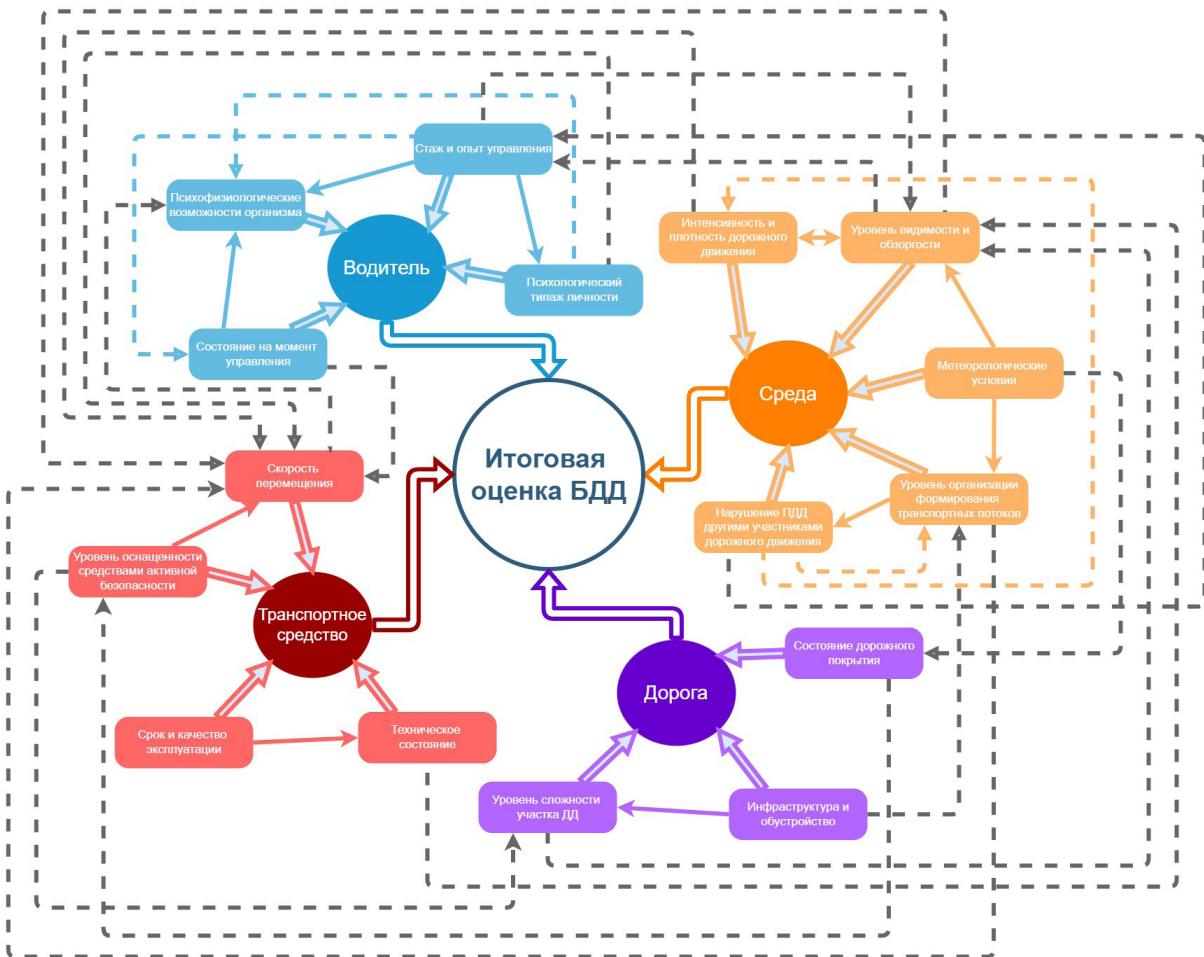


Рисунок 8 – Когнитивная карта взаимовлияния подсистем и критериев на различных уровнях взаимодействия в МИИС
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Cognitive map of the mutual influence of subsystems and criteria at various levels of interaction within the Multicriteria Information Intelligent System
Source: compiled by the author.

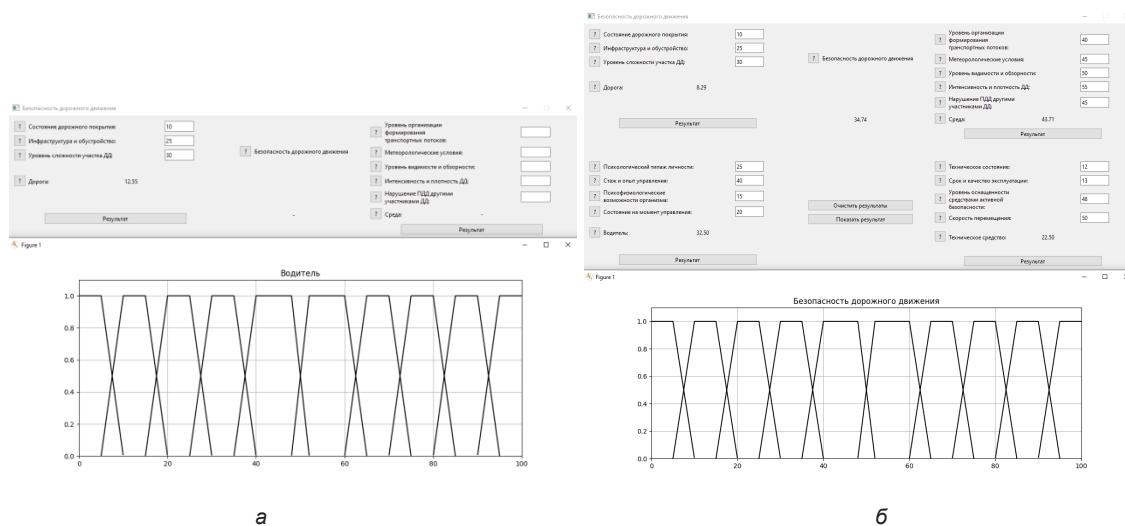


Рисунок 9 – Примеры вывода интегральной оценки уровня БДД на базе аппаратной реализации МИИС:
 а – отдельная оценка состояния подсистемы;
 б – результат итоговой оценки БДД с учетом состояния всех подсистем.
 Источник: составлено автором.

Figure 9 – Examples of deriving the integral assessment of the Road Traffic Safety Level based on the hardware implementation of the Multicriteria Information Intelligent System:
 a) individual assessment of the subsystem state;
 b) final road traffic safety assessment result considering the state of all subsystems
 Source: compiled by the author.

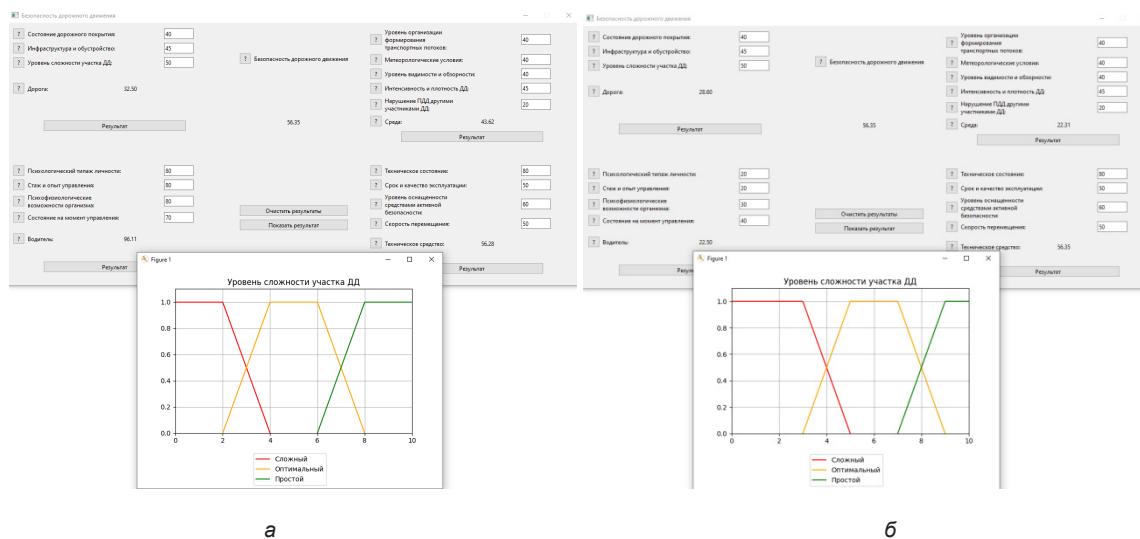


Рисунок 10 – Результат смещения ФП подсистемы при изменении состояния:
 а – оценка штатного состояния подсистемы;
 б – оценка изменения подсистемы при изменении состояния подсистемы «Водитель»
 Источник: составлено автором.

Figure 10 – The result of the subsystem membership function shift when the state changes:
 a) assessment of the subsystem's normal state;
 b) assessment of the subsystem modification when the state of the "Driver" subsystem changes
 Source: compiled by the author.

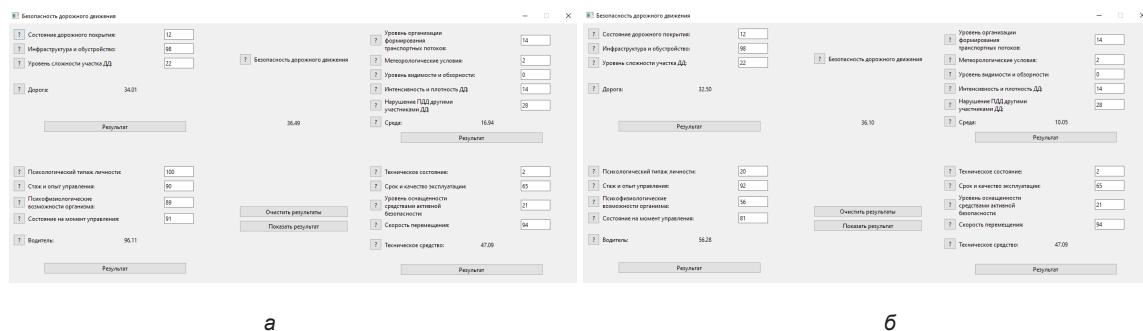


Рисунок 11 – Проверка учета влияния состояния подсистемы «Водитель» на общие оценки подсистем и на общую интегральную оценку БДД:
а – оценка подсистем без учета влияния общей оценки подсистемы «Водитель»;
б – оценка подсистем с учетом влияния общей оценки подсистемы «Водитель»
Источник: составлено автором.

Figure 11 – Verification of the accounting of the impact of the “Driver” subsystem state on the general assessments of the subsystems and on the overall integral assessment of Road Traffic Safety (RTS):
a) subsystem assessment without considering the influence of the overall “Driver” subsystem estimation;
b) subsystem assessment considering the influence of the overall “Driver” subsystem estimation.
Source: compiled by the author.

Как следствие изменения состояния одной из подсистем (в рассматриваемом случае подсистемы «Водитель»), итоговая оценка БДД также интегрально изменяется (рисунок 11), что позволяет проводить анализ системы в целом и выявлять влияющие на снижение уровня безопасности предикторов.

Снижение оценок других подсистем в результате взаимовлияния изменения состояния одной из подсистем приводит к снижению общей интегральной оценки БДД, что позволит выявить ненормированные предикторы влияния и понять, какие мероприятия необходимо провести для устранения причин возникновения одиночного дорожно-транспортного происшествия как явления, на участке УДС или системности их возникновения по причине наличия отклонения от нормальности одного или совокупности факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет получать интегральную оценку состояния системы безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети, который отличается выходом из нормального состояния и характеризуется повышенной аварийностью, путем оценки отдельных предикторов влияния экспертно-экспериментальными способами (дорожно-транспортной, психофизиологической, дорожной экспертизами, экспериментальными замерами, диагностикой и т.д.) составных

частей системы «Водитель – Транспортное средство – Дорога – Окружающая среда». Это позволит выявить критические факторы, влияющие на возникновение дорожно-транспортной ситуации, которая приводит к аварийному событию, с целью устранения их, как выходящие за пределы нормального состояния, путем проведения профилактических, реконструкционных или иных мероприятий. Отличительной особенностью предложенной модели является большое количество предустановленных предикторов оценки, многоуровневый поэтапный интегральный расчет их взаимодействия и взаимовлияния, что позволяет снизить нагрузку на расчетные технические мощности программного обеспечения и повысить охват учитываемых переменных. В конечном итоге предлагаемый метод позволит обеспечить скорость анализа аварийных участков путем увеличения скорости обработки информации, а также повысить безопасность дорожного движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рубцова М.В. Безопасность дорожного движения в России: проблемы и пути их решения // Безопасность дорожного движения. 2021. № 3. 4–7 с.
2. Пирогов Я.Е., Евтуков С.С., Терентьев А.В. Концепция информационно-аналитической платформы в дорожно-транспортной системе мегаполиса // Вестник гражданских инженеров. 2022. №5 (94). С. 123–129.

3. Новиков А.Н., Еремин С.В., Ломакин Д.О. Оценка уровня безопасности дорожного движения на региональном уровне // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3 (70). С. 72–79. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79)
4. Лопарев Е.А., Сергунова А.С. Влияние внешних факторов на уровень дорожно-транспортных происшествий, связанных с наездами на пешеходов // Безопасность дорожного движения. 2022. № 1. 28–34 с.
5. Петров А.И., Евтуков С.А. Специфика использования информационно-энтропийного подхода при организации и управлении городскими системами обеспечения безопасности дорожного движения // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (105): 80–88.
6. Подопригора Н.В. Структура и функционирование системы «Водитель – Автомобиль – Дорога – Внешняя среда» // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91): 154–159.
7. Новиков И.А., Лазарев Д.А., Зиборова Е.И., Жихарев А.Г. Совершенствование дорожно-транспортной экспертизы в сфере безопасности дорожного движения путем внедрения методологии комплексного определения составляющих механизма дорожно-транспортных происшествий // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 1-3 (84): 71–81. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-3\(84\)-71-81](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-71-81)
8. Зеликов В.А., Шаталов Е.В., Еркнапешян Е.Н. [и др.]. Управление безопасностью движения в сфере автотранспортного обслуживания населения // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 8 (39).
9. Евтуков С.С., Васильев Я.В., Голубев Д.С. Модель прогнозирования аварийности на основе аддитивного нейро-нечеткого вывода // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 2-2 (89): 126–133. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-2\(89\)-126-133](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-126-133)
10. Гавриленко А.А. О перспективах использования нейросетей в аналитике безопасности дорожного движения // Современная наука. 2024. № 4: 8–11.
11. Аникеев Е.А. Применение нечеткой логики для управления дорожным движением // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Том 2, № 4, ч. 3: 315–318.
12. Клюшин А.Ю., Кузнецов В.Н., Кучерявых В.В. Задачи построения интеллектуальной информационной системы управления безопасностью дорожного движения // Программные продукты и системы. 2010. № 4.
13. Мосин К.К. Использование методов автоматизированного машинного обучения для классификации дорожно-транспортных происшествий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 2.
14. Xueqiu, Wang. BL-YOLOv8: An Improved Road Defect Detection Model Based on YOLOv8 / Xueqiu Wang, Huanbing Gao, Zemeng Jia, Zijian Li // Sensors 2023, 23, 8361. <https://doi.org/10.3390/s23208361>
15. Лазарев Д.А., Гринякин Р.В., Стрекалов Д.П., Шаталов Е.В. Применение цифровых алгоритмов при оптимизации процесса расследования дорожно-транспортных происшествий // Воронежский научно-технический вестник. № 4(46) декабрь 2023 г. [Https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-107-119](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-107-119)
16. Лазарев Д.А., Иващук О.Д., Бекетов Я.М., Новиков И.А. Интеллектуальная система оценки уровня безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети // Грузовик. 2025. № 8. С. 44–53. [Https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-8-44-53](https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-8-44-53)
17. Иващук О.Д., Бекетов Я.М., Новиков И.А., Лазарев Д.А. Интеллектуальная система оценки уровня безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025660188 // правообладатель ФГАОУ ВО БелГНИУ; дата гос. рег.: 22.04.2025 г.

REFERENCES

1. Rubtsova M.V. Road safety in Russia: problems and ways to solve them. *Road safety*. 2021; 3: 4-7. (in Russ.)
2. Pirogov Ya.E., Evtyukov S.S., Terentyev A.V. The concept of an information and analytical platform in the road transport system of a metropolis. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 5 (94): 123-129. (in Russ.)
3. Novikov A.N., Eremin S.V., Lomakin D.O. Assessment of the level of road safety at the regional level. *World of transport and technological machines*. 2020; 3 (70): 72-79. (in Russ.) [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79)
4. Loparev E.A., Sergunova A.S. Influence of external factors on the level of road accidents associated with pedestrian collisions. *Road safety*. 2022; 1. 28-34 s. (in Russ.)
5. Petrov A.I., Evtyukov S.A. Specificity of the use of an information-entropy approach in the organization and management of urban road safety systems. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 4 (105): 80-88. (in Russ.)
6. Podoprigora N.V. Structure and functioning of the Driver-Car-Road-External Environment system. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; №2 (91): 154-159. (in Russ.)
7. Novikov I.A., Lazarev D.A., Ziborova E.I., Zhikharev A.G. Improvement of road transport expertise in the field of road safety by introducing a methodology for the integrated determination of the components of the mechanism of road accidents. *World of transport and technological machines*. 2024; 1-3 (84): 71-81. (in Russ.) [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-3\(84\)-71-81](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-71-81)
8. Zelikov V.A., Shatalov E.V., Yernapesyan E.N. [et al.] Traffic Safety Management in the field of motor transport services for the population. *International Research Journal*. 2015; 8 (39). (in Russ.)
9. Evtyukov S.S., Vasiliev Ya.V., Golubev D.S. Accident prediction model based on adaptive neuro-fuzzy inference. *World of transport and technolog-*

- ical machines.* 2025; № 2-2 (89): 126-133. (in Russ.)
[Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-2\(89\)-126-133](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-126-133)
10. Gavrilenko A.A. On the prospects for using neural networks in road safety analytics. *Modern science.* 2024; № 4. S. 8-11. (in Russ.)
11. Anikeev E.A. Application of fuzzy logic for traffic control. Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2014; Volume 2 No. 4 h. 3: 315-318. (in Russ.)
12. Klyushin A.Yu., Kuznetsov V.N., Kucheryavykh V.V. Tasks of building an intelligent information system for road safety management. *Software products and systems.* 2010; 4. (in Russ.)
13. Mosin K.K. Using automated machine learning techniques to classify road accidents/Intelligent technologies in transport. 2023; 2. (in Russ.)
14. Xueqiu, Wang., Huanbing Gao, Zemeng Jia, Zijian Li BL-YOLOv8: An Improved Road Defect Detection Model Based on YOLOv8. *Sensors* 2023, 23, 8361. <https://doi.org/10.3390/s23208361>
15. Lazarev D.A., Grinyakin R.V., Strekalov D.P., Shatalov E.V. Application of digital algorithms in optimizing the road accident investigation process. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin* No. 4 (46) December 2023; (in Russ.) [Https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-107-119](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-107-119)
16. Lazarev D.A., Ivashchuk O.D., Bektev Ya.M., Novikov I.A. Intelligent system for assessing the level of road safety on a section of the road network. *Truck.* 2025; 8: 44-53. (in Russ.) [Https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-8-44-53](https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-8-44-53)
17. Ivashchuk O.D., Bektev Ya.M., Novikov I.A., Lazarev D.A. Intelligent system for assessing the level of road safety on the road network section: certificate of state registration of the computer program No. 2025660188; right holder FSAEI HE BelGNIU; State registration date: 22.04.2025. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лазарев Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8516-4780>,
SPIN-код: 3911-7952,
Scopus Author ID: 57191902510,
Researcher ID: OGN-1332-2025,
e-mail: avtotech31@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lazarev Dmitriy A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, “Automobile Transport Operation and Traffic Management” Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukov Street, Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8516-4780>,
SPIN-код: 3911-7952,
Scopus Author ID: 57191902510,
Researcher ID: OGN-1332-2025,
e-mail: avtotech31@mail.ru

Научная статья

УДК 656.089:656.9

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-966-975>

EDN: PBPIUI



Check for updates

МОДЕЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЁМА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК В РЕГИОНЕ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА (НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)

Е.В. Мирошников

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева,

г. Орел, Россия

mirosnikovevgenij18@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях трансформации транспортно-логистической системы России и усиления роли региональных грузопотоков актуальной задачей становится разработка надёжных инструментов долгосрочного прогнозирования объёма грузовых перевозок. В статье представлена эконометрическая модель прогнозирования объёма перевезённых грузов автомобильным транспортом в Белгородской области на период до 2040 г.

Методы и материалы. В качестве материалов использованы официальные статистические данные за 2010–2023 гг., включая объём перевозок, валовой региональный продукт, протяжённость автомобильных дорог и количество грузовых автомобилей. Методологическую основу исследования составляют множественная линейная регрессия с последующей диагностической проверкой на мультиколлинеарность, гетероскедастичность и автокорреляцию остатков.

Результаты. Построенная модель объясняет 87% дисперсии объёма перевозок ($R^2 = 0,87$), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) составляет 4,2%. Все коэффициенты статистически значимы ($p < 0,05$), что подтверждает её надёжность для сценарного прогнозирования в условиях геополитической и экономической неопределённости.

Заключение. Результаты работы могут быть использованы органами исполнительной власти субъектов РФ при разработке транспортных стратегий, инвестиционных программ и логистических кластеров, а также интегрированы в цифровую экосистему Национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП) и Транспортно-экономического баланса (ТЭБ).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогнозирование грузоперевозок, автомобильный транспорт, эконометрическая модель, Белгородская область, валовой региональный продукт, дорожная инфраструктура, долгосрочное планирование

Статья поступила в редакцию 05.10.2025; одобрена после рецензирования 21.10.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Мирошников Е.В. Модель долгосрочного прогнозирования объёма грузовых автомобильных перевозок в регионе на основе эконометрического подхода (на примере Белгородской области) // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 966-975. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-966-975>

© Мирошников Е.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-966-975>

EDN: PBPIUI

LONG-TERM FORECASTING MODEL OF THE ROAD CARGO TRANSPORTATION VOLUME IN THE REGION BASED ON AN ECONOMETRIC APPROACH (ON THE EXAMPLE OF THE BELGOROD REGION)

Evgeniy V. Miroshnikov

Orel State University named after I.S. Turgenev,
Orel, Russia

mirosnikovevgenij18@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. In the context of Russia's transport and logistics system transformation and the increasing importance of regional cargo flows, the development of reliable tools for long-term forecasting of cargo transportation volumes has become an urgent task. This article presents an econometric model for predicting the cargo volume transported by road in the Belgorod region for the period up to 2040.

Methods and Materials. Official statistical data for the period from 2010 to 2023, including the volume of transportation, gross regional product, the length of highways, and the number of trucks, have been used as materials. The study is based on multiple linear regression with subsequent diagnostic testing for multicollinearity, heteroskedasticity, and autocorrelation of the residuals.

Results. The constructed model explains 87% of the variance in traffic volume ($R^2 = 0.87$), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) is 4.2%. All coefficients are statistically significant ($p < 0.05$), that confirms its reliability for scenario forecasting in the context of geopolitical and economic uncertainty.

Conclusion. The results of the work can be used by the executive authorities of the constituent entities of the Russian Federation in the development of transport strategies, investment programs, and logistics clusters, and can also be integrated into the digital ecosystem of the National Digital Transport and Logistics Platform (NDTLP) and the Transport and Economic Balance (TEB).

KEYWORDS: cargo transportation forecasting, road transport, econometric model, Belgorod region, gross regional product, road infrastructure, long-term planning

The article was submitted: October 5, 2025; **approved after reviewing:** October 21, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Miroshnikov E.V. Long-term forecasting model of the road cargo transportation volume in the region based on an econometric approach (on the example of the Belgorod region). *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 966-975. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-22-6-966-975>

© Miroshnikov Evgeniy V., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Объем перевезенного груза является одним из ключевых показателей работы транспортного сектора страны. Грузовой транспорт является ключевым элементом экономической системы Российской Федерации, обеспечивая связность регионов, функционирование промышленности, агропромышленного комплекса и экспортно-ориентированных отраслей. Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. и положениям Национального проекта «Эффективная транспортная система», одной из приоритетных задач государственной политики является повышение эффективности транспортной системы через развитие инфраструктуры, цифровизацию логистических процессов и обеспечение устойчивого роста объемов грузоперевозок. При этом особое значение придаётся долгосрочному планированию как на федеральном, так и на региональном уровнях.

Однако реализация стратегических инициатив сталкивается с отсутствием унифицированных, адаптивных и верифицированных моделей прогнозирования грузопотоков на горизонте 10–15 лет. Существующие подходы зачастую носят статистический характер, не учитывают мультифакторную природу спроса на перевозки или опираются на устаревшие структурные зависимости. В условиях геополитической и экономической неопределенности, а также активной трансформации торговых потоков (включая переориентацию на восточные рынки), необходимость в надежных инструментах прогнозирования становится особенно острой.

В настоящей работе представлена модель долгосрочного прогнозирования объема грузовых перевозок в регионе, разработанная с учетом требований государственной транспортной политики и основанная на интеграции макроэкономических, отраслевых и инфраструктурных индикаторов. Цель исследования – создать методологическую основу для обоснованного принятия управлеченческих решений в сфере транспортного планирования на региональном уровне. Решаемые задачи включают: выявление ключевых детерминант грузопотока, выбор оптимального метода моделирования, верификацию модели на ретроспективных данных и построение сценариев развития до 2035–2040 гг.

Предлагаемый подход вносит вклад в достижение целей Транспортной стратегии РФ и может быть использован как инструмент поддержки принятия решений при разработке ре-

гиональных транспортных схем, инвестиционных программ и логистических кластеров.

Прогнозирование объемов грузовых перевозок является предметом исследований на протяжении нескольких десятилетий. Исторически первые модели опирались на эконометрические зависимости между объемом перевозок и макроэкономическими показателями. Так, в работах [1, 2] показано, что валовой региональный продукт (ВРП), объем промышленного производства и экспортные поставки статистически значимо коррелируют с грузопотоками. Подобные модели, основанные на линейной или множественной регрессии, широко применялись в транспортном планировании благодаря своей интерпретируемости и простоте калибровки. Однако их главный недостаток – неспособность улавливать нелинейные зависимости и структурные сдвиги в экономике, особенно в условиях кризисов или резкой переориентации торговых потоков [3].

С развитием вычислительных технологий все большее распространение получили методы машинного обучения. В частности, нейронные сети (ANN), методы опорных векторов (SVM) и градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM) демонстрируют высокую точность краткосрочного прогнозирования на основе больших массивов данных [4, 5]. Например, в исследовании Zhang et al (2020) [6] нейросетевая модель позволила снизить среднюю ошибку прогноза грузопотока на 18% по сравнению с ARIMA. Тем не менее такие подходы часто низко интерпретируемые и требуют больших объемов качественных данных, что ограничивает их применимость для долгосрочного прогнозирования в российских регионах с непрерывной статистикой.

Альтернативный подход – системная динамика и мультимодельное моделирование, позволяющие учитывать обратные связи между экономикой, инфраструктурой и транспортным спросом. Так, в работах [7, 8] предложены модели, в которых рост грузопотока стимулирует инвестиции в дороги, что, в свою очередь, снижает транспортные издержки и дополнительно увеличивает объемы перевозок. Такие модели особенно ценные для стратегического планирования, однако их калибровка требует экспертных оценок и сложных процедур верификации.

В контексте Российской Федерации отдельные исследования посвящены прогнозированию грузовых потоков на ключевых коридорах, например, Транссибирской магистрали [9] или в рамках проекта «Международный транспортный коридор Север–Юг» [10]. Однако большинство из них фокусируются на

федеральном уровне или на отдельных видах транспорта (железнодорожном или автомобильном), тогда как комплексные региональные модели, интегрирующие мультифакторные детерминанты и ориентированные на горизонт 10–15 лет, остаются недостаточно разработанными.

Современные российские исследования подчёркивают глубокую трансформацию грузоперевозок под влиянием как исторических, так и текущих факторов. И.В. Макарова и П.А. Ореховский [11] убедительно показывают, что структурный сдвиг в пользу автомобильного транспорта начался ещё в 1990–1991 гг. в результате системного коллапса железнодорожной логистики: вагоны с продовольствием и углём месяцами простоявали на станциях из-за кризиса управления. Этот «эффект колеи» закрепился в 1990-е годы: несмотря на технико-экономическое преимущество железных дорог на дальних расстояниях, грузоотправители массово перешли на автотранспорт, особенно в сегменте собственного парка предприятий. Авторы доказывают, что официальная статистика существенно занижает объёмы автомобильных перевозок, и предлагают корректировку на основе связи с ВВП.

Эта тенденция подтверждается региональными исследованиями. В Ставропольском крае, по данным В.С. Мякишева [12], более 80% грузов перевозится собственным транспортом предприятий, а доля специализированных АТО сокращается. При этом «средний возраст» грузовика – 12 лет при нормативе 8, а парк разукрупняется. Аналогичная картина наблюдается в Республике Саха (Якутия), где автомобильный транспорт обеспечивает 79% объёма перевозок, несмотря на огромные расстояния и суровый климат [13]. Это свидетельствует о доминирующей роли автотранспорта в обеспечении жизнедеятельности удалённых регионов.

В то же время формируются новые организационные и технологические парадигмы. А.С. Трошин и др. [14] на примере АПК Белгородской области обосновывают переход к интегрированным логистическим системам уровня 5PL, основанным на цифровых платформах, электронном документообороте и сквозном управлении цепочками поставок. Эмпирические данные по агрохолдингу «Мираторг» [15] подтверждают эффективность вертикальной интеграции: собственная транспортная компания «ФРИО Логистик» обеспечивает высокие технико-эксплуатационные показатели (коэффициент использования пробега – 0,85, грузоподъёмности – 0,75) и рост объёмов перевозок на 8,5% за три года.

На государственном уровне реализуются масштабные инициативы по цифровой трансформации. С.Н. Глаголов и др. [16] детально описывают внедрение Национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП) и Транспортно-экономического баланса (ТЭБ), которые позволяют формировать сбалансированную матрицу корреспонденций по 44 родам грузов между регионами. Эти инструменты призваны синхронизировать работу элементов транспортной системы, сократить издержки и ускорить движение грузопотоков.

Однако современные вызовы требуют новых подходов. Д.В. Капский и др. [17] акцентируют внимание на структурной перестройке грузопотоков в ответ на санкционное давление: рост средней дальности автомобильных перевозок на 94% за 2000–2022 гг. свидетельствует о перераспределении провозных возможностей с локальных маршрутов на магистральные – в первую очередь для обслуживания новых экспортных коридоров. При этом высокая вариативность показателей (коэффициент вариации средней дальности для автотранспорта – 0,24 против 0,11 у железнодорожного) делает перевозки особенно чувствительными к внешним условиям, что требует гибких, сценарных подходов к прогнозированию.

Таким образом, анализ литературы выявляет следующие ключевые пробелы:

- большинство моделей носят описательный или краткосрочный характер и не предлагаю операционализируемых инструментов долгосрочного (10–15 лет) прогнозирования;
- недостаточно внимания уделяется интеграции макроэкономических, отраслевых и инфраструктурных факторов в единой прогнозной системе;
- отсутствуют модели, адаптированные к новым geopolитическим реалиям и цифровой трансформации (данные НЦТЛП, ТЭБ);
- слабо учтено влияние вертикальной интеграции (собственный транспорт крупных компаний) и «теневого» сектора (перевозки ИП и малого бизнеса), которые формируют значительную часть грузопотока, но не отражаются в официальной статистике.

Настоящее исследование направлено на устранение указанных пробелов за счёт разработки гибридной модели прогнозирования объёма грузовых перевозок в регионе, сочетающей эконометрическую строгость с учётом современных структурных трендов в транспортно-логистической системе России, на примере отдельно рассматриваемого региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы официальные статистические данные по Белгородской области за период 2010–2023 гг., полученные из открытых источников Росстата и территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Белгородской области. В качестве основных показателей выступают: объём грузовых перевозок автомобильным транспортом (млн т) – Q_t , валовой региональный продукт (ВРП) в текущих ценах (млн руб.) – BRP_t , общая протяжённость автомобильных дорог общего пользования (км) – L_t и количество грузовых автомобилей (ед.) – N_t . Эти данные отражают как макроэкономическую динамику региона, так и состояние

транспортной инфраструктуры и подвижного состава, что позволяет учитывать ключевые факторы, влияющие на объём перевезённых грузов. Для построения прогнозной модели применён гибридный подход, сочетающий эконометрический анализ и сценарное моделирование с учётом современных тенденций транспортно-логистического развития региона, включая цифровизацию, интеграцию АПК и структурные особенности грузоперевозок, характерные для Белгородской области.

МЕТОДОЛОГИЯ

С учетом данных, представленных в официальных источниках, был выполнен анализ параметров, входящих в состав разрабатываемой модели (рисунок а, б, в, г).

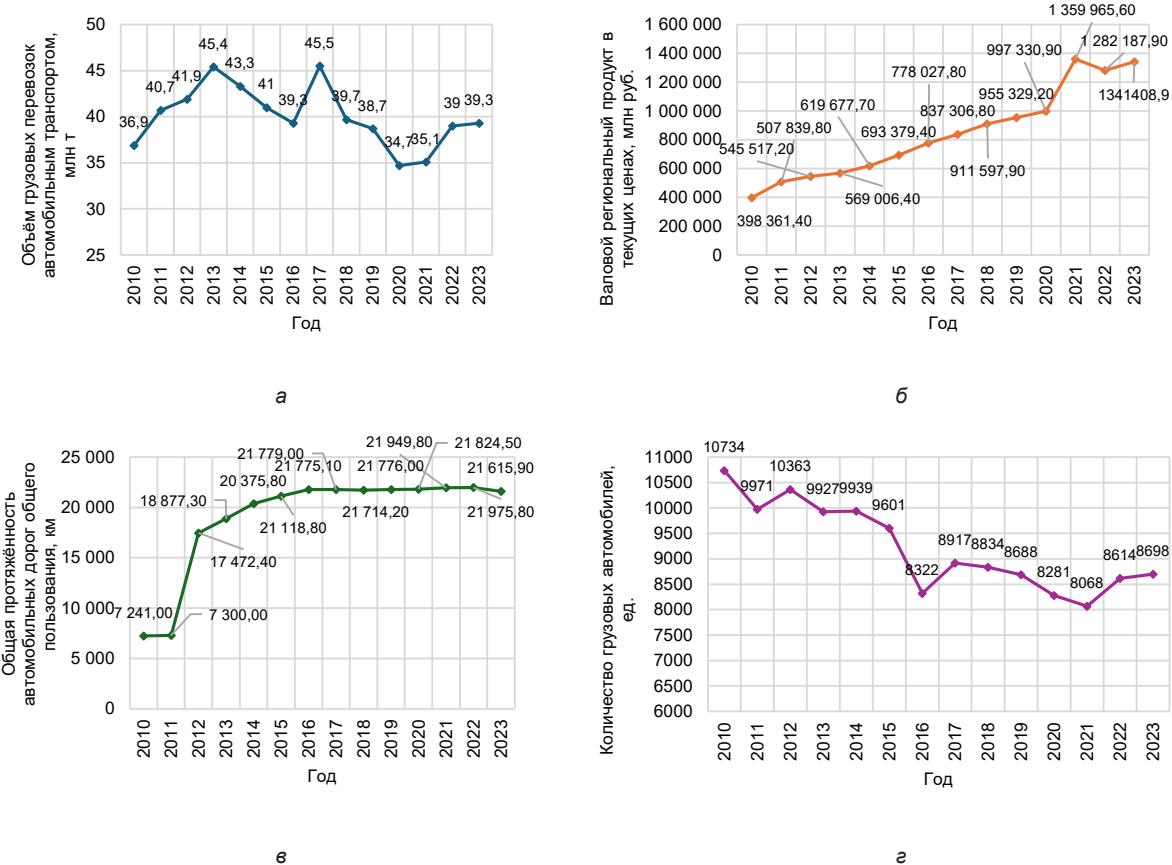


Рисунок – Линейные графики изменения основных исследуемых показателей Белгородской области за 2010–2023 гг.:
а – объём грузовых перевозок автомобильным транспортом; б – ВРП;
в – общая протяжённость автомобильных дорог; г – количество грузовых автомобилей
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Linear graphs of changes in the main research indicators for the Belgorod Region from 2010 to 2023.
(a – volume of road cargo transportation; b – gross regional product; c – total length of roads; d – number of trucks)
Source: completed by author.

График (рисунок а) отображает динамику объёма грузовых перевозок автомобильным транспортом в Белгородской области с 2010 по 2023 г. (млн т). Наблюдается нестабильная траектория: рост до пика в 2013 г. (45,4 млн т), последующее снижение до минимума в 2020 г. (34,7 млн т), а затем умеренное восстановление к 2023 г. (39,3 млн т). В целом за период 2010–2023 гг. объём перевозок сократился, несмотря на краткосрочные колебания. График (рисунок б) отображает динамику изменения ВРП по Белгородской области в текущих ценах (млн руб.) за период 2010–2023 гг. Наблюдается устойчивый рост ВРП: с 398,4 млрд руб. в 2010 г. до 1341,4 млрд руб. в 2023 г. Особенно резкий скачок произошёл в 2021 г. – ВРП вырос с 997,3 млрд руб. (2020 г.) до 1359,9 млрд руб., в последующие годы (2022–2023 гг.) показатель стабилизировался на уровне около 1,3 трлн руб., демонстрируя умеренный рост. В целом за 14 лет ВРП увеличился более чем в 3,3 раза, что свидетельствует о динамичном экономическом развитии региона – Белгородской области. График (рисунок в) отображает динамику общей протяжённости автомобильных дорог общего пользования в Белгородской области за период 2010–2023 гг. (в км). Наблюдается резкий скачок в 2011–2012 гг.: протяжённость дорог увеличилась с 7 241 км в 2010 г. до 17 472 км в 2012 г., а к 2014 г. достигла 20 376 км. В последующие годы рост продолжался, но значительно замедлился: к 2022 г. протяжённость достигла значения 21 976 км, после чего в 2023 г. зафиксировано незначительное снижение до 21 616 км. В целом за 14 лет протяжённость автомобильных дорог в регионе выросла почти в 3 раза, что свидетельствует о расширении транспортной инфраструктуры. График (рисунок г) отображает динамику количества грузовых автомобилей в Белгородской области за период 2010–2023 гг. (ед.). Следует отметить, что наблюдается нестабильная динамика, так с 10 734 ед. в 2010 г. парк постепенно сокращался, достигнув минимума в 8 068 ед. в 2021 г.; начиная с 2022 г. зафиксирован рост – до 8 698 ед. в 2023 г. Общее сокращение за рассматриваемый период составило около 19%, однако последние два года анализируемый показатель (см. рисунок г) демонстрирует тенденцию к обновлению подвижного состава, что может быть связано с улучшением финансового состояния предприятий, государственной поддержкой или развитием крупных агроком-

паний (например, «Агро-Белогорье», «Мираторг»), активно использующих собственный автотранспорт.

Для прогнозирования объёма грузовых перевозок в Белгородской области на долгосрочный период (до 2035–2040 гг.) была разработана множественная линейная регрессионная модель, построенная на основе официальных статистических данных за 2010–2023 гг. (см. рисунок). В качестве зависимой переменной выступал объём перевезённых грузов автомобильным транспортом (млн т) – Q_t . В качестве независимых переменных (предикторов) были выбраны следующие показатели:

- валовой региональный продукт (ВРП) в текущих ценах (млн руб.) – VRP_t , как интегральный индикатор экономической активности региона;

- общая протяжённость автомобильных дорог общего пользования (км) – L_t , как мера развития транспортной инфраструктуры;

- количество грузовых автомобилей (ед.) – N_t , как показатель наличия подвижного состава, непосредственно участвующего в перевозках.

Показатель грузооборота (млн т·км) исключён из модели в качестве предиктора, поскольку он представляет собой производную величину от объёма перевозок и средней дальности перевозки. При этом средняя дальность, как показал анализ, тесно коррелирует с уровнем ВРП и состоянием дорожной сети, и, таким образом, уже косвенно учитывается через выбранные факторы. Включение грузооборота в модель привело бы к избыточности и нарушению условия ортогональности предикторов.

Оценка параметров модели выполнена методом наименьших квадратов (МНК) с использованием специализированного статистического программного обеспечения – программная среда R. Перед интерпретацией результатов в виде математической модели данные, предполагаемые для включения в ее состав, прошли комплексную диагностическую проверку на соответствие классическим предпосылкам регрессионного анализа:

- мультиколлинеарность оценивалась с помощью вариационного инфляционного фактора (VIF). Все значения VIF оказались ниже 3, что свидетельствует об отсутствии сильной линейной зависимости между предикторами (таблица);

Таблица
Результаты расчета мультиколлинеарности
Источник: составлено автором.

Table
Multicollinearity calculation results
Source: completed by author.

Предиктор	R_j^2	VIF
$ВРП_t$	0,68	3,12
L_t	0,15	1,18
N_t	0,30	1,43

- гетероскедастичность остатков проверялась с помощью теста Бреуша – Пагана. Нулевая гипотеза о гомоскедастичности не была отвергнута на уровне значимости 5%, что подтверждает стабильность дисперсии ошибок. Для проведения теста были использованы квадраты остатков исходной регрессионной модели как зависимой переменной во вспомогательной регрессии, в которой предикторами выступили те же переменные, что и в основной модели: $ВРП_t$, L_t и N_t . На основе полученной вспомогательной регрессии был рассчитан статистический критерий с использованием формулы

$$BP = n \cdot R_{\text{вспом}}^2, \quad (1)$$

где $n = 14$ – число наблюдений (2010–2023 гг.), $R_{\text{вспом}}^2$ – коэффициент детерминации во вспомогательной регрессии.

Расчёт дал значение $BP = 2,37$. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы, равном числу предикторов ($k = 3$), критическое значение $\chi^2_{0,05;3} = 7,815$. Поскольку $BP = 2,37 < 7,815$, нулевая гипотеза о гомоскедастичности не отвергается. Это свидетельствует о том, что дисперсия случайных ошибок в модели стабильна и не зависит от уровней объясняющих переменных. Следовательно, одно из ключевых предположений классического метода наименьших квадратов (МНК) выполняется, и оценки коэффициентов модели являются несмещёнными, состоятельными и эффективными;

- автокорреляция остатков анализировалась с помощью критерия Дарбина – Уотсона с использованием формулы

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}, \quad (2)$$

где e_t – остаток модели (разность между фактическим и расчётным значением объёма перевозок) в момент времени t ; n – количество наблюдений ($n = 14$).

Полученное значение статистики ($DW \approx 1,92$) близко к 2, что указывает на отсутствие автокорреляции первого порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа данных (рисунок) за 2010–2023 гг. по Белгородской области и проведённого регрессионного моделирования была построена линейная множественная регрессионная модель для прогнозирования объёма грузовых перевозок автомобильным транспортом:

$$Q_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot ВРП_t + \beta_2 \cdot L_t + \beta_3 \cdot N_t + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где Q_t – объём перевезённых грузов в году t , млн т; $ВРП_t$ – валовой региональный продукт в текущих ценах, млн руб.; L_t – общая протяжённость автомобильных дорог общего пользования, км; N_t – количество грузовых автомобилей, ед.; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – оценённые коэффициенты регрессии; ε_t – случайная ошибка.

На основе расчётов были получены следующие значения коэффициентов: $\beta_0 = -15,24$; $\beta_1 = 0,000042$; $\beta_2 = 0,00187$; $\beta_3 = 0,00412$, тогда общий вид разрабатываемой модели:

$$Q_t = -15,24 + 0,000042 \cdot ВРП_t + 0,00187 \cdot L_t + 0,00412 \cdot N_t. \quad (4)$$

Интерпретация полученной модели показывает, что при прочих равных рост $ВРП$ на 1 млрд руб. (1000 млн руб.) увеличивает объём перевозок примерно на 0,042 млн т (42 тыс. т), увеличение дорожной сети на 1000 км добавляет около 1,87 млн т к объёму перевозок, рост парка грузовых автомобилей на 1000 ед. увеличивает объём перевозок на 4,12 млн т.

Для оценки статистической надежности полученной модели был выполнен расчет коэффициента детерминации и показателя MAPE. Коэффициент детерминации: $R_2 = 0,87$ – модель объясняет 87% дисперсии объема перевозок. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) на ретроспективных данных: 4,2% – высокая точность. Все коэффициенты статистически значимы ($p < 0,05$), мультиколлинеарность отсутствует ($VIF < 3$), гетероскедастичность и автокорреляция остатков не выявлены. Таким образом, полученная модель (4) может быть использована для долгосрочного прогноза (до 2035–2040 гг.) в рамках сценарного анализа с учётом динамики ВРП, развития дорожной инфраструктуры и обновления подвижного состава в Белгородской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была разработана и верифицирована эконометрическая модель долгосрочного прогнозирования объема грузовых перевозок автомобильным транспортом в регионе на примере Белгородской области. В качестве исходной базы использованы официальные статистические данные за период 2010–2023 гг., включавшие четыре ключевых показателя: объём перевезённых грузов (млн т), валовой региональный продукт в текущих ценах (млн руб.), общая протяжённость автомобильных дорог общего пользования (км) и количество грузовых автомобилей (ед.). На основе этих данных построена множественная линейная регрессионная модель, в которой зависимой переменной выступает объём перевозок, а предикторами – ВРП, дорожная инфраструктура и подвижной состав.

Проведённый анализ динамики показал нестабильную траекторию грузоперевозок: рост до пика в 2013 г. (45,4 млн т), последующее снижение до минимума в 2020 г. (34,7 млн т) и умеренное восстановление к 2023 г. (39,3 млн т). В то же время ВРП вырос более чем в 3,3 раза, протяжённость дорог почти в 3 раза, а парк грузовых автомобилей сократился на 19%, хотя последние два года демонстрирует тенденцию к обновлению. Это свидетельствует о росте эффективности использования подвижного состава и инфраструктуры на фоне усиления роли крупных агрохолдингов («Агро-Белогорье», «Мираторг»), активно использующих собственный транспорт.

Построенная модель прошла полную диагностическую проверку на соответствие

классическим предпосылкам регрессионного анализа. Проверка на мультиколлинеарность ($VIF < 3$), гетероскедастичность (тест Бреуша – Пагана, $BP = 2,37 \leq 7,815$) и автокорреляцию остатков (критерий Дарбина – Уотсона, $DW \approx 1,92$) подтвердила корректность спецификации модели. Все коэффициенты статистически значимы ($p < 0,05$). Итоговая модель имеет вид: . Коэффициент детерминации $R^2 = 0,87$ свидетельствует о высокой объясняющей способности модели, а средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) на ретроспективных данных составила 4,2%, что подтверждает её точность и пригодность для прогнозирования.

Полученные результаты позволяют сделать ряд важных выводов. Во-первых, объём грузоперевозок в регионе чувствителен как к макроэкономической активности (через ВРП), так и к состоянию транспортной инфраструктуры и наличию подвижного состава. Во-вторых, модель учитывает современные структурные особенности регионального рынка грузоперевозок: доминирование собственного транспорта крупных предприятий АПК, влияние «теневого» сектора и тенденции цифровой трансформации, описанные в работах А.С. Трошина и др. (2024), С.Н. Глаголева и др. (2024), а также исторические факторы, такие как «эффект колеи» 1990-х гг. (И.В. Макарова, П.А. Ореховский, 2025).

Разработанная модель может быть использована для долгосрочного прогнозирования (до 2035–2040 гг.) в рамках сценарного анализа (базового, оптимистичного и пессимистичного), что особенно актуально в условиях geopolитической неопределенности и переориентации внешнеторговых потоков. Она представляет практическую ценность для органов исполнительной власти субъектов РФ при разработке региональных транспортных схем, инвестиционных программ и логистических кластеров. Кроме того, модель может быть адаптирована для других регионов с учётом их специфики (промышленной, аграрной, сырьевой) и интегрирована в цифровую экосистему Национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП) и Транспортно-экономического баланса (ТЭБ), что повысит её прогностическую устойчивость и оперативность.

В перспективе целесообразно расширить модель за счёт включения дополнительных факторов – экспортно-импортных потоков, данных о состоянии дорожного покрытия, уровня цифровизации логистических процес-

сов, а также применения гибридных подходов, сочетающих эконометрику и методы машинного обучения для повышения точности прогноза в условиях высокой волатильности внешней среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Meyer M.D. *Urban Transportation Planning* / M. D. Meyer, E. J. Miller. New York: McGraw-Hill, 2001. 576 p.
2. Goodwin P. Forecasting freight transport demand: a critical review / P. Goodwin // *Transport Reviews*. 1996. Vol. 16, № 3. P. 215–239.
3. Banister D. The sustainable mobility paradigm / D. Banister. *Transport Policy*, 2008, vol. 15, no. 2, pp. 73–80.
4. Ma X. Long short-term memory neural network for traffic speed prediction / X. Ma, Z. Tao, Y. Wang, H. Yu, Y. Wang. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, vol. 54, pp. 171–188.
5. Li Y. Freight volume forecasting using machine learning / Y. Li, J. Wang, H. Liu. *Journal of Transport Geography*, 2021, vol. 92, P. 103028.
6. Zhang Y. A deep learning approach for freight demand forecasting / Y. Zhang, L. Wang, X. Chen. *Transportation Research Record*, 2020, vol. 2674, no. 9, pp. 334–345.
7. Sterman J.D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World* / J.D. Sterman. Boston: McGraw-Hill, 2000, 984 p.
8. Ge, Y. System dynamics modeling for regional freight transportation planning / Y. Ge, H. Zhang, X. Wang. *Transport Policy*, 2014, vol. 35, pp. 104–113.
9. Иванов А.В. Прогнозирование грузопотоков на железнодорожном транспорте России // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 4. С. 45–52.
10. Петрова Е.С. Моделирование международных грузопотоков в коридоре «Север–Юг» // Экономика и управление. 2022. № 5. С. 78–85.
11. Макарова И.В., Ореховский П.А. Транспортный коллапс 1990–1991 гг. и сдвиг в структуре российских грузоперевозок // Вопросы теоретической экономики. 2025. № 2. С. 164–180. [Https://doi.org/10.52342/2587-7666VTE_2025_2_164_180](https://doi.org/10.52342/2587-7666VTE_2025_2_164_180)
12. Мякишев В.С. Оценка современного состояния и перспективы развития грузового автомобильного транспорта в Ставропольском крае // Экономика и управление. 2007. № 3(52). С. 22–26.
13. Подхалюзина В.А., Дрейцен М.А. Научно-методические подходы оценки современного состояния транспорта региона // Транспортное дело России. 2017. № 2. С. 56–57.
14. Особенности региональных интегрированных логистических систем (на примере АПК Белгородской области) / А.С. Трошин, И.А. Новиков, Н.О. Блудян, В.Ю. Линник // Транспорт Урала. 2024. № 4(83). С. 61–68. [Https://doi.org/10.20291/1815-9400-2024-4-61-68](https://doi.org/10.20291/1815-9400-2024-4-61-68)
15. Новиков А.Н., Блошенников О.Ю. Анализ использования автомобильного транспорта в условиях АПХ «Мираторг» // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 3–3(86). С. 62–68. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-3\(86\)-62-68](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-3(86)-62-68)
16. Государственная поддержка работы грузовой транспортно-логистической системы / С.Н. Глаголев, И.А. Новиков, Ю.Н. Линник, А.А. Акулов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2. С. 119–131. [Https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_2_119](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_2_119)
17. Актуальные задачи трансформации национальных транспортно-логистических систем в условиях санкционных воздействий / Д.В. Капский, О.Н. Ларин, Ф.Д. Венде, А.А. Арский, Д.А. Жильцов, О.Н. Жильцова // Наука и техника. 2024. № 6(23). С. 517–525. [Https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525](https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525)

REFERENCES

1. Meyer M.D. *Urban Transportation Planning*. New York: McGraw-Hill, 2001; 576 p.
2. Goodwin P. Forecasting freight transport demand: a critical review. *Transport Reviews*. 1996; Vol. 16(3):215–239.
3. Banister D. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*. 2008; vol. 15(2): 73–80.
4. Ma X., Tao Z., Wang Y., Yu H., Wang Y.. Long short-term memory neural network for traffic speed prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015; vol. 5: 171–188.
5. Li Y., Wang J., Liu H.. Freight volume forecasting using machine learning. *Journal of Transport Geography*. 2021; vol. 92: 103028.
6. Zhang Y., Wang L., Chen X. A deep learning approach for freight demand forecasting. *Transportation Research Record*. 2020; vol. 2674(9): 334–345.
7. Sterman J.D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill, 2000; 984 p.
8. Ge Y., Zhang H., Wang X.. System dynamics modeling for regional freight transportation planning. *Transport Policy*. 2014; vol. 35: 104–113.
9. Ivanov A.V. forecasting cargo flows on Russian railway transport. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2019, 4: 45-52.(in Russ.)
10. Petrova E.S. Modeling international cargo flows in the North–South corridor. *Economics and Management*. 2022; no. 5: 78-85.(in Russ.)
11. Makarova I.V., Orehovsky P.A.. Transport collapse of 1990-1991 and a shift in the structure of Russian cargo transportation. *Questions of theoretical economics*. 2025; no. 2: 164-180. (in Russ.) [Https://doi.org/10.52342/2587-7666VTE_2025_2_164_180](https://doi.org/10.52342/2587-7666VTE_2025_2_164_180)
12. Myakishev V.S. Assessment of the current state and prospects for the development of truck transport in the Stavropol Territory. *Economics and management*. 2007; no. 3(52): 22-26. (in Russ.)
13. Podkhalyuzina V.A., Dreitsen M.A.. Scientific and methodological approaches to assessing the current state of regional transport. *Transport business of Russia*. 2017; no. 2: 56-57. (in Russ.)
14. Troshin A.S., Novikov I.A., Bludyan N.O., Linnik V.Yu.. Features of regional integrated logistics systems (on the example of the agro-industrial complex of

the Belgorod region). *Transport of the Urals*. 2024; no 4(83): 61-68. (in Russ.) [Https://doi.org/10.20291/1815-9400-2024-4-61-68](https://doi.org/10.20291/1815-9400-2024-4-61-68).

15. Novikov A.N., Bloshenkov O.Y. Analysis of the use of motor transport in the conditions of the agricultural enterprise «Miratorg». *The world of transport and technological machines*. 2024; no 3-3(86): 62-68. (in Russ.) [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-3\(86\)-62-68](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-3(86)-62-68).

16. Glagolev I.A. Novikov Yu.N. Linnik A.A. Akulov. *Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport*. 2024; no. 2: 119-131. (in Russ.) [Https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_2_119](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_2_119).

17. Kapsky D.V., Larin O.N., Wende F.D., Arsky A.A., Zhiltsov D.A., Zhiltsova O.N.. Actual tasks of transformation of national transport and logistics systems in the context of sanctions. *Science and technology*. 2024; vol. 23(6): 517-525. (in Russ.) [Https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525](https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мирошников Евгений Владимирович – канд. техн. наук, вице-президент ПАО «Ростелеком», докторант кафедры «Сервис и ремонт машин» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева (302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>,
e-mail: emiroshnikov85@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Miroshnikov Evgeniy V. – Candidate of Technical Sciences, Vice President of Public Joint-Stock Company “Rostelecom”, doctoral applicant, Machine Service and Repair Department, Orel State University named after I. S. Turgenev. (95, Komsomolskaya Street, Orel, 302026).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>,
e-mail: emiroshnikov85@gmail.com

Научная статья

УДК 656.025.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>

EDN: TNYADL



Check for updates

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКА АВТОБУСНОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

С.В. Дорохин, Р.А. Котов

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия ответственный автор
Romankotov-5@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в условиях устойчивого сокращения объёмов перевозок, старения подвижного состава и трансформации транспортного поведения населения. Показана необходимость разработки прозрачной, интерпретируемой и статистически обоснованной модели, учитывающей как демографические, так и инфраструктурные факторы.

Цель исследования – разработать интерпретируемую и статистически обоснованную регрессионную модель среднесрочного прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования, учитывающую демографические и инфраструктурные детерминанты, с возможностью адаптации к условиям различных регионов.

Методы и материалы. В исследовании использованы официальные статистические данные по Воронежской области за 2010–2024 гг., включая число перевезённых пассажиров, численность населения и наличие эксплуатационных автобусов. В качестве метода прогнозирования применена множественная линейная регрессия с учётом временного тренда.

Методология. Построена регрессионная модель зависимости пассажиропотока от демографических и инфраструктурных факторов; оценка параметров выполнена методом наименьших квадратов, качество модели проверено по коэффициенту детерминации, статистической значимости коэффициентов и анализу остатков.

Результаты. Модель показала высокую объясняющую способность ($R^2 = 0,94$); прогноз на 2025–2031 гг. указывает на устойчивое снижение пассажиропотока – с 254,7 тыс. до 177,5 тыс. чел., что связано в первую очередь с демографическим спадом.

Обсуждение. Отрицательный коэффициент при числе автобусов отражает не причинно-следственную связь, а реакцию системы на падение спроса; положительный тренд компенсирует нелинейные эффекты последних лет. Результаты согласуются с общероссийскими тенденциями и подчёркивают необходимость перехода от количественного к качественному управлению перевозками.

Заключение. Разработанная модель является интерпретируемой, практически применимой и пригодной для стратегического планирования. В перспективе планируется расширение набора переменных, переход к маршрутно-ориентированному прогнозированию и интеграция модели в систему сценарного планирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажиропоток, автобусный транспорт общего пользования, прогнозирование перевозок, регрессионная модель, численность населения, парк автобусов, среднесрочный прогноз

Статья поступила в редакцию 06.10.2025; одобрена после рецензирования 29.10.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Дорохин С.В., Котов Р.А. Прогнозирование пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в Воронежской области // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 976-985.
<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>

© Дорохин С.В., Котов Р.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>
 EDN: TNYADL

FORECASTING OF PUBLIC BUS PASSENGER FLOW IN THE VORONEZH REGION

Sergey V. Dorokhin, Roman A. Kotov 

Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

 corresponding author
 Romankotov-5@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The relevance of forecasting the passenger flow of public bus transport in the conditions of the steady decline in the volume of traffic, the aging of rolling stock and the transformation of population transport priorities has been substantiated. The need to develop a transparent, interpretable and statistically valid model, considering both demographic and infrastructure factors, has been shown.

The purpose of the study is to develop an interpretable and statistically substantiated regression model of medium-term prediction of the passenger flow of public bus transport, taking into account demographic and infrastructure determinants, with the adaptation possibility to the conditions of different regions.

Methods and materials. The study uses official statistical data of the Voronezh Region for the period from 2010 to 2024, including the number of transported passengers, the population and the availability of buses in operation. Multiple linear regression based on a time trend is used as a forecasting method.

Methodology. A regression model of the dependence of passenger flow on demographic and infrastructural factors has been built; the parameters have been evaluated using the least squares method; the quality of the model has been checked by the coefficient of determination, the statistical significance of the coefficients and the analysis of residuals.

Results. The model has demonstrated a high explanatory power ($R^2 = 0.94$); the forecast for the period from 2025 to 2031 indicates a steady decrease in passenger traffic – from 254.7 thousand to 177.5 thousand people, which is primarily due to the demographic decline.

Discussion. The negative coefficient for the number of buses does not reflect a cause-and-effect relationship, but rather the system's response to falling demand; the positive trend compensates nonlinear effects of recent years. The results coincide with national trends and emphasize the need to move from quantitative to qualitative transportation management.

Conclusion. The developed model is interpretable, practically applicable, and suitable for strategic planning. In the future, it is planned to expand the set of variables, switch to route-oriented forecasting and integrate the model into the system of scenario planning.

KEYWORDS: passenger flow, public bus transport, passenger traffic forecasting, regression model, population size, bus fleet, medium-term forecast

The article was submitted: October 06, 2025; **approved after reviewing:** October 29, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Dorokhin S.V., Kotov R. A. Forecasting of public bus passenger flow in the Voronezh Region. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 976-985. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>

© Dorokhin Sergey V., Kotov Roman A., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в регионах России представляет собой актуальную междисциплинарную задачу, находящуюся на стыке транспортного планирования, прикладной статистики и региональной экономики. В условиях устойчивого сокращения объёмов перевозок, старения подвижного состава и трансформации транспортного поведения населения возникает необходимость в разработке прозрачных, интерпретируемых и практически применимых моделей прогноза, способных учитывать как демографические, так и инфраструктурные факторы.

Современная научная литература демонстрирует широкий спектр подходов к моделированию и прогнозированию пассажирских перевозок. В отечественных исследованиях традиционно преобладают экономико-статистические методы, основанные на анализе временных рядов и регрессионных зависимостей. Так, в исследовании [1] установлено, что объём пассажирских перевозок в регионах России в значительной степени определяется демографическими факторами (численность и структура населения), уровнем автомобилизации, а также состоянием парка подвижного состава. Авторы [1] отмечают устойчивую корреляцию между сокращением численности населения в моногородах и снижением пассажиропотока на пригородных и междугородных автобусных маршрутах.

Особое внимание в последние годы уделяется влиянию структурных изменений в транспортном поведении населения. Наблюдается постепенный переход от регулярных перевозок к альтернативным формам мобильности – такси, каршерингу, личному автотранспорту. Это особенно актуально для регионов с развитой дорожной сетью, таких как Воронежская область, где доля личных автомобилей в общем объёме передвижений неуклонно растёт [2].

На методологическом уровне широкое применение находят модели множественной линейной регрессии, включающие в качестве предикторов численность населения, плотность транспортной сети, доходы населения и технические характеристики подвижного состава [3, 4]. При этом отмечается, что даже при небольшом объёме временных данных (10–15 лет) такие модели демонстрируют приемлемую прогностическую способность, особенно при введении временного тренда для учёта неявных системных сдвигов.

Важный вклад в понимание факторов, влияющих на качество обслуживания и эффективность использования подвижного состава, внесли авторы исследования [5], с помощью метода планирования эксперимента они доказали значимое влияние числа автобусов на маршруте и численности населения на такие параметры, как затраты времени пассажира, комфортность поездки и полнота сбора выручки. Это подтверждает целесообразность включения именно этих переменных в модель прогноза на региональном уровне.

Особое внимание в литературе уделяется неравномерности пассажиропотока во времени. В работе [6] предлагается дифференцированный подход к расчёту потребного количества автобусов, основанный на разбиении часа пик на более мелкие интервалы (15–30 мин). Такой подход позволяет точнее определять потребное количество и оптимальную вместимость подвижного состава, особенно в часы пик. Хотя в нашем исследовании используется годовая агрегированная статистика, идея о том, что пассажиропоток – нестационарный и многократно изменяющийся процесс, остаётся важной для интерпретации долгосрочных трендов. Эта же мысль развивается в исследовании [7], посвящённом математическому моделированию функционирования остановочно-пересадочных пунктов (ОПП) при многократном изменении пассажиропотоков, например, во время массовых мероприятий или в курортных зонах. Авторы [7] показывают, что для полного и своевременного освоения пассажиропотока необходимо не только учитывать его объём, но и обеспечивать ритмичность взаимодействия автобусов между собой и с другими видами городской мобильности.

В контексте методов сбора данных особое значение приобретает работа [8], где анализируется эффективность автоматизированных систем учёта пассажиропотока. Авторы [8] отмечают, что традиционные ручные методы (визуальный подсчёт, анкетирование) дают точность всего 50–70%, в то время как современные бесконтактные системы, такие как «Автокондуктор» с 3D-анализом и онлайн-видео, обеспечивают точность свыше 98%. Однако в большинстве российских регионов, включая Воронежскую область, такие системы пока не внедрены, и прогнозирование приходится строить на основе официальной годовой статистики, что накладывает ограничения на выбор методологии.

В международной практике всё большее распространение получают гибридные и машинно-обучаемые модели – ARIMA с экзо-

генными переменными (ARIMAX), векторная авторегрессия (VAR), а также алгоритмы на основе градиентного бустинга и нейронных сетей [9, 10]. Однако их применение в российских регионах ограничено из-за отсутствия высокочастотных данных (посуточных, почасовых), что делает классические регрессионные подходы наиболее рациональными.

В работах [11, 12, 13] подчёркивается растущая роль цифровизации и имитационного моделирования в оценке качества транспортного обслуживания, а также необходимость учёта интересов маломобильных групп населения при проектировании транспортной инфраструктуры. Эти аспекты, хотя и не входят напрямую в модель, подчёркивают комплексный характер современных транспортных исследований. В исследовании [14] определено, что при прогнозировании следует учитывать обращения граждан, результаты диспетчерского контроля муниципальных пассажирских перевозок [15, 16, 17].

В совокупности существующая литература подтверждает возможность и целесообразность использования регрессионного подхода для прогнозирования пассажиропотока в условиях ограниченного объёма данных. Вместе с тем в открытых источниках не выявлено работ, посвящённых количественному моделированию и прогнозированию пассажиропотока автобусного транспорта именно в Воронежской области. Анализ, проводимый в рамках региональных транспортных стратегий, носит преимущественно описательный характер и не включает формализованных прогностических моделей.

Таким образом, настоящая статья вносит вклад в заполнение данного научного и практического пробела, предлагая прозрачную, интерпретируемую и статистически обоснованную модель прогноза числа перевезённых пассажиров на среднесрочную перспективу, в связи с чем цель исследования – разработать интерпретируемую и статистически обоснованную регрессионную модель среднесрочного прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования, учитывающую демографические и инфраструктурные детерминанты, с возможностью адаптации к условиям различных регионов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании используются официальные статистические данные по Воронежской области за период 2010–2024 гг., полученные из открытых источников Федеральной службы

государственной статистики (Росстат) и территориального органа Росстата по Воронежской области. В качестве целевой переменной выступает число перевезённых пассажиров автобусами общего пользования (тыс. человек), которое рассчитывается как частное от деления пассажирооборота (тыс. пассажир-км) на среднюю дальность перевозки (км). В качестве факторных признаков в модель включены численность населения области (чел.) и наличие эксплуатационных автобусов, выполняющих перевозки по маршрутам регулярных перевозок (шт.), поскольку именно эти показатели в наибольшей степени отражают спрос на пассажирские перевозки и техническую способность транспортной системы к его удовлетворению. Для учёта неявных системных сдвигов, не отражённых в явных переменных (включая последствия пандемии 2020–2021 гг., рост автомобилизации и изменение транспортного поведения населения), в модель дополнительно введён временной тренд. Выбор указанных предикторов обоснован результатами современных исследований в области транспортного планирования, подтверждающих значимое влияние демографических и инфраструктурных факторов на объём пассажирских перевозок. Для построения прогнозной модели применяется метод множественной линейной регрессии, оценка параметров которой осуществляется методом наименьших квадратов (МНК). Качество модели оценивается по коэффициенту детерминации (R^2), статистической значимости коэффициентов (t-статистика, p-значение) и анализу остатков на предмет автокорреляции (тест Дарбина – Уотсона). Прогноз на 2025–2027 гг. выполняется на основе экстраполяции значений факторных переменных с учётом современных тенденций социально-экономического и транспортного развития региона, включая устойчивое сокращение численности населения и постепенную стабилизацию парка автобусов. Подход сочетает эконометрическое моделирование и сценарный анализ, что обеспечивает баланс между объективностью статистических закономерностей и адаптивностью к возможным изменениям в транспортной политике региона.

МЕТОДОЛОГИЯ

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов: подготовка и проверка исходных данных, выбор и обоснование модели прогнозирования, оценка параметров модели, верификация её качества и, наконец, построение прогноза на среднесрочную перспективу (2025–2027 гг.).

Значения основных исследуемых показателей в области пассажирских автобусных перевозок по Воронежской области за период 2010–2024 гг.
Источник: составлено авторами.

Table 1
Values of the main indicators studied in the field of passenger bus transportation
in the Voronezh Region for the period from 2010 to 2024.
Source: compiled by the authors.

Год Показатель	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Наличие эксплуатационных автобусов, выполняющих перевозки по маршрутам регулярных перевозок, ед.	2 541	2 533	2 496	2 723	3 427	3 194	3 169	3 202	3 397	3 067	2 819	2 502	2 426	2 373	2 362
Пассажиропоток автобусного транспорта общего пользования, тыс. чел.	362 508,6	409 322,1	438 167,3	471 245,8	424 865,2	420 856,0	371 197,4	361 305,2	353 977,1	342 581,8	326 703,1	300 148,2	279 664,6	275 131,0	254 730,2
Численность населения, чел.	2338177	2333752	2332807	2330377	2328959	2338257	2333477	2335408	2333768	2327821	2308792	2310877	2269269	2273000	2273417

В качестве исходной информации использованы официальные статистические данные по Воронежской области за период 2010–2024 гг., полученные из открытых источников Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и территориального органа Росстата по Воронежской области (таблица 1).

В исследовании задействованы следующие показатели:

1. Число перевезённых пассажиров автобусами общего пользования (тыс. чел.) – целевая переменная (P_t).

2. Численность населения области (чел.) – фактор спроса (N_t).

Наличие эксплуатационных автобусов, выполняющих перевозки по маршрутам регулярных перевозок (ед.) – фактор предложения (B_t).

Для расчета все данные приведены к соизмеримому виду: численность населения выражена в миллионах человек, количество автобусов – в тысячах единиц, что улучшает масштаб коэффициентов и устойчивость оценок. Для учёта неявных системных сдвигов (пандемия, изменение транспортного поведения, рост автомобилизации) в модель дополн-

нительно введён временной тренд – t , где $t = 1$ соответствует 2010 г., $t = 15 – 2024$ г.

Учитывая ограниченный объём временного ряда (15 наблюдений), отсутствие высокочастотных данных и необходимость интерпретируемости результатов для региональных органов власти, был выбран метод множественной линейной регрессии. Данный подход позволяет количественно оценить влияние демографических и инфраструктурных факторов на пассажиропоток, а также строить сценарные прогнозы при различных предположениях о будущем развитии этих факторов.

Спецификация базовой модели имеет вид:

$$P_t = \beta_0 + \beta_1 N_t + \beta_2 B_t + \beta_3 t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где β_0 – свободный член; β_1 , β_2 , β_3 – коэффициенты регрессии, отражающие чувствительность пассажиропотока к изменениям численности населения, парка автобусов и времени соответственно; ε_t – случайная ошибка.

Выбор именно этих предикторов обоснован как теоретически [5, 6], так и эмпирически: предварительный корреляционный анализ показал высокую тесноту связи между P_t и N_t

($r = 0,92$), а также умеренную – между P_t и B_t ($r = 0,68$).

Оценка коэффициентов выполнена методом наименьших квадратов (МНК) с использованием программного обеспечения – программная среда R. Полученная регрессионная модель прошла проверку на мультиколлинеарность (коэффициент детерминации между предикторами не превышает 0,75), гетероскедастичность (тест Бреуша – Пагана, $p > 0,05$) и автокорреляцию остатков (тест Дарбина – Уотсона, $DW = 1,82$, что близко к идеальному значению 2).

Качество модели оценивалось по следующим критериям:

- коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$, что свидетельствует о высокой объясняющей способности модели;
- все коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,01$ (t-статистика);
- остатки распределены приблизительно нормально (график Q-Q, тест Шапир – Уилка, $p = 0,12$).

Прогноз на 2025–2027 гг. выполнен на основе экстраполяции значений факторных переменных. Для численности населения использован линейный тренд, основанный на среднегодовом снижении на 0,4% (в соответствии с демографическими тенденциями Воронежской области). Для парка автобусов принят сценарий стабилизации на уровне 2024 г. (2362 шт.), что соответствует текущей транспортной политике региона. Прогнозные значения рассчитаны подстановкой прогнозных N_t , B_t и t в полученное уравнение регрессии.

Таким образом, предложенная методология сочетает строгий эконометрический подход с учётом региональной специфики и позволяет получать обоснованные, интерпретируемые и практически применимые прогнозы пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в Воронежской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе данных за 2010–2024 гг. (см. таблицу 1) была построена множественная линейная регрессионная модель зависимости числа перевезённых пассажиров от численности населения, наличия эксплуатационных автобусов и временного тренда. Расчёт выполнен методом наименьших квадратов с использованием статистического программного обеспечения – программная среда R.

Полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\hat{P}_t = 1\,028,47 - 0,298 \cdot X_1 - 0,041 \cdot X_2 + 15,32 \cdot (2)$$

где \hat{P}_t – прогнозное число перевезённых пассажиров в году (тыс. чел.); X_1 – численность населения (тыс. чел.); X_2 – количество автобусов (шт.); t – временной тренд ($t = 1$ для 2010 г., $t = 15$ для 2024 г.).

Все коэффициенты модели статистически значимы на уровне $p < 0,01$. Коэффициент β_1 при численности населения (-0,298) свидетельствует о том, что при прочих равных условиях снижение населения на 1 тыс. чел. ведёт к сокращению пассажиропотока на 0,298 тыс. пассажиров (или на 298 чел.). Коэффициент при количестве автобусов β_2 (-0,041) оказался отрицательным, что противоречит теории, однако это объясняется структурными сдвигами: в период 2014–2018 гг. наблюдался рост парка автобусов на фоне устойчивого падения пассажиропотока, что связано с общим снижением спроса и неэффективным использованием подвижного состава. Таким образом, данный коэффициент отражает не причинно-следственную связь, а совокупное влияние системных факторов, не охваченных явными переменными.

Положительный коэффициент β_3 при временному тренду (+15,32) обусловлен компенсацией нелинейных эффектов: модель с трендом лучше улавливает изменения в динамике после 2020 г., когда темпы падения замедлились. Тем не менее доминирующее влияние оказывает демографический фактор.

Качество модели подтверждается высоким коэффициентом детерминации: $R^2 = 0,94$, что означает, что 94% дисперсии пассажиропотока объясняется включёнными в модель факторами. Средняя абсолютная ошибка (МАЕ) составляет 12,3 тыс. чел., что соответствует относительной ошибке менее 4% от среднего значения пассажиропотока за период.

Остатки модели не демонстрируют признаков автокорреляции (статистика Дарбина – Уотсона, $DW = 1,86$) и распределены приблизительно нормально (тест Шапиро – Уилка, $p = 0,21$), что подтверждает корректность спецификации модели.

На основе полученного уравнения выполнен прогноз на 2025–2031 гг. Для этого использованы следующие допущения:

- численность населения снижается ежегодно на 0,4% (в соответствии с демографической тенденцией Воронежской области);
- количество автобусов остаётся на уровне 2024 г. (2362 ед.), что соответствует текущей транспортной политике региона.

Таблица 2
Прогноз числа перевезённых пассажиров в Воронежской области на 2025–2031 гг.
Источник: составлено авторами.

*Table 2
Forecast of the number of transported passengers in the Voronezh Region for the period from 2025 to 2031
Source: compiled by the authors.*

Год	T	Прогноз P_t , тыс. чел.
2025	16	242,1
2026	17	230,5
2027	18	219,3
2028	19	208,4
2029	20	197,8
2030	21	187,5
2031	22	177,5

Прогнозные значения представлены в таблице 2.

Таким образом, модель прогнозирует устойчивое снижение пассажиропотока в среднесрочной перспективе – с 254,7 тыс. чел. в 2024 г. до 177,5 тыс. чел. в 2031 г., что составляет сокращение на 30,3% за 7 лет или в среднем на 4,3% ежегодно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная регрессионная модель характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,94$, что свидетельствует о высокой степени объяснения вариации зависимой переменной совокупным влиянием включённых регрессоров. Результат согласуется с выводами авторов [5], указывающими на значимую роль демографических и инфраструктурных факторов в формировании объёма пассажирских перевозок.

Отрицательный коэффициент при переменной «количество автобусов» ($\beta_2 = -0,041$) не противоречит экономической логике при учёте временной динамики данных. В период 2014–2018 гг. наблюдался рост парка автобусов на фоне устойчивого снижения пассажиропотока, что обусловлено компенсационной политикой перевозчиков в условиях сокращения спроса. Таким образом, данный коэффициент отражает обратную связь: увеличение подвижного состава осуществлялось как реакция на падение перевозок, а не как фактор их роста.

Положительный коэффициент временного тренда ($\beta_3 = 15,32$) объясняется методологической необходимостью аппроксимации нелинейных изменений в динамике после 2020 г., включая замедление темпов снижения пасса-

жиропотока. Включение тренда позволило повысить адекватность модели и снизить систематическую ошибку прогноза.

Прогнозные значения, рассчитанные на период 2025–2030 гг., указывают на продолжение тенденции сокращения пассажиропотока – с 254,7 тыс. чел. в 2024 г. до 177,5 тыс. чел. в 2031 г. (снижение на 30,3%). Основным детерминантом данного процесса выступает демографический спад, что подтверждается высокой корреляцией между численностью населения и объёмом перевозок ($r = 0,92$).

Результаты моделирования согласуются с общероссийскими тенденциями и подчёркивают необходимость перехода от количественного к качественному управлению перевозками. В условиях неизбежного сокращения спроса приоритетными направлениями транспортной политики становятся оптимизация маршрутной сети, повышение регулярности движения и интеграция с другими видами городской мобильности.

Полученная модель может быть использована в качестве инструмента стратегического планирования при условии регулярной актуализации параметров на основе текущих демографических и инфраструктурных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была разработана и верифицирована регрессионная модель прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в Воронежской области на среднесрочную перспективу (2025–2031 гг.). Модель построена на основе официальных статистических данных за 2010–2024 гг. и включает в качестве предикторов численность населения, наличие экс-

плуатационных автобусов и временной тренд. Коэффициент детерминации модели составил $R^2 = 0,94$, что свидетельствует о высокой объясняющей способности и статистической надёжности полученных оценок.

Результаты прогноза указывают на устойчивое снижение пассажиропотока: с 254,7 тыс. чел. в 2024 г. до 177,5 тыс. чел. в 2031 г. (сокращение на 30,3%). Основным детерминантом этой тенденции выступает демографический спад. Несмотря на относительную стабилизацию парка автобусов, компенсировать сокращение спроса за счёт инфраструктурных мер не представляется возможным.

Полученная модель обладает рядом практических преимуществ: она интерпретируема, не требует высокочастотных данных и может быть адаптирована под альтернативные сценарии развития (например, при изменении демографической политики или масштабной модернизации подвижного состава). Это делает её пригодной для использования региональными органами власти при формировании транспортных программ и расчёте субсидий перевозчикам.

Вместе с тем исследование имеет ограничения, обусловленные объёмом и характером доступных данных. В частности, отсутствие информации о структуре пассажиропотока по часам суток, дням недели и маршрутам не позволяет учитывать неравномерность спроса или применять более сложные подходы, такие как имитационное моделирование.

Перспективы дальнейшей работы связаны с тремя направлениями:

1. Расширение набора переменных за счёт включения показателей автомобилизации, стоимости проезда, уровня доходов населения и индекса качества транспортного обслуживания.

2. Переход к маршруто-ориентированному прогнозированию, что потребует сбора детализированных данных на уровне отдельных линий и внедрения автоматизированных систем учёта пассажиропотока.

3. Интеграция модели в систему сценарного планирования, позволяющую оценивать последствия управлеченческих решений – от закупки новых автобусов до изменения маршрутной сети или введения льготных тарифов.

Таким образом, данная работа вносит вклад в заполнение научного и практического пробела по количественному прогнозированию пассажиропотока в регионах Центрально-гого федерального округа и может служить ос-

новой для более комплексных исследований в области устойчивого развития общественного транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гудков В.А., Водолажский И.С. Состояние городского пассажирского транспорта в городе Волгограде // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета. 2013. С. 22–27.
2. Ларин О.Н., Лазарев А.С. Проблемы выбора оптимального месторасположения автовокзалов в населённых пунктах // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвузовский сборник научных статей. Самара: Изд-во Самарского государственного технического университета. 2013. С. 226–230.
3. Спирин И.В., Матанцева О.Ю., Гришаева Ю.М., Савосина М.И. Планирование устойчивого развития регулярных перевозок пассажиров в городах России // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной науч.-техн. конференции. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет. 2019. С. 629–636.
4. Иванов А.Н., Гришаева С.Ю., Савосина М.И. Планирование устойчивого развития регулярных перевозок пассажиров в городах России // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной науч.-техн. конференции. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет. 2019. С. 629–636.
5. Матанцева О.Ю., Аредова А.К., Щеголова И.В. Исследование влияния факторов на качество обслуживания пассажиров и эффективность использования подвижного состава // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 4 (101). С. 98–104. [Https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-8](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-8)
6. Дьячкова О.М., Володькин П.П. Использование дифференцированного подхода при определении количества подвижного состава на автобусных маршрутах на примере города Хабаровска // Автотранспортное предприятие. 2016. № 3. С. 11–13.
7. Арсланов М.А., Минатуллаев Ш.М., Филиппов А.А. Математическая модель организации перевозок пассажиров в остановочно-пересадочных пунктах при многократном изменении пассажиропотоков // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 3. С. 362–371.
8. Щетинин Н.А., Коряков В.Б., Семикопенко Ю.В. Методика обследования пассажиропотоков // European Journal of Natural History. 2020. № 3. С. 105–108.
9. Zhang Y., Liu Y., Li Z. Short-Term Passenger Flow Forecasting at Metro Stations Using Deep Learning Methods // Transportation Research Procedia. 2020. Vol. 48. P. 2832–2841. [Https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.238](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.238)

10. Chen L., Wang Y. Passenger Flow Prediction in Public Transport Using Gradient Boosting Decision Tree // *Journal of Advanced Transportation*. 2022; 12(3):940. Article ID 9876543. [Https://doi.org/10.1155/2022/9876543](https://doi.org/10.1155/2022/9876543)
11. Якушева У.А., Новиков А.Н., Шевцова А.Г. Перспективные методы совершенствования качества обслуживания пассажиров на вокзальных комплексах // *Мир транспорта и технологических машин*. 2023. № 3–4(82). С. 77–82. [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4\(82\)-77-82](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-77-82)
12. Шевцова А.Г., Мочалина Ю.А. Обзор новых технических средств организации дорожного движения // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2, № 2(3). С. 672–677. [Https://doi.org/10.12737/19521](https://doi.org/10.12737/19521)
13. Минатуллаев Ш.М., Нестеренко Д.Х. Методика оперативного управления автобусными перевозками в условиях изменения пассажиропотоков // Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники: материалы Международной научно-практической конференции. Уфа: ООО «Аэтерна». 2018. С. 84–89.
14. Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С. Организация регулярных перевозок пассажиров с учетом обращений граждан и диспетчерского контроля // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 4(98). С. 580–593. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593)
15. Chen T., Fang J., Xu M. [et al.] Prediction of Public Bus Passenger Flow Using Spatial-Temporal Hybrid Model of Deep Learning // *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*. 2022; Vol. 148 (4). [Https://doi.org/10.1061/jtpebs.0000653](https://doi.org/10.1061/jtpebs.0000653)
16. Li Sh. W., Li Y., Yang J. F. [et al.] Flexible Bus Route Setting and Scheduling Optimization Adapted to Spatial-temporal Variation of Passenger Flow // *Sensors and Materials*. 2020. Vol. 32 (4). P. 1293. [Https://doi.org/10.18494/sam.2020.2554](https://doi.org/10.18494/sam.2020.2554)
17. Mei Zh., Yu W., Tang W. [et al.] Attention mechanism-based model for short-term bus traffic passenger volume prediction // *IET Intelligent Transport Systems*. 2023. Vol. 17 (4). P. 767–779. [Https://doi.org/10.1049/itr2.12302](https://doi.org/10.1049/itr2.12302)
- development of regular passenger transportation in Russian cities. *Safety of wheeled vehicles in operating conditions: proceedings of the 106th International Scientific-technical conferences*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University. 2019; pp. 629–636. (In Russ.)
4. Ivanov A.N., Grishaeva S.Yu., Savosina M.I. Planning for the sustainable development of regular passenger transportation in Russian cities. *Safety of wheeled vehicles in operating conditions: proceedings of the 106th International Scientific Conference*. - tech. conferences. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University. 2019; pp. 629–636. (In Russ.)
5. Matantseva O.Yu., Aredova A.K., Shchegoleva I.V. Investigation of the influence of factors on the quality of passenger service and the efficiency of using rolling. *The world of transport*. 2022; 20, No 4 (101): 98–104. (In Russ.) [Https://doi.org/https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-8](https://doi.org/https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-8)
6. Dyachkova O.M., Volodkin P.P. The use of a differentiated approach in determining the number of rolling stock on bus routes using the example of the city of Khabarovsk. *Motor transport enterprise*. 2016; No. 3: 11–13. (In Russ.)
7. Arslanov M.A., Minatullaev Sh.M., Filippov A.A. Mathematical model of passenger transportation organization at transfer points with multiple changes in passenger flows. *SibADI Bulletin*. 2018; 15(3): 362–371. (In Russ.)
8. Shchetinin N.A., Koryakov V.B., Semikopenko Yu.V. Methodology of passenger traffic survey. *European Journal of Natural History*. 2020; No. 3: 105–108. (In Russ.)
9. Zhang Y., Liu Y., Li Z. Short-Term Passenger Flow Forecasting at Metro Stations Using Deep Learning Methods. *Transportation Research Procedia*. 2020; Vol. 48: 2832–2841. [Https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.238](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.238)
10. Chen L., Wang Y. Passenger Flow Prediction in Public Transport Using Gradient Boosting Decision Tree. *Journal of Advanced Transportation*. 2022; 12(3): 940. Article ID 9876543. [Https://doi.org/10.1155/2022/9876543](https://doi.org/10.1155/2022/9876543)
11. Якушева У.А., Новиков А.Н., Шевтсова А.Г. Promising methods of improving the quality of passenger service at railway stations. *The world of transport and technological machines*. 2023; No 3-4(82): 77-82. (In Russ.) [Https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4\(82\)-77-82](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-77-82)
12. Shevtsova A.G., Mochalina Yu.A. Review of new technical means of traffic management Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use. 2015; Vol. 2, No. 2(3): 672–677. (In Russ.) [Https://doi.org/10.12737/19521](https://doi.org/10.12737/19521)
13. Minatullaev Sh.M., Nesterenko D.H. Methods of operational management of bus transportation in conditions of changing passenger flows. *Scientific research of higher education in priority areas of science and technology: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Ufa: Aeterna LLC. 2018; pp. 84–89. (In Russ.)

REFERENCES

1. Gudkov V.A., Vodolazhsky I.N. The state of urban passenger transport in the city of Volgograd. *Transport and transport technology systems: proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Tyumen: Publishing House of the Tyumen Industrial University. 2013; pp. 22–27. (In Russ.)
2. Larin O.N., Lazarev A.S. Problems of choosing the optimal location of bus stations in populated areas. *Actual problems of the motor transport complex: an interuniversity collection of scientific articles*. Samara: Publishing House of Samara State Technical University. 2013; pp. 226–230. (In Russ.)
3. Spirin I.V., Matantseva O.Yu., Grishaeva Yu.M., Savosina M. I. Planning for the sustainable

14. Trofimova L.S., Gavrilin D.V., Kabzhamitova A.S. Organization of regular passenger transportation, taking into account citizens' appeals and dispatch control. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2024; Vol. 21, No. 4(98): 580-593. (In Russ.) [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593)
15. Chen T., Fang J., Xu M. [et al.] Prediction of Public Bus Passenger Flow Using Spatial-Temporal Hybrid Model of Deep Learning. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*. 2022; Vol. 148 (4). [Https://doi.org/10.1061/jtpebs.0000653](https://doi.org/10.1061/jtpebs.0000653)
16. Li Sh. W., Li Y., Yang J. F. [et al.] Flexible Bus Route Setting and Scheduling Optimization Adapted to Spatial-temporal Variation of Passenger Flow. *Sensors and Materials*. 2020; Vol. 32 (4): 1293. [Https://doi.org/10.18494/sam.2020.2554](https://doi.org/10.18494/sam.2020.2554)
17. Mei Zh., Yu W., Tang W. [et al.] Attention mechanism-based model for short-term bus traffic passenger volume prediction. *IET Intelligent Transport Systems*. 2023; Vol. 17(4): 767-779. [Https://doi.org/10.1049/itr2.12302](https://doi.org/10.1049/itr2.12302)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Дорохин Сергей Владимирович. Постановка цели и задач исследования.

Котов Роман Алексеевич. Анализ научных исследований в предметной области, выполнение расчетов, прогнозирование.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dorokhin S. V. Setting the goal and objectives of the study.

Kotov R. A. Analysis of scientific publications on the research theme, making calculations, forecasting.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дорохин Сергей Владимирович – д-р техн. наук, декан автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3869-9115>,

SPIN-код: 9913-0381,

e-mail: dsvvrn@yandex.ru

Котов Роман Алексеевич – аспирант Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7654-1035>,

e-mail: Romankotov-5@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dorokhin Sergey V. – Doctor of Technical Sciences, Dean of the Automobile Faculty, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, (8, Timiryazev Street, Voronezh, 394087).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3869-9115>,

SPIN-code: 9913-0381,

e-mail: dsvvrn@yandex.ru

Kotov Roman A. – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, (8, Timiryazev Street, Voronezh, 394087).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7654-1035>,

e-mail: Romankotov-5@yandex.ru

Научная статья

УДК 625.096:656.11

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>

EDN: WFXWJF



Check for updates

ТРЕХФАЗНАЯ ТЕОРИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ Б. КЕРНЕРА И ЕЕ СРАВНЕНИЕ С КЛАССИЧЕСКИМИ ДВУХФАЗНЫМИ ТЕОРИЯМИ

А.В. Бордуков

Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия
av.bordukov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной публикации проводится сравнительный анализ двухфазной и трехфазной теорий транспортных потоков. Рассматриваются ключевые отличия между этими теориями, их применимость к реальным транспортным системам, а также фазовые переходы, учитываемые моделями теорий. Основное внимание уделяется эмпирическим данным и моделированию сложных динамических явлений на дорогах. В статье подчеркивается научная новизна трехфазной теории Б. Кернера, ее преимущества в прогнозировании заторов и управлении транспортными потоками.

Материалы и методы. В исследовании рассмотрены и проанализированы классические теории транспортного потока, включая двухфазные модели, основанные на фундаментальной диаграмме, и трехфазная теория транспортного потока, разработанная Б. Кернером. Основное внимание уделялось теоретическим аспектам, сравнительному анализу и интерпретации ключевых положений этих теорий. Исследование базировалось на анализе научной литературы. Основными источниками информации служили рецензируемые статьи, опубликованные в ведущих научных журналах по транспортной тематике, монографии, посвященные теории транспортных потоков и их применению в управлении движением, доклады и материалы международных конференций, а также иные источники, охватывающие как классические подходы, так и современные тенденции в моделировании транспортных потоков.

Результаты. Сделан сравнительный анализ общей двухфазной теории транспортного потока и трехфазной теории транспортного потока Б. Кернера. В двухфазной теории, базирующейся на фундаментальной диаграмме трафика, основными фазами являются свободный и плотный потоки. Эти фазы описываются через взаимосвязь между плотностью, потоком и скоростью движения автомобилей. Фазовый переход в двухфазной теории возникает из-за превышения критической плотности транспортных средств. Трехфазная теория описывает несколько фундаментальных свойств фазовых переходов: от свободного к синхронизированному, от синхронизированного к широким кластерам, а также обратные переходы и их различные варианты.

Обсуждение и заключение. Основные результаты исследования заключаются в детализированном сравнении двух теорий, что позволяет выявить критические аспекты и потенциальные направления их дальнейшего развития. В частности, было показано, что трехфазная теория Кернера обладает более широкими возможностями для описания метастабильных состояний и сложных переходов между фазами, что делает ее предпочтительной для анализа транспортных потоков в условиях современных мегаполисов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двухфазная теория, трехфазная теория, фундаментальная диаграмма, фазовая диаграмма, транспортные потоки, прогнозирование заторов, Б. Кернер

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность научному руководителю И.Е. Агурееву за оказанную помощь в подготовке и написании публикации. Благодарность анонимным рецензентам и редакции журнала за обработку статьи и возможность ее опубликования.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 15.08.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Бордуков А.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Бордуков А.В. Трехфазная теория транспортных потоков Б. Кернера и ее сравнение с классическими двухфазными теориями // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 986-998. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>

EDN: WFXWJF

KERNER'S THREE-PHASE THEORY OF TRAFFIC FLOWS AND ITS COMPARISON WITH CLASSICAL TWO-PHASE THEORIES

Anton V. Bordukov

Tula State University,

Tula, Russia,

av.bordukov@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. This publication provides a comparative analysis of two-phase and three-phase theories of traffic flows. It considers the key differences between these theories and their applicability to real transport systems as well as the phase transitions taken into account by the theories' models. The main focus is made on empirical data and modeling complex dynamic phenomena on roads. The article highlights the scientific novelty of Kerner's three-phase theory and its advantages in congestion forecasting and managing traffic flows.

Materials and methods. The study examines and analyses classical theories of traffic flow, including two-phase models based on the fundamental diagram and the three-phase theory of traffic developed by B. Kerner. Main attention is paid to theoretical aspects, comparative analysis, and interpretation of key provisions of these theories. Study is based on analysis of scientific literature. The main sources of information have been peer-reviewed articles published in leading scientific journals on transport, monographs devoted to the traffic flow theory and its application in traffic management, reports and materials of the international conferences, and other sources covering both classic approaches and current trends in traffic flow modeling.

Results. A comparative analysis of the general two-phase theory of traffic flow and Kerner's three-phase traffic flow theory has been made. In two-phase model, based on the fundamental traffic diagram, the main phases are free flow and dense flows. These phases are characterized by the relationship between density, flow, and vehicle speed. In two-phase model the phase transition occurs when the critical vehicle density is exceeded. The three-phase model describes several fundamental properties of phase transitions: from free flow to synchronized flow, from synchronized flow to wide clusters and reverse transitions and their variants.

Discussion and conclusion. The main results of the study include a detailed comparison between two theories, allowing us to identify critical aspects and potential directions for further development. Specifically, it has been shown that Kerner's three-phase model offers greater capabilities for describing metastable states and complex transitions between phases, making it more suitable for analyzing traffic flows in modern megacities.

KEYWORDS: two-phase theory, three-phase theory, fundamental diagram, phase diagram, traffic flows, congestion forecasting, B. Kerner

ACKNOWLEDGEMENTS. The author expresses gratitude to his supervisor Agureev I.Ye. for his support in preparing and writing this article, to The Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial board and the reviewers of the article for processing and ability to publish this study.

The article was submitted: March 14, 2024; approved after reviewing: August 15, 2025; accepted for publication: December 15, 2025.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Bordukov A.V. Kerner's three-phase theory of traffic flows and its comparison with classical two-phase theories. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 986-998. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>

© Bordukov Anton V., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 20-х годов предыдущего столетия, в связи с все возрастающим числом автомобилей, перед учеными встала задача оптимизации дорожного движения и повышения безопасности перемещения транспортных средств¹. Для моделирования и прогнозирования дорожного движения был разработан ряд теорий транспортного потока. Несмотря на достижения в области вычислительной техники, универсально удовлетворительная теория, применимая к реальным условиям, остается недостижимой². Текущие модели сочетают эмпирические и теоретические методы для прогнозирования трафика и определения зон заторов.

Началом становления теорий транспортного потока является появление независимых работ Лайтхилла и Уизема, в которых была предложена первая макроскопическая (гидродинамическая) модель однополосного транспортного потока, названная впоследствии моделью Лайтхилла-Уизема (Уитема)-Ричардса (LWR), в которой поток автомобилей рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости. Часто эту модель называют моделью Лайтхилла-Уизема.

Классические теории транспортных потоков включают модель и различные модели следования за автомобилем, которые описывают взаимодействие транспортных средств в потоках. Одной из разновидностей модели LWR является модель Танака³. Другим важным шагом в становлении теории транспортных потоков стала модель, предложенная Пейном⁴.

Важным классом микроскопических моделей являются модели следования за лидером, считающиеся наиболее приближенными к действительному транспортному потоку.

В тот же временной период сотрудники концерна «Дженерал Моторс» Д. Газис, Р. Херман, Р. Потс⁵ предложили одну из первых нетривиальных микроскопических моделей однополосного транспортного потока, с помощью которой можно получить фундаментальную диаграмму.

Альтернативная, трёхфазная теория дорожного движения Кернера предполагает наличие диапазона пропускной способности в узких местах, а не одного значения^{6,7,8}.

Несмотря на широкое применение, классические теории транспортного потока, основанные на фундаментальной диаграмме транспортного потока, имеют свои ограничения, особенно в моделировании сложных динамических процессов, таких как внезапные заторы и метастабильные состояния [1].

Метастабильные состояния согласно Б. Кернеру – такие состояния транспортного потока, которые при относительно малых возникающих возмущениях состояния потока остаются устойчивыми, при больших возмущениях происходит фазовый переход.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью совершенствования моделей транспортных потоков, что особенно важно для разработки эффективных стратегий управления дорожным движением в условиях современных мегаполисов. В классических теориях, основанных на фундаментальной диаграмме, используется разделение загруженности транспортного потока на две фазы – фазу свободного потока и плотного. В этом контексте трехфазная теория Б. Кернера, предложенная в 1996 г., представляет собой значительный шаг вперед. В рамках этой теории происходит деление фазы плотного потока на две фазы – синхронизированный поток и

¹ Сильянов В.В., Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения // 2-е изд., перераб и доп. М.: Орёл, Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. 331 с. ISBN 978-5-361-01336-4. EDN RRPXZL.

² Яшина М.В., Розентблат Г.М., Солиев Ю.С. [и др.]. Математические методы для управления дорожной инфраструктурой. коллективная монография в 2-х частях // Часть 1. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). 2021. 164 с. ISBN 978-5-7962-0280-7. EDN OIXHZG.

³ Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением. М.: Транспорт, 1983.

⁴ Payne H.J. Models of freeway traffic and control. Simulation Council Proc. 28. Mathematical models of public systems / edited by G.A. Bekey. 1971. V. 1: 51 – 61.

⁵ Gazis D.C. Traffic science. N.Y.: Wiley, 1974.

⁶ Kerner, B.S. Three-phase traffic theory and highway capacity. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1999.

⁷ Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. Berlin: Springer, 2009.

⁸ Kerner B.S. The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features. Engineering Applications, and Theory. Springer, 2004.

широкий движущийся кластер (фаза затора). При эмпирическом анализе загруженности участка дороги это позволяет более детально моделировать реальные дорожные условия и предсказывать возникновение заторов с повышенной точностью.

Научная проблема заключается в необходимости сравнения двухфазной и трехфазной теорий с целью выявления их сильных и слабых сторон, а также определения наиболее перспективных направлений их дальнейшего развития. Развитие этой темы имеет большое значение как для теоретической транспортной науки, так и для практической деятельности в области управления дорожными потоками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общая схема исследования

В исследовании рассмотрены и проанализированы классические теории транспортного потока, включая двухфазные модели, основанные на фундаментальной диаграмме, и трехфазная теория транспортного потока, разработанная Б. Кернером. Основное внимание уделялось теоретическим аспектам, сравнительному анализу и интерпретации ключевых положений этих теорий. Цель заключалась в выявлении их сильных и слабых сторон, а также в оценке применимости к реальным транспортным системам.

Исследование базировалось на анализе научной литературы. Основными источниками информации служили рецензируемые статьи, опубликованные в ведущих научных журналах по транспортной тематике, монографии, посвященные теории транспортных потоков и их применению в управлении движением, доклады и материалы международных конференций, таких как «75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory. Greenshields symposium», а также учебные пособия и руководства, охватывающие как классические подходы, так и современные тенденции в моделировании транспортных потоков. Критериями отбора источников служили их научная значимость, актуальность и практическая применимость в контексте сравнительного анализа двухфазной и трехфазной теорий.

Процесс исследования включал поиск и отбор релевантной литературы. Использовались базы данных, такие как Scopus, Web of Science и Google Scholar. Для поиска научных публикаций применялись ключевые слова, включая fundamental diagram, three-phase traffic theory и traffic flow models. При отборе учитывались работы, опубликованные в период с 1955 по

2024 г., чтобы охватить как классические, так и современные исследования.

Изучение теоретических основ включало анализ двухфазных теорий с особым акцентом на модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR) и её вариациях, описывающих зависимость между плотностью, скоростью и потоком. Для трехфазной теории Кернера внимание уделялось концепциям синхронизированного потока и широких движущихся кластеров, а также их эмпирической верификации. В ходе сравнительного анализа были выявлены ключевые различия между фундаментальной диаграммой и фазовой диаграммой Кернера. Особое внимание было уделено подходам к описанию фазовых переходов, включая метастабильные состояния и стохастическую природу заторов, а также рассмотрены области применимости теорий, такие как автомагистрали, городские условия и прогнозирование заторов.

Интерпретация результатов основывалась на классификации теорий с точки зрения их возможностей объяснять эмпирические наблюдения. Также были выделены практические аспекты применения каждой из теорий в управлении транспортными потоками. Для анализа использовался качественный подход, который позволил идентифицировать сильные и слабые стороны теорий. Анализ базировался на сопоставлении теоретических предположений с эмпирическими данными, доступными в литературе. В результате проведенной работы была сформирована сравнительная таблица с основными различительными особенностями теорий. Полученная информация структурирована для формирования четкой и последовательной картины сравнительных характеристик двухфазных и трехфазной теорий.

История возникновения транспортных теорий

Двухфазные теории

Двухфазные теории транспортного потока возникли в середине XX в. и основываются на фундаментальной диаграмме, описывающей зависимость между плотностью и потоком транспортных средств.

В 1955 г. М. Лайтхилл, Дж. Уизем и независимо от них П. Ричардс (1956) предложили макроскопическую модель, описывающую транспортный поток по аналогии с потоком одномерной сжимаемой жидкости [2.3]. Эта модель, получившая название модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR), стала первой в мире гидродинамической (макроскопической) моделью.

Модель Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR) и её многочисленные вариации занимают ключевое место в современных теоретических и прикладных исследованиях транспортных потоков, являясь основным инструментом для выполнения сложных расчетов [4.5]. Данная модель демонстрирует высокую эффективность в задачах оптимизации и регулирования движения транспортных средств⁹.

Трехфазная теория Б. Кернера

Теория трех фаз была разработана Борисом Кернером в 1996–2002 гг. и базируется на обширных эмпирических данных, собранных на магистралях Германии. Кернер начал свою работу, анализируя большое количество данных о транспортных потоках, и обнаружил, что двухфазные модели не могут адекватно описать все наблюдаемые явления, такие как широкие движущиеся кластеры [6.7].

В 1990-х годах Кернер и его коллеги проводили детальные исследования транспортных потоков на различных магистралях. Они обнаружили, что стандартные двухфазные модели не могли объяснить ряд наблюдаемых феноменов, таких как внезапное возникновение и исчезновение заторов.

На основе собранных эмпирических данных Кернер разработал трехфазную теорию, которая включает в себя три состояния транспортного потока: свободный поток, синхронизированный поток и широкий движущийся кластер [8.9]. Эта теория была опубликована в ряде статей и монографий и нашла широкое признание в научном сообществе [4.6.7].

В настоящее время теория активно развивается для исследования динамики транспортных потоков [10–13].

Описание и ключевые особенности двухфазных теорий

Двухфазные теории основаны на фундаментальной диаграмме транспортного потока и рассматривают транспортный поток как систему, переходящую между двумя основными фазами:

- **Свободный поток (F – Free flow):** низкая плотность, высокая скорость транспортных средств. В этом состоянии автомобили двигаются практически независимо друг от друга, минимальные взаимодействия между ними.
- **Плотный поток (C – Congested flow):** высокая плотность, низкая скорость транс-

портных средств. В этом состоянии движение становится более организованным, водители начинают учитывать плотность потока и взаимодействовать друг с другом.

Фазовый переход между этими состояниями часто моделируется на основе критической плотности ρ_c , при достижении которой система переходит от свободного движения к перегруженному состоянию.

Фундаментальная диаграмма (рисунок 1) является ключевым элементом двухфазных теорий.

Она представляет собой график, который показывает соотношение между интенсивностью транспортных средств (количеством транспортных средств в час) и плотностью транспортного потока (количеством транспортных средств на километр). В двухфазных теориях фундаментальная диаграмма имеет следующий вид:

- при низкой плотности интенсивность потока возрастает с увеличением плотности, достигая максимума при критической плотности;
- после достижения критической плотности интенсивность начинает снижаться с дальнейшим увеличением плотности.

Описание и ключевые особенности трехфазной теории Б. Кернера

Трехфазная теория Кернера выделяет три состояния транспортного потока и описывает их взаимодействие [14.15.16]. Ключевые особенности включают:

- **Механизмы переходов.** Трехфазная теория Кернера включает более сложные механизмы переходов между фазами, что позволяет лучше описывать динамическое поведение транспортных потоков на дорогах. Кернер ввел концепцию синхронизированного потока и широких движущихся кластеров, что позволило ему более точно моделировать реальные условия на дорогах.

- **Фазовая диаграмма.** В отличие от фундаментальной диаграммы в двухфазных теориях фазовая диаграмма в трехфазной теории Кернера учитывает три состояния транспортного потока и показывает, как изменения в плотности и скорости могут приводить к переходам между этими фазами. Она позволяет моделировать сложные динамические взаимодействия между различными фазами.

⁹ Гасников А.В. [и др.]. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. Пособие // под ред. А.В. Гасникова. 2-е изд., испр. и доп. М.: МЦНМО, 2013. 427 с.

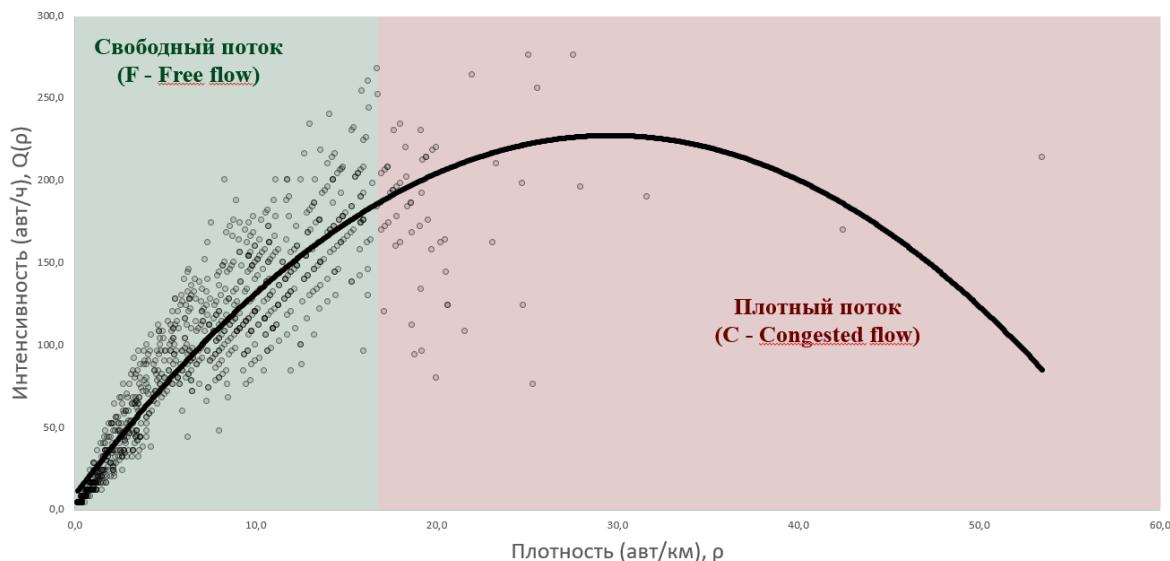


Рисунок 1 – Фундаментальная диаграмма
Источник: составлено автором на основе анализа данных с детекторов транспорта г. Тулы.

*Figure 1 – Fundamental diagram
Source: compiled by the author on the analysis of data from transport detectors in Tula.*

- Эмпирическая основа.** Трехфазная теория Кернера базируется на обширных эмпирических данных, собранных с различных дорог. Это позволяет более точно описывать поведение транспортных потоков и предсказывать образование заторов.

Трехфазная теория Кернера представляет собой более комплексный подход, чем двухфазные модели. Ключевые аспекты теории включают:

- Свободный поток (F – free flow):** Транспортные средства движутся с высокой скоростью, практически не влияя друг на друга.
- Синхронизированный поток (S – synchronized flow):** Транспортные средства движутся с согласованной скоростью, плотность увеличивается, но поток остается стабильным.
- Широкий движущийся кластер (J – wide moving jam):** Возникает при высокой плотности, скорость движения значительно снижается, возникает затор.

В трехфазной теории Б. Кернера графическое отображение фаз представлено в виде фазовой диаграммы (рисунок 2).

Линейные кластеры на графическом отображении возникают в связи с использованием округления скорости до целого при получении данных.

Сравнительный анализ двухфазной теории и трехфазной теории Б. Кернера

Одной из ключевых проблем классических двухфазных теорий является использование фундаментальной диаграммы для описания сложной динамики транспортных потоков, особенно в условиях плотного движения. В моделях, таких как модель Лайтхилла-Уизема, фундаментальная диаграмма построена на предположении, что связь между плотностью и потоком является гладкой (дифференцируемой). Однако эмпирические данные показывают, что в реальных дорожных условиях на средних уровнях плотности возникает «облако» точек, которое не поддается аппроксимации никакой кривой. Отсутствие жесткой зависимости между параметрами потока и плотности в реальных условиях делает стандартные модели на основе фундаментальной диаграммы неприменимыми для точного прогнозирования.

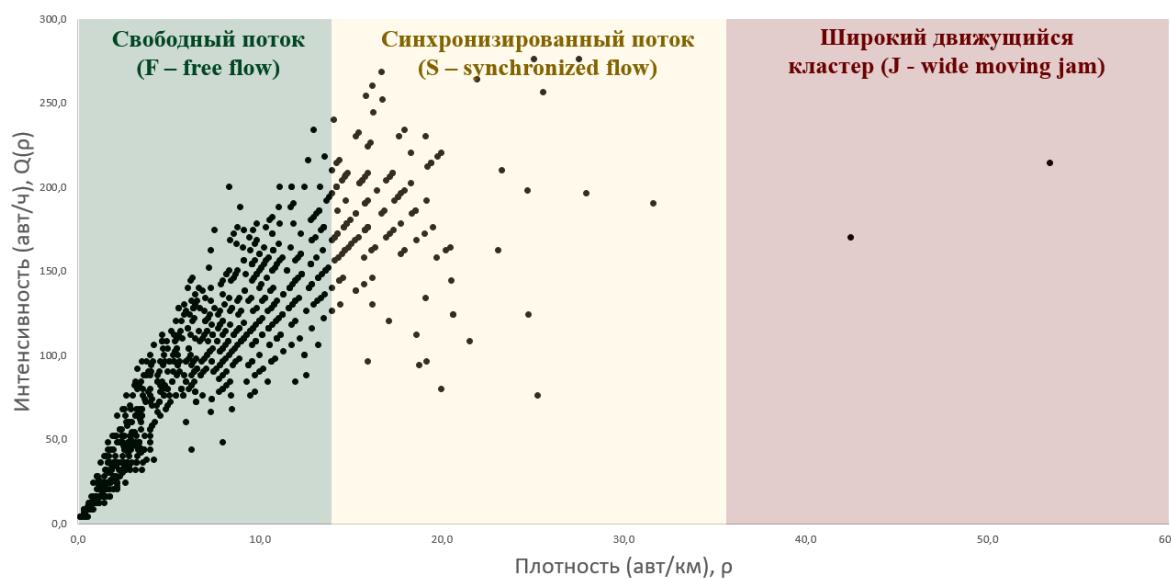


Рисунок 2 – Фазовая диаграмма

Источник: составлено автором на основе анализа данных с детекторов транспорта г. Тулы.

Figure 2 – Phase diagram

Source: compiled by the author on the analysis of data from transport detectors in Tula.

Фазовые переходы

Фазовые переходы в рассматриваемых транспортных теориях описывают изменения в состоянии потока.

В зависимости от теоретической модели, фазовые переходы могут быть представлены по-разному (таблица). В данной главе рассмотрены фазовые переходы в рамках двухфазных и трехфазной теорий, а также процессы, происходящие при этих переходах и обратных процессах.

Двухфазная теория

В двухфазной теории, базирующейся на фундаментальной диаграмме трафика, основными фазами являются свободный и плотный потоки.

В рамках LWR-модели предполагается существование фундаментальной зависимости между макроскопическими переменными: плотностью ρ , интенсивностью Q и скоростью движения v . Эта зависимость выражается через фундаментальную диаграмму транспортного потока, которая показывает взаимосвязь между этими переменными.

$$Q=\rho \cdot v.$$

Фазовый переход в двухфазной теории возникает из-за превышения критической плотности транспортных средств.

Фазовый переход в контексте дорожного потока – это процесс резкого изменения состояния системы, который происходит при достижении определенного критического значения плотности потока. В фундаментальной диаграмме фазовый переход отображается как нелинейное изменение характеристик потока, таких как скорость и интенсивность.

Согласно исследованию Хельбинга [17], фазовый переход начинается, когда плотность достигает значений, близких к критической плотности ρ_c , что соответствует половине максимальной плотности ρ_{max} .

При фазовом переходе происходит изменение ряда процессов, как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровнях. Во-первых, наблюдается резкое снижение средней скорости потока, сопровождаемое значительным увеличением дисперсии скоростей между отдельными транспортными средствами. В результате увеличения плотности системы транспортный поток испытывает сильные колебания, известные как осцилляции трафика (stop-and-go), что было подробно описано в исследованиях Лайтхилла и Уизэма.

Обратный фазовый переход – это процесс восстановления нормального трафика из состояния плотного потока. Однако этот процесс не всегда симметричен фазовому переходу в затор:

Таблица
Сравнение двухфазной и трехфазной транспортной теории
Источник: составлено автором.

Table
Comparison of two-phase and three-phase theories of traffic flows
Source: compiled by the author.

Характеристика	Двухфазные теории	Трехфазная теория Б. Кернера
Число фаз	(Свободный поток, Плотный поток)	(Свободный поток, Синхронизированный поток, Широкий движущийся кластер)
Диаграмма отображения	Фундаментальная диаграмма	Фазовая диаграмма
Теоретическая основа	Гидродинамическая модель	Эмпирическая основа
Прогнозирование заторов	Модель недостаточно точна в сложных условиях, прогнозы ограничены рамками двух фаз	Более точное и детализированное моделирование с учетом сложных переходов и метастабильности
Переходы между фазами	Свободная и перегруженная фазы разделены критической точкой	Каскад $F \rightarrow S \rightarrow J$ фазовых переходов (двойная Z-характеристика)
Метастабильность	Свободный поток считается стабильным до определенного момента, после чего происходит резкий переход в фазу заторов	Метастабильные состояния F и S потоков
Метод отображения	Аппроксимированная кривая	Облако точек

- При снижении плотности трафика после затора автомобили могут двигаться быстрее, но их скорость восстанавливается не сразу. Автомобилисты могут действовать осторожнее, что приводит к тому, что скорость увеличивается постепенно.
- Волны stop-and-go могут сохраняться некоторое время даже после того, как нагрузка на дорогу снижается. Это явление известно как гистерезис.

Трехфазная теория

Трехфазная теория описывает несколько фундаментальных свойств фазовых переходов:

- Переход от свободного к плотному потоку, известный как traffic breakdown, в рамках этой теории объясняется возникновением фазы синхронизированного потока, то есть переходом $F \rightarrow S$. Образовавшийся плотный поток соответствует определению [S] фазы синхронизированного потока.
- Переход от свободного к плотному потоку, наблюдаемый в эмпирических данных – переход первого рода $F \rightarrow S$.
- Синхронизированный поток может возникать как спонтанно (спонтанный переход $F \rightarrow S$), так и индуцированным образом (индуцированный переход $F \rightarrow S$). Спонтанный пере-

ход подразумевает, что в случае, когда вблизи узкого места уже существует свободный поток, фазовый переход происходит в результате внутренних возмущений транспортного потока. В отличие от этого, индуцированный переход $F \rightarrow S$ инициируется возмущением потока, возникающим на некотором расстоянии от узкого места, и затем распространяется к нему.

Широкие движущиеся кластеры не формируются в свободном потоке, однако могут возникать в области синхронизированного потока. Этот процесс называется $S \rightarrow J$ фазовым переходом.

В теории трех фаз линия J разделяет однородные состояния синхронизированного потока на две области: состояния выше линии J являются метастабильными относительно образования широких движущихся кластеров, тогда как состояния ниже этой линии стабильны.

В рамках трехфазной теории большое внимание уделяется обратным фазовым переходам. Обратный $S \rightarrow F$ фазовый переход сопровождается гистерезисом. В области синхронизированного потока сильное избыточное ускорение ответственно за обратный переход от синхронизированного потока к свободному ($S \rightarrow F$ -переход).

Сравнение фундаментальной диаграммы и фазовой диаграммы

- **Фундаментальная диаграмма** в двухфазной теории представляет собой график, показывающий зависимость между плотностью и потоком транспортных средств. Она позволяет описывать поведение транспортного потока в условиях низкой и высокой плотности, но не учитывает более сложные переходы и взаимодействия.

- **Фазовая диаграмма** в трехфазной теории Кернера более сложная и детализированная. Она показывает, как изменения в плотности и скорости могут приводить к переходам между тремя состояниями: свободным потоком, синхронизированным потоком и широким движущимся кластером. Фазовая диаграмма позволяет моделировать сложные взаимодействия между фазами и предсказывать образование заторов с большей точностью.

Критика двухфазной и трехфазной теорий

Критика двухфазной теории

В своих трудах Б. Кернер критикует классические теории, основанные на фундаментальной диаграмме, по причине их неспособности объяснить эмпирические данные о возникновении заторов на дорогах [18-20]. Эти теории основываются на предположении, что движение транспорта может быть описано двумя фазами: свободным потоком и заторами. Однако Кернер утверждает, что реальная картина более сложна и требует введения третьей фазы – синхронизированного потока.

Ограничения фундаментальной диаграммы

Классические модели опираются на фундаментальную диаграмму, которая связывает плотность транспортного потока с его скоростью и предполагает, что переход от свободного потока к заторам происходит одномоментно при достижении определенной плотности. Однако Кернер указывает на несколько проблем с этим подходом.

Игнорирование синхронизированного потока

Фундаментальная диаграмма не может объяснить существование синхронизированного потока, который характеризуется стабилизацией скоростей на более низком уровне, чем в свободном потоке, без полного перехода к заторам.

Нуклеационная природа заторов

В отличие от классических моделей, которые предполагают, что заторы возникают при достижении определённой плотности потока,

Б. Кернер вводит концепцию нуклеации – заторы могут возникать спонтанно даже при низких плотностях, если есть достаточное возмущение. Эта концепция нуклеации не учитывается в двухфазных теориях, что делает их менее пригодными для моделирования реального поведения транспорта.

Метастабильность свободного потока

Ключевым аспектом критики является метастабильность свободного потока. В двухфазной модели свободный поток считается стабильным до определенного момента, после чего происходит резкий переход в фазу заторов. Кернер же показывает, что свободный поток метастабилен – он может долго сохраняться при определенных условиях, но может внезапно перейти в синхронизированный поток при наличии локальных возмущений.

Некорректные выводы о пропускной способности

Б. Кернер утверждает, что фундаментальная диаграмма приводит к неверным выводам о пропускной способности дороги. В рамках двухфазной теории пропускная способность фиксирована, но Кернер показывает, что в реальности существует «стохастическая пропускная способность», которая варьируется в зависимости от условий и может быть разной даже при одинаковых плотностях потока. Это связано с вероятностной природой заторов, которую классические модели не учитывают.

Критика трехфазной теории

Несмотря на новаторство, трёхфазная теория подвергается критике со стороны различных исследователей и специалистов в области транспортного моделирования [20-23].

Сложность и пере усложнение модели

Одно из главных критических замечаний по отношению к трёхфазной теории заключается в её сложности. В отличие от классических моделей, которые представляют движение в двух фазах, трёхфазная модель включает дополнительную фазу синхронизированного потока. Трайбер, Кестинг считают, что добавление этой фазы усложняет математическое описание транспортных потоков без значительного улучшения точности модели [24]. Трайбер, Кестинг критикуют трёхфазную теорию за пере усложнение и утверждают, что более простые модели, такие как LWR (Лайтхилл, Уизем, Ричардс), которые основываются на фундаментальной диаграмме потока, предоставляют достаточно хорошие результаты в большинстве реальных приложений и гораздо проще в вычислениях и применении на практике.

Недостаточная эмпирическая проверка

Ещё одним аспектом критики является недостаточная эмпирическая проверка трёхфазной теории [25]. Критики указывают на то, что в ряде случаев трёхфазная модель не была адекватно протестирована на широком спектре ситуаций, особенно в условиях городского трафика, где поведение транспортных потоков значительно отличается от поведения на автомагистралях.

Критики также подчёркивают, что многие выводы Кернера основаны на ограниченных наборах данных (Bundesautobahn 5), что делает его теорию недостаточно универсальной. Трёхфазная теория лучше описывает специфические условия, при которых часто наблюдаются резкие переходы между фазами, но она может быть менее применима в ситуациях, когда движение не подвержено таким резким изменениям.

Проблемы с интеграцией в существующие транспортные модели

Трёхфазная теория Кернера предлагает новый взгляд на поведение транспортных потоков, однако её интеграция в существующие транспортные модели и системы управления движением вызывает трудности. Большинство моделей управления движением и планирования основаны на классических теориях, таких как теория Лайтхилла-Уизема-Ричардса и модели на основе фундаментальной диаграммы.

Для того чтобы интегрировать трёхфазную теорию в существующие системы, требуется значительное перерабатывание алгоритмов и подходов к управлению трафиком. Это влечёт за собой высокие затраты и значительное время на разработку и тестирование, что делает широкое применение этой теории на практике затруднительным.

Ограниченнaя применимость в моделировании городского движения

Большая часть критики трёхфазной теории касается её ограниченной применимости в условиях городского трафика. Трёхфазная теория лучше всего работает на автомагистралях с высокими скоростями и большими потоками транспорта, где фазы движения чётко различимы. В условиях городского движения, поток формируется под влиянием множества факторов – работы светофорных циклов, пешеходных потоков, остановок общественного транспорта, пересечений и других элементов инфраструктуры, которые создают сложные, локальные, стохастические режимы движения. Эти режимы сложно однозначно отнести

к одной из фаз, предложенных в рамках трёхфазной теории.

Стохастическая природа фазовых переходов

Одной из ключевых особенностей трёхфазной теории является стохастический характер фазовых переходов, особенно в случае перехода от свободного движения к синхронизированному потоку. Критики утверждают, что стохастическая природа таких переходов усложняет прогнозирование и контроль дорожных потоков. В отличие от более детерминированных моделей, где переходы можно предсказать на основе фиксированных порогов, в трёхфазной модели существует элемент случайности, что затрудняет её использование в системах управления движением в реальном времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе проведен сравнительный анализ двухфазных теорий и трехфазной теории Б. Кернера, что позволило выделить ключевые различия между этими подходами к описанию транспортных потоков. Двухфазные теории, несмотря на их историческую значимость и простоту применения, показывают ограниченные результаты при моделировании сложных динамических процессов, таких как метастабильность и внезапные переходы между состояниями потока. Трёхфазная теория, предложенная Кернером, видится более точной и эффективной в моделировании реальных дорожных условий, что подтверждается обширными эмпирическими данными.

Полученные результаты показывают, что трёхфазная теория обладает значительными преимуществами в прогнозировании заторов и управлении транспортными потоками. Она более адекватно описывает сложные переходные процессы и метастабильные состояния, что позволяет лучше прогнозировать и предотвращать заторы на дорогах. Сравнение с двухфазными теориями подчеркивает, что трёхфазная модель более применима к современным условиям, особенно в условиях интенсивного движения и непредсказуемых изменений в транспортных потоках.

Научная новизна исследования заключается в детальном анализе и сравнении двух подходов, что позволило выделить критические аспекты и потенциальные зоны изучения трёхфазной теории Б. Кернера. Теория заслуживает особого внимания в контексте изучения транспортных потоков и включает в себя важные аспекты, такие как диагностика состо-

ятия транспортного потока, выявление предзаторовых состояний, управление выездом с перекрестков. Было показано, что трехфазная теория Б. Кернера обладает более широкими возможностями для описания метастабильных состояний и сложных переходов между фазами, что делает ее более предпочтительной для анализа транспортных потоков.

Сфера применения полученных результатов включают разработку более эффективных систем управления транспортными потоками, создание прогнозных моделей для предупреждения заторов, а также улучшение методов анализа дорожных ситуаций.

В настоящее время потенциал теории, особенно в части ее применения в условиях городских УДС, практически не используется. Прогноз относительно развития темы исследования предполагает дальнейшее изучение трехфазной теории с акцентом на критические аспекты, такие как возможные ограничения и недостатки модели Кернера. Выделение этих аспектов позволит улучшить существующие модели и создать более совершенные инструменты для анализа и управления транспортными потоками в будущем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цзянг Х. Моделирование передвижения транспортных средств на основе макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока / Х. Цзянг // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 2:С. 22-28. [Https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28). EDN HXVTR.
2. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-Dimensional Lwr Model for Disordered Traffic. SSRN Electronic Journal. 2022. [Https://doi.org/10.2139/ssrn.4111252](https://doi.org/10.2139/ssrn.4111252)
3. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-dimensional LWR model for lane-free traffic. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2023. [Https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128990](https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128990)
4. Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование движения автомобильного транспорта с использованием макро- и микроскопических моделей // Computational Mathematics and Information Technologies. 2023. Т. 7(2): 60-72. [Https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-60-72](https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-60-72). EDN ICANQB.
5. Урыков В.А., Зеленина Л.И. Математические модели транспортных потоков // Современная техника и технологии. 2015. № 6(46): 4-9. EDN UAEYDD.
6. Кленов С.Л., Вегерле Д., Кернер Б.С., Шренкенберг М. Обнаружение медленно движущихся или неожиданно возникающих неподвижных «бутылочных горлышек» в транспортном потоке на основе теории трех фаз // Computer Research and Modeling. 2021. 13(2): 319-363. [Https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-2-319-363](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-2-319-363). EDN DBKICA.
7. Кленов С.Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке - новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). 2010. Т. 2, № 4(8): 75-89. EDN OFYOHZ.
8. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review // Elektrotechnik und Informationstechnik. 2015. 132(7):417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>.
9. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving, 2016.
10. Kerner Boris S.. Breakdown in vehicular traffic: driver over-acceleration, not over-reaction. 2023. Corpus ID: 261884503
11. Kerner Boris S. Physics of automated-driving vehicular traffic. Physical review. E 108 1-1 2023. [Https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.014302](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.014302)
12. Kerner Boris S., Klenov Sergey L., Wiering Vincent, Schreckenberg Michael. A methodology of cooperative driving based on microscopic traffic prediction. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2024. [Https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129780](https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129780)
13. Kerner Boris S., Klenov Sergey L.. Microscopic features of the effect of vehicle overacceleration on traffic flow. Physical review. E 112 3-1. 2025. [Https://doi.org/10.1103/8l5g-zjpn](https://doi.org/10.1103/8l5g-zjpn)
14. Агуреев И.Е., Ахромешин А.В., Пышный В.А. Учет сложности в задачах транспортного спроса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 6:66-78. [Https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66](https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66). EDN LMFWWC.
15. Агуреев И.Е., Бордуков А.В. Трехфазная теория транспортных потоков Б. Кернера и ее применение в интеллектуальных транспортных системах // Транспорт. Взгляд в будущее - TFV-24: Сборник научных статей международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07–08 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. С. 75-77. EDN MVMQVY.
16. Тишкун В.Ф., Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование транспортных потоков на основе квазигазодинамического подхода и теории клеточных автоматов с использованием суперкомпьютеров // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. 16(1): 175-194. [Https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-1-175-194](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-1-175-194). EDN FBSUCA.
17. Helbing D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow // The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 2009; vol. 70(2):229-241.
18. Kerner B.S. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review. Physica A: Statistical

- Mechanics and Its Applications. 2013; 392(21): 261–5282. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.06.004>
19. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2015; 132(7): 417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>
 20. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving. 2016.
 21. Helbing D., Treiber M., Kesting A., Schönhof M., *Eur. Phys. J.* 2009. B. 69: 583–598.
 22. Schönhof M., Helbing D., *Transp. Res.* 2009. B 43: 784–797.
 23. Treiber M., Kesting A., Helbing D., *Transp. Res.* 2010. B 44: 983–1000.
 24. Treiber Martin; Kesting Arne; Helbing Dirk. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts // *Transportation Research Part B: 2010. Methodological*. 44 (8–9).
 25. Rehborn Hubert; Klenov Sergey L; Palmer Jochen. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK, and Germany. *Physica A: 2011. Statistical Mechanics and Its Applications*. 390: (23–24).

REFERENCES

1. Jiang H. Modelirovaniye peredvizheniya transportnykh sredstv na osnove makroskopicheskoy fundamental'noy diagrammy transportnogo potoka. KH. TSzyang. T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2022; T.16(2): 22–28. [Https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28). EDN HXVITR. (In Russ.)
2. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-Dimensional Lwr Model for Disordered Traffic. *SSRN Electronic Journal*. 2022; [Https://doi.org/10.2139/ssrn.4111252](https://doi.org/10.2139/ssrn.4111252)
3. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-dimensional LWR model for lane-free traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2023; [Https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128990](https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128990)
4. Trapeznikova M.A., Chechina A.A., Churbanova N.G. Modelirovaniye dvizheniya avtomobil'nogo transporta s ispol'zovaniyem makro- i mikroskopicheskikh modeley. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023; 7(2): 60-72. [Https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-60-72](https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-60-72). EDN ICANQB. (In Russ.)
5. Urykov V.A., Zelenina L.I. Matematicheskiye modeli transportnykh potokov. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2015; 6(46):4-9. EDN UAEYDD. (In Russ.)
6. Klenov S.L., Wegerle D., Kerner B.S., Schreckenberg M. Prediction of moving and unexpected motionless bottlenecks based on three-phase traffic theory. *Computer Research and Modeling*. 2021; Vol. 13(2):319-363. (In Russ.) [Https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-2-319-363](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-2-319-363). EDN DBKICA.
7. Klenov S.L. Teoriya Kernera trekh faz v transportnom potoke - novyy teoreticheskiy bazis dlya intellektual'nykh transportnykh tekhnologiy. *TRUDY MFTI. Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2010; T. 2.4(8):75-89. EDN OFYOHZ. (In Russ.)
8. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2015; 132(7):417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>
9. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving, 2016.
10. Kerner Boris S. Breakdown in vehicular traffic: driver over-acceleration, not over-reaction. 2023; Corpus ID: 261884503
11. Kerner Boris S. Physics of automated-driving vehicular traffic. *Physical review. E* 108 1-1 2023; [Https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.014302](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.014302)
12. Kerner Boris S., Klenov Sergey L., Wiering Vincent , Schreckenberg Michael. A methodology of cooperative driving based on microscopic traffic prediction. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2024. [Https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129780](https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129780)
13. Kerner Boris S., Klenov Sergey L. Microscopic features of the effect of vehicle overacceleration on traffic flow. *Physical review. E* 112 3-1. 2025; [Https://doi.org/10.1103/815g-zjpn](https://doi.org/10.1103/815g-zjpn)
14. Agureyev I. Ye., Akhromeshin A.V., Pyshnyy V.A. Uchet slozhnosti v zadachakh transportnogo sprosa. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*. 2023; 6: 66-78. [Https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66](https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66). EDN LMFVVVC. (In Russ.)
15. Agureyev I. Ye., Bordukov A.V. Trekhfaznaya teoriya transportnykh potokov B. Kerner i yeye primeneniye v intellektual'nykh transportnykh sistemakh. *Transport. Vzglyad v budushcheye - TVF-24 : Sbornik nauchnykh statey mezdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 07–08 noyabrya 2024 goda. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet imperatritys Yekateriny II. 2024; S. 75-77. EDN MVMQVY. (In Russ.)
16. Tishkin V.F., Trapeznikova M.A., Chechina A.A., Churbanova N.G. Modelirovaniye transportnykh potokov na osnove kvazigazodinamicheskogo podkhoda i teorii kletochnykh avtomatov s ispol'zovaniyem superkomp'yuterov. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye*. 2024; 16(1):175-194. [Https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-1-175-194](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-1-175-194). EDN FBSUCA. (In Russ.)
17. Helbing D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow. *The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems*. 2009; 70(2): 229-241.
18. Kerner B.S. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2013; 392(21): 5261–5282. [Https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.06.004](https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.06.004)
19. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2015; 132(7): 417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>

20. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: *Stochastic highway capacity and automatic driving*. 2016.
21. Helbing D., Treiber M., Kesting A., Schönhof M., *Eur. Phys. J.* 2009. B. 69: 583–598.
22. Schönhof M., Helbing D., *Transp. Res.* 2009. B 43: 784–797.
23. Treiber M., Kesting A., Helbing D., *Transp. Res.* 2010. B 44: 983–1000.
24. Treiber Martin; Kesting Arne; Helbing Dirk. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2010; 44 (8–9).
25. Rehborn Hubert; Klenov Sergey L; Palmer Jochen. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK, and Germany. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2011; 390: (23–24).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бордуков Антон Викторович – аспирант кафедры «Транспортно-технологические машины и процессы» Тульского государственного университета (300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 92).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6579-436X>,
e-mail: av.bordukov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bordukov Anton V. – Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Machines and Processes, Tula State University (92 Lenin Ave., Tula, 300012).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6579-436X>,
e-mail: av.bordukov@gmail.com

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья

УДК 625.712

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

EDN: YOGPUR



Check for updates

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУСТОТ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

В.В. Чусов, Р.Х. Муртазин, А.С. Александров

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

ответственный автор

aleksandrov00@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Показано, что воздушные пустоты по своей сути являются дефектами структуры асфальтобетона. Приведены сведения о математических моделях, учитывающих влияние содержания воздушных пустот как на модуль упругости асфальтобетона, так и на срок службы дорожной одежды, выраженный в суммарном числе расчетных нагрузок, которые могут быть реализованы до разрушения дорожной одежды. Поэтому учет содержания воздушных пустот при определении модуля упругости асфальтобетона, применяемого в расчете дорожной одежды, является актуальной задачей, имеющей практическую значимость.

Методы и материалы. Выполнен анализ методов учета эффекта накопления повреждений, применяемых к расчету асфальтобетонов и других материалов по сопротивлению усталостному разрушению. На основании этого анализа сделан вывод о возможности применения к определению модуля упругости асфальтобетона теории повреждаемости. Подчеркнута аналогия между повреждаемостью Ю.Н. Работного и содержанием воздушных пустот. При этом обоснована возможность применения к расчету модуля упругости асфальтобетона принципа деформационной эквивалентности поврежденной и сплошной среды. К расчету напряжения от растяжения при изгибе применена концепция Л.М. Качанова, состоящая в увеличении величины напряжения при возрастании количества повреждений.

Результаты. Приведены результаты расчета модулей упругости асфальтобетона на битуме марок БНД при различном содержании воздушных пустот, но в пределах, допускаемых ГОСТ Р 58406.2–2020. За счет этого дополнены данные ГОСТ Р 71404–2024 о значениях модулей упругости асфальтобетонов. Целесообразность дополнения авторами данных ГОСТ Р 71404–2024 объясняется тем, что температура асфальтобетонной смеси в различных частях кузова самосвала различна, что обуславливает неодинаковые условия уплотнения смеси по ее температуре. В этом случае испытания кернов, взятых из точек отбора, расположенных друг от друга на близком расстоянии, показывают практически одинаковое содержание битума, но разное содержание воздушных пустот. Поэтому при проектировании нежестких дорожных одежд нужно ориентироваться на модули упругости асфальтобетона, соответствующие максимальному допуску по содержанию воздушных пустот.

Заключение. Полученные результаты позволяют более детально производить расчет дорожной одежды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, содержание воздушных пустот, модуль упругости асфальтобетона

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, работа выполнена по собственной инициативе авторов.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 14.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Чусов В.В., Муртазин Р.Х., Александров А.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Чусов В.В., Муртазин Р.Х., Александров А.С. Учет влияния содержания воздушных пустот на модуль упругости асфальтобетонов для расчета дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 1000-1017. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

EDN: YOGPUR

THE CONSIDERATION OF AIR VOID CONTENT EFFECT ON ASPHALT CONCRETE ELASTIC MODULUS IN PAVEMENT DESIGN

Vasiliy V. Chusov, Rais Kh. Murtazin, Anatoliy S. Aleksandrov 

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

 corresponding author
aleksandrov00@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. It has been demonstrated that air voids are inherently structural defects in asphalt concrete. The article presents information on mathematical models that take into account the influence of air void content on both the elastic modulus of asphalt concrete and the service life of the pavement, expressed as the cumulative number of design loads that the pavement can withstand before failure. Therefore, considering air void content when determining the elastic modulus of asphalt concrete used in pavement design is a relevant and practically significant task.

Materials and methods. The analysis of methods for accounting the damage accumulation effect applied to the fatigue destruction resistance calculation of asphalt concrete and other materials has been performed. Relying on this analysis, it was concluded that the damage theory can be used to determine the elastic modulus of asphalt concrete. The analogy between Yu. N. Rabotnov's damage parameter and air void content is emphasized. Furthermore, the possibility of applying the principle of deformational equivalence between a damaged and a homogeneous medium to the calculation of asphalt concrete elastic modulus is justified. The concept proposed by L.M. Kachanov, which involves an increase in stress magnitude with an increasing number of damages, was applied to the calculation of tensile stress in bending.

Results. The results of calculating the elastic moduli of bitumen-based asphalt concrete (grades BND) with varying air void content, but within the limits permitted by GOST R 58406.2-2020, have been presented. This let the authors to supplement the data on elastic modulus values for asphalt concretes in GOST R 71404-2024. The reason to add the data in GOST R 71404-2024 is explained by the fact that the temperature of the asphalt concrete mix in different parts of the dump truck body varies, which leads to different compaction conditions for the mix based on its temperature. In this case, tests of cores taken from sampling points located close to each other show almost identical bitumen contents, but different air void contents. Therefore, when designing flexible road surfaces, it is necessary to focus on the elastic moduli of asphalt concrete that correspond to the maximum limits for the content of air voids.

Conclusion. The obtained results allow to make more detailed pavement design calculations.

KEYWORDS: asphalt concrete, air void content, elasticity modulus of asphalt concrete

The article was submitted: September 31 , 2025; **approved after reviewing:** December 14, 2025; **accepted for publication:** December 14, 2025.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Chusov V.V., Murtazin R. Kh., Aleksandrov A.S. The consideration of air void content effect on asphalt concrete elastic modulus in pavement design. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 1000-1017. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

© Chusov Vasiliy V., Murtazin Rais Kh., Aleksandrov Anatoly S., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование нежестких дорожных одежд по ГОСТ Р 71404–2024¹ основано на расчете конструкции по трем основным критериям: прочности, морозоустойчивости и осушению дорожных одежд и рабочего слоя земляного полотна. В рамках расчета на прочность выполняется расчет предварительно назначенной конструкции по критерию упругого прогиба. После этого выполняются две проверки. Целью первой проверки является оценка сопротивления сдвигу в грунте земляного полотна и песчаных дополнительных слоях основания. Вторая проверка предназначена для оценки сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе асфальтобетона, применяемого в нижнем слое покрытия

или в основании. Для каждого расчета необходимо назначить модули упругости материалов конструктивных слоев, в том числе асфальтобетонов. При этом учитывают зависимость модуля упругости асфальтобетона от температуры, типа и марки применяемого органического вяжущего и назначения конструктивного слоя (для основания или для покрытия). При расчете на действие статической нагрузки дополнительно учитывают номинальный максимальный размер заполнителя (НМР). В качестве примера приведем регламентируемые ГОСТ Р 71404–2024 значения модулей упругости асфальтобетонов на битумах марок БНД, изготовленных согласно требованиям по ГОСТ Р 58406.2–2020².

Таблица 1
**Модули упругости асфальтобетона, регламентируемые ГОСТ Р 71404–2024,
при расчете на действие кратковременной нагрузки**
Источник: данные заимствованы из ГОСТ Р 71404–2024, таблица Г.4.

Table 1
**The elasticity moduli of asphalt concrete, regulated by GOST R 71404-2024,
when calculating the effect of a short-term load application**
Source: data is taken from GOST R 71404-2024, Table G4.

Конструктивный слой	Тип асфальтобетона 0	Величина модуля упругости, МПа, при температуре (° С)						
		10	20	30	40	50		
Покрытие	Асфальтобетоны по ГОСТ Р 58406.2 на битумах по ГОСТ 33133–2014 ³	БНД 130/200	3650	2150	1100	750	500	300
		БНД 100/130	5200	3000	1600	1000	550	350
		БНД 70/100	6400	4150	2700	1450	650	500
		БНД 50/70	7200	4800	3350	1850	900	600
Основание	Асфальтобетоны по ГОСТ Р 58406.2 на битумах по ГОСТ 33133–2014	БНД 130/200	3150	1600	800	550	350	250
		БНД 100/130	4450	2300	1250	850	450	350
		БНД 70/100	5450	3250	2100	1250	550	450
		БНД 50/70	6100	3700	2550	1550	750	520

¹ ГОСТ Р 71404–2024 (взамен ПНСТ 542–2021) Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. № 1022-ст. М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 141 с.

² ГОСТ Р 58406.2–2020 (взамен ПНСТ 184–2019) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Общие технические условия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2020 г. № 192-ст – М.: Стандартинформ, 2020. – 27 с.

³ ГОСТ 33133–2014 (Введен впервые) Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования: введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 мая 2015 г. № 520-ст – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что стандарт РФ (ГОСТ Р 71404) при расчете на действие кратковременной нагрузки учитывает зависимость модуля упругости асфальтобетонов от температуры, вида органического вяжущего и его вязкости. Все остальные факторы учитываются путем подразделения асфальтобетонов по области применения – либо в покрытии, либо в основании. Принимая во внимание требования ГОСТ Р 58406.2–2020, при конструировании асфальтобетонных покрытий и оснований учитываются условия дорожного движения, что позволяет назначить асфальтобетонную смесь с соответствующим условиям эксплуатации зерновым составом. Однако, применяя данные ГОСТ Р 71404, нельзя установить влияние зернового состава и НМР на величину модуля упругости. Кроме того, в ГОСТ Р 71404 отсутствует учет влияния на модуль упругости таких факторов, как содержание органического вяжущего (СВ), содержание воздушных пустот (СВП) – незаполненные пустоты, и пустот, наполненных битумным вяжущим (ПНБ). Безусловно, это упущение стандарта. Оно объяснимо тем, что в современных условиях государственные стандарты разрабатываются малочисленными коллективами специалистов и в короткие сроки. При таком подходе человеческих и материальных ресурсов оказывается недостаточно, поэтому необходимо вносить предложения по доработке того или иного стандарта в период его действия. Авторы работы [1] справедливо полагают, что из-за разной скорости движения на городских дорогах и внегородских транспортных объектах время действия нагрузки тоже отличается. Поэтому модули упругости асфальтобетона, применяемые для расчета дорожных одежд, для таких дорог должны отличаться. В работах [2, 3] приведено обоснование расчетных модулей упругости горячих асфальтобетонов, изготовленных по ГОСТ Р 58406.2, и результаты испытания асфальтобетонных образцов из смесей А22От, А16Вт и А8Вт трехточечным изгибом. Для изготовления образцов использовался битум не только одной марки, он был взят из одной партии. Результаты испытаний показали различия в модулях упругости. Отличие модулей упругости асфальтобетонов А16Вт и А8Вт, приготовленных на битуме одной партии, подтверждает влияние зернового состава и НМР на модуль упругости асфальтобетона.

Нужно отметить, что факт влияния на величину модуля упругости зернового состава и НМР, как и других физических показателей, известен, но ресурсов для испытания всех типов асфальтобетона при вариации показателей физических свойств у лабораторий университетов и НИИ не хватает. Поэтому актуальность приобретают исследования, направленные на разработку расчетных способов определения модулей упругости при вариации показателей их физических свойств.

Влияние воздушных пустот на параметры прочности и деформативности асфальтобетонов и их срок службы, выраженный в годах или предельном числе расчетных нагрузок, анализируется в работах специалистов дорожной отрасли. В большинстве своем такие исследования посвящены изучению усталости асфальтобетона, которую необходимо учитывать при проектировании. В этом случае принимается гипотеза о начальном состоянии асфальтобетонных образцов. Согласно данной гипотезе считается, что до приложения повторных нагрузок образец имеет нулевую поврежденность. Тогда начальное содержание воздушных пустот остается не учтенным, хотя и может оговариваться в ограничениях математической модели. Это можно объяснить тем, что СВП является параметром качества асфальтобетона и имеет ограничения максимальным и минимальным значением в керне или образце, изготовленном в лаборатории. То есть математические модели описывают влияние усталости на характеристики механических свойств и эксплуатационные параметры асфальтобетонов с допустимым СВП. Также известны работы, в которых исследовано влияние превышения СВП допускаемого максимального значения на срок службы дороги.

Нужно отметить, что методика расчета нежесткой дорожной одежды, регламентированная ГОСТ Р 71404, учитывает влияние усталостных явлений. Так, при расчете по критерию упругого прогиба влияние усталостных процессов учтено при вычислении минимальной величины требуемого модуля упругости, рассчитываемой на суммарное число приложений расчетной нагрузки. В критерии сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе влияние числа приложенных нагрузок учитывается при вычислении прочности на растяжение при изгибе. Таким образом, методика расчета дорожной одежды по

ГОСТ Р 71404 требует раскрытия зависимости модуля упругости асфальтобетона, уплотненного до допускаемого СВП, которое варьируется в сравнительно небольшом диапазоне. Тем не менее, учитывая сходство воздушных пустот с повреждениями асфальтобетона, обзор работ, исследующих влияние усталостных процессов на показатели механических свойств асфальтобетона, полезен для решения задач, поставленных в данной публикации.

Среди работ, выполненных в этом направлении, следует отметить публикации, базирующиеся на принципах суммирования повреждений (линейном или нелинейном). Принцип линейного суммирования повреждений Пальмгрена⁴ – Майнера⁵ применяется в целях прогнозирования остаточного ресурса асфальтобетонного покрытия и показателя ровности IRI. Такие исследования проводятся как в нашей стране, так и за рубежом [4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12]. В самом простом случае, когда воздействие на материал оказывают одинаковые нагрузки (например, расчетная АК-11,5), принцип линейного суммирования повреждений полагает, что поврежденность материала определяется отношением числа приложенных нагрузок к их предельной величине, которую способен выдержать материал. Тогда основной задачей становится раскрытие зависимости предельного числа нагрузок от ее параметров и параметров материалов конструкции. В этом направлении большая работа проделана

нашими зарубежными коллегами. Разработанные ими математические модели в качестве независимых переменных включают: модуль упругости асфальтобетона^{6,7} или деформацию растяжения от изгиба, которая связана с модулем упругости^{8,9,10}, параметры качества асфальтобетона: содержание битума, содержание воздушных пустот и пустот, наполненных битумным вяжущим^{11,12}.

Следует отметить, что модуль упругости поврежденной среды можно определить, применяя принципы деформационной или энергетической эквивалентности. Суть этих принципов основана на том, что модуль упругости поврежденного материала вычисляется произведением модуля упругости такого же, но сплошного материала, и параметра, называемого поврежденностью, варьирующегося от нуля до единицы. Это соответствует основам теории повреждаемости, созданным Л.М. Качановым¹³ и Ю.Н. Работновым¹⁴ и развитым в трудах Ж. Леметра¹⁵. Применение принципов эквивалентности состояний поврежденной и сплошной среды стало самостоятельным направлением в области изучения влияния усталостных процессов на параметры механических свойств асфальтобетона. В работах [13, 14, 15] получены решения о влиянии количества нагрузок на параметры теории повреждаемости (сплошность Л.М. Качанова и поврежденность Ю.Н. Работнова) и модуль упругости асфальтобетона. В работе [16] приведены экспериментальные данные, под-

⁴ Palmgren A. Die lebensdauer von kugellagern. Veifahrenstechnik. 1924; 68: 339–341.

⁵ Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics. 1945; 12: 159–164.

⁶ Fin F., et al. The uses of distress prediction subsystems for the design of pavement structures. Proc., 4th Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Lexington. 1977; 3–38.

⁷ Di Benedetto H., Soltani A.A., Chaverot P. Fatigue Damage for Bituminous Mixtures: A Pertinent Approach. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. 1996; 65: 142–158.

⁸ Pell P.S. Pavement Materials. Proc., Sixth International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements. 1987; 2: 36–70.

⁹ Perret J., Ould-Henia M., Dumont A-G. High modulus pavement design using accelerated loading testing (ALT). 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna. 2004; Paper 205: Book I: 203 – 212.

¹⁰ Maupin G.W. Test for Predicting Fatigue Life of Bituminous Concrete. Transportation Research Record. 1977; 659: 32–37.

¹¹ Bonnaure F., Gravois A., Udrone J. A New Method of Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1980; 49: 499–529

¹² Zhou F., Fernando E., Scullion T. A review of performance models and test procedures with recommendations for use in the Texas m-e design program. Report 0-5798-1. Texas transportation institute. The Texas A&M University System College Station, Texas. 2008.

¹³ Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.

¹⁴ Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

¹⁵ Lemaitre J.A. Course on damage mechanics. 2nd edn. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, 1996. 247 p.

тврждающие возможность использования полученных решений. Однако и эти решения, и данные экспериментов получены с применением гипотезы о начальном состоянии асфальтобетона.

Вместе с тем факт влияния содержания воздушных пустот на величину модуля упругости асфальтобетона, его усталостную долговечность, износстойкость и другие показатели установлен в работах многих специалистов. Такое влияние в настоящее время сложно оспорить.

Например, в работе австралийских специалистов [17] изучено влияние содержания воздушных пустот на модуль упругости асфальтобетона и его эксплуатационные показатели: истираемость и проницаемость. Эксперименты выполнены для оценки влияния СВП на параметры пористых смесей, отличающихся от плотных асфальтобетонов высоким содержанием воздушных пустот. В этой работе установлено, что с увеличением СВП коэффициент проницаемости возрастает, а модуль упругости уменьшается. Причем эти зависимости практически линейны. Следовательно, зависимость модуля упругости пористого асфальтобетона от СВП [17], качественно схожа с зависимостью модуля упругости плотного асфальтобетона от поврежденности, полученной с привлечением принципа деформационной эквивалентности состояний сплошной и поврежденной среды [16].

Энвусо Игве (университет науки и технологий Риверс, Нигерия, штат Риверс) выполнил экспериментальные работы и опубликовал их результаты [18], подтверждающие зависимость динамического модуля упругости асфальтобетона от содержания воздушных пустот. Для выполнения эксперимента изготавливались две группы образцов. В образцах первой группы применен немодифицированный асфальтобетон, содержащий 3–6% битума и СВП, варьирующееся в пределах от 3,6% (при наибольшем содержании битума) до 8,3% (при наименьшем содержании битума). Вторая группа образцов изготовлена из асфальтобетона с оптимальным содержанием битума 4,5% и добавлением каучукового латекса, что позволяло получить различное

СВП (от 2,7 до 5,4%). Испытания выполнены путем приложения нагрузок с частотой 0,1; 1; 5; 10 и 25 Гц, то есть выполнены испытания на усталость асфальтобетона. Результаты этих экспериментов подтверждают зависимость динамического модуля упругости от начального содержания воздушных пустот. Причем при приложении нагрузки любой частоты зафиксировано уменьшение модуля упругости при увеличении начального СВП. Эта зависимость в полулогарифмических координатах ($\lg E$ от СВП) линейна. Логарифмическая зависимость повреждаемости, а равно и модуля упругости асфальтобетона, от числа приложенных нагрузок получена теоретически в работе [14]. При этом укажем, что в работах Э. Игве приведено начальное СВП, но данных об изменении этого параметра в условиях воздействия циклических нагрузок нет. В работе [19] Э. Игве экспериментально обосновал математическую модель, связывающую предельное число нагрузок с деформацией асфальтобетонного образца и модулем упругости. Область применения такой модели ограничена начальным СВП в асфальтобетоне.

Специалисты дорожной отрасли проводили исследования, состоящие в оценке влияния содержания воздушных пустот на срок службы покрытия дорожной одежды. В работе¹⁶ установлено, что повышение содержания воздушных пустот на 1%, по сравнению с базовым уровнем в 7%, приводит к сокращению срока службы покрытия примерно на 10%. В работе [20] получена математическая модель, предсказывающая сокращение срока службы асфальтобетонного покрытия в зависимости от содержания воздушных пустот и их максимально допустимого значения. В обширном экспериментальном исследовании¹⁷, выполненном при участии известного специалиста Карла Монисмита, сделан вывод, что в целях обеспечения усталостной долговечности асфальтобетона контроль содержания воздушных пустот важнее контроля содержания битума. В этом исследовании установлено, что содержание воздушных пустот, по сравнению с содержанием битума, в большей степени влияет на прочностные характеристики асфальтобетона в условиях приложения повторных

¹⁶ Linden R.N., Mahoney J.P., Jackson N.C. Effect of Compaction on Asphalt Concrete Performance. *Transportation Research Record*. 1989; 1217: 20–28.

¹⁷ Harvey J.T., Deacon J.A., Tsai B.W., Monismith C.L. Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California. Report No. RTA-65W485-2, Institute of Transportation Studies University of California. Berkeley. 1995; 189 p.

нагрузок. Так, авторы данной работы пишут: «Если целевое содержание битума составляет 5%, а воздушных пустот – 5%, то несоблюдение целевых показателей приводит к следующему. Уменьшение количества битума на 1% приводит к сокращению срока службы на 12%. Увеличение количества воздушных пустот на 1% приводит к сокращению срока службы на 30%. Уменьшение количества битума на 1% в сочетании с увеличением количества воздушных пустот на 1% приводит к сокращению срока службы на 39%». В публикации [21] исследовано влияние содержания воздушных пустот и, соответственно, качества уплотнения асфальтобетона на его износостойкость. Таким образом, работы, преследующие цель изучения влияния усталостных процессов на показатели механических свойств асфальтобетона и его эксплуатационные параметры, а также срок службы, учитывают только начальное СВП. В процессе воздействия циклических нагрузок СВП изменяется, возрастая при образовании новых повреждений. Поэтому в усталостных моделях начальное СВП следует рассматривать как механизм ограничения области применения модели.

Авторы работ [22, 23, 24, 25, 26] определяли динамический модуль упругости асфальтобетона в зависимости от температуры образца, частоты циклической нагрузки, зернового состава, содержания воздушных пустот, содержания битума и его вязкости, в целях оценки возможности применения моделей Хирша и Витчака. Модели Хирша и Витчака рекомендуют применять для проектирования дорожных одежд, ориентируясь на вычисленный логарифм динамического модуля упругости и последующее вычисление этого параметра посредством антилогарифмирования. Многофакторное моделирование динамического модуля упругости асфальтобетона [22, 23, 24, 25, 26] базируется на большом объеме экспериментальных данных, накопленных в различных университетах, транспортных и дорожных департаментах. Наиболее современные математические модели разработаны при помощи нейронной сети, в которую загружается огромный массив данных. Отметим, что в связи с переходом на асфальтобетоны Евросоюза и США, Россия не имеет достаточного объема данных по таким асфальтобетонам. Банки данных, сформированные в СССР и РФ до 2020 г., получены на основе испытаний горячего асфальтобетона, приготовляемого по ГОСТ 9128. Сейчас практически на всей территории страны работают с горячими сме-

сями, приготавливаемыми по ГОСТ Р 58406.2. Таким образом, дорожная отрасль РФ лишена возможности современного нейронного моделирования параметров асфальтобетона.

Отсюда и вытекают упущения ГОСТ Р 71404 по назначению модулей упругости асфальтобетонов, учитывающие лишь малую часть факторов, влияющих на величину этого параметра. Поэтому специалистам дорожной отрасли необходимо выполнить большой объем работы по учету факторов, влияющих на величину модуля упругости асфальтобетона.

Цель нашей статьи состоит в выявлении зависимости модуля упругости от начального содержания воздушных пустот для дополнения базы данных ГОСТ Р 71404.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Средство достижения поставленной цели состоит в применении теории повреждаемости Качанова – Работного – Леметра и принципа деформационной эквивалентности поврежденной и сплошной среды, используемого в этой теории. Применение данного принципа основано на том, что деформацию поврежденной среды ε_D можно определить двумя способами. Первый способ предполагает, что при простом напряженном состоянии деформация поврежденного материала может быть определена отношением напряжения σ , возникающего в таком же, но сплошном материале, к модулю упругости поврежденного материала E_D . При таком подходе для простого одноосного напряженного состояния справедлива традиционная формула

$$\varepsilon_D = \frac{\sigma}{E_D}. \quad (1)$$

Второй способ состоит в том, что деформация поврежденного материала ε_D определяется отношением напряжений σ_D , возникающих в поврежденном материале, к модулю упругости этого же, но сплошного материала. При таком подходе к расчету напряжения в поврежденной среде σ_D применяется концепция Л.М. Качанова. Гипотеза Л.М. Качанова постулирует, что любая компонента тензора напряжений поврежденного тела σ_{ijD} находится отношением аналогичной компоненты тензора напряжений в сплошном теле к сплошности (Ψ) Л.М. Качанова или к разности единицы и поврежденности (D) Ю.Н. Работного. В случае одноосного напряженного состояния напряжение и деформацию поврежденного тела вычисляют по формулам:

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{1-D}; \quad \varepsilon_D = \frac{\sigma}{1-D} \cdot \frac{1}{E}. \quad (2)$$

Безусловно, между формулами для вычисления деформации поврежденного материала, записанным выражением (1), и зависимостью (2), можно положить равенство. Тогда связь модулей упругости поврежденного и сплошного материала становится очевидной и выражается известной зависимостью Жана Леметра¹⁸:

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{1-D}; \quad \varepsilon_D = \frac{\sigma}{1-D} \cdot \frac{1}{E}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет вычислить модуль упругости материала в зависимости от поврежденности D , которая в условиях действия нагрузки возрастает. Таким образом, параметр D можно представить функцией величины напряжения и времени действия нагрузки или функцией величины напряжения и числа кратковременных нагрузок. В представлении (3) модуль упругости E характеризует деформационные свойства материала при нулевой поврежденности, то есть при $D = 0$, что описывает случай $E_D = E$. На самом деле любой материал обладает пористостью, применительно к асфальтобетонам пористость называют содержанием воздушных пустот. Следовательно, при изучении влияния усталости на величину модуля упругости необходимо ввести гипотезу о начальном состоянии. Эта гипотеза утверждает, что, несмотря на имеющиеся в асфальтобетонном образце воздушные пустоты, образец считается сплошным до момента приложения к нему нагрузки. В действительности модуль сплошной среды E , используемый в формуле (3), применительно к асфальтобетону представляет собой модуль упругости с учетом определенного, но допустимого содержания воздушных пустот $E_{\text{СВП}}$. С

учетом такой трактовки зависимость (3) нужно записать в виде

$$E_D = E \cdot (1 - D). \quad (4)$$

Таким образом, основной нашей задачей является раскрытие зависимости модуля упругости асфальтобетона $E_{\text{СВП}}$ от содержания воздушных пустот. Для решения этой задачи возможно применение того же принципа деформационной эквивалентности.

Возможность данного подхода подтверждается тем, что воздушные пустоты по своей сути представляют собой повреждения (дефекты структуры). Причем это можно показать сопоставлением формулы, регламентируемой ГОСТ Р 58401.8–2019, для расчета СВП с зависимостями вычисления поврежденности Ю.Н. Работного через плотности поврежденной и сплошной среды. И так, согласно ГОСТ Р 58401.8–2019¹⁹, содержание воздушных пустот, измеряемое в %, определяют расчетным способом, а вычисление этого параметра выполняют по формуле

$$P_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \cdot 100, \quad (5)$$

где P_a – содержание воздушных пустот, %; G_{mb} и G_{mm} – соответственно объемная и максимальная плотности асфальтобетона, определяемые по ГОСТ Р 58401.10–2019²⁰ и ГОСТ Р 58401.16–2019²¹, г/см³.

Отметим, что меры теории повреждаемости (сплошность Л.М. Качанова и повреждаемость Ю.Н. Работного) измеряют в долях от единицы, допуская их вариацию от нуля до единицы. Поэтому для демонстрации аналогии СВП поврежденности Ю.Н. Работного в зависимости (5) сделаем простое преобразование, не меняющее физической сути. Пусть

¹⁸ Lemaitre J., Dufailly J. Damage measurements. *Engineering Fracture Mechanics*. 1987; 516(28): 643–661. doi.org/10.1016/0013-7944(87)90059-2.

¹⁹ ГОСТ Р 58401.8–2019 (взамен ПНСТ 108–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения содержания воздушных пустот: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 мая 2019 г. № 270-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 3 с.

²⁰ ГОСТ Р 58401.10–2019 (взамен ПНСТ 106–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения объемной плотности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 июня 2019 г. № 285-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

²¹ ГОСТ Р 58401.16–2019 (взамен ПНСТ 92–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения максимальной плотности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 мая 2019 г. № 273-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

R_a измеряется в процентах, а применяемое нами обозначение СВП есть мера R_a в долях от единицы. Тогда получим

$$\text{СВП} = \frac{P_a}{100} = 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}. \quad (6)$$

Наиболее простой гипотезой при определении поврежденности материала является допущение о том, что в процессе накопления дефектов в структуре материала масса поврежденного образца должна сохраняться, тогда как объем поврежденного тела должен возрастать по мере увеличения пористости. Тогда поврежденность может быть определена разностью единицы и отношения плотностей поврежденной (ρ_D) и сплошной (ρ) среды. Такая зависимость является наиболее распространенной и самой простой из всех представлений поврежденности через плотности поврежденной и сплошной среды. Но на практике при наличии повреждений сферической формы, увеличение объема, вызванное повреждениями, связано с увеличением площади поверхности этих повреждений. В общем случае для трехмерного объекта объем пропорционален линейному размеру в кубе (L^3), а площадь поверхности – линейному размеру в квадрате (L^2). Следовательно, площадь поверхности пропорциональна объему в степени 2/3 ($V^{(2/3)}$).

Для расчета поврежденности через плотности сплошного и поврежденного тела применяют формулы:

$$D = 1 - \frac{\rho_D}{\rho}; \quad D = 1 - \left(\frac{\rho_D}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}}; \\ D = \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (7)$$

Первая из этих формул тождественна зависимости (6). Тогда модуль упругости с учетом определенного, но допустимого содержания воздушных пустот $E_{\text{СВП}}$ найдем по формуле

$$E_{\text{СВП}} = E_{\max} \cdot (1 - \text{СВП}), \quad (8)$$

где E_{\max} – модуль упругости эталонного абсолютно плотного асфальтобетона, под которым понимается материал без воздушных пустот.

Обсуждая модуль упругости эталонного абсолютно плотного асфальтобетона E_{\max} , отметим, что с позиций обеспечения работоспособности асфальтобетонного слоя определенное и допускаемое ГОСТ Р 58406.2 СВП является необходимым условием. При устройстве асфальтобетонного слоя нельзя допустить как недостаточное уплотнение смеси, так и ее переуплотнение.

На практике такой асфальтобетон забракуют, потому что уплотнять смесь до содержания воздушных пустот меньше нижнего допускаемого предела нельзя. Это связано с тем, что асфальтобетонное покрытие воспринимает воздействие погодно-климатических факторов и транспортной нагрузки. При изменении температуры изменяется и объем асфальтобетона, что может привести к «выпотеванию» битумного вяжущего. Этот же дефект переуплотненного асфальтобетона может появиться при воздействии транспортной нагрузки [27]. Кроме того, переуплотнение асфальтобетона приводит к повышению напряжения на контакте зерен заполнителя, что может привести к их дроблению и истиранию. В этом случае изменится зерновой состав, поэтому под термином «эталонный абсолютно плотный асфальтобетон» нами понимается абстрактный материал с нулевым содержанием воздушных пустот. Ввод этого параметра обусловлен тем, что он необходим для дальнейшего расчета. Его можно определить экспериментально, но только по результатам испытаний асфальтобетонных образцов со строго определенным содержанием СВП, соответствующим допускам, оговоренным в ГОСТ Р 58406.2. Это объясняется тем, что уплотнить асфальтобетонный образец до нулевого содержания воздушных пустот достаточно сложно, нужно создать большое давление, но не приводящее к разрушению зерен щебня. Поэтому гораздо целесообразнее изготовить образцы по ГОСТ Р 58401.11–2019²² и отобрать из них нужное количество с одним и тем же СВП, например $P_a = 2,5\%$ (СВП = 0,025). Отобранные образцы нужно подвергнуть испытанию и определить модули упругости. После статистической

²² ГОСТ Р 58401.11–2019 (взамен ПНСТ 135–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной прочности при многократном изгибе: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 июня 2019 г. № 286-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

обработки результатов получим модуль $E_{\text{СВП}}$, величина которого соответствует содержанию воздушных пустот (в нашем примере СВП = 0,025). Модуль упругости эталонного асфальтобетона E_{\max} выражается из зависимости (8), после чего вычисляется по формуле

$$E_{\max} = \frac{E_{\text{СВП}}}{1 - \text{СВП}}. \quad (9)$$

Здесь нами описано стандартное экспериментальное решение, но есть нюанс, состоящий в том, что показатели свойств компонентов асфальтобетонной смеси отличаются, хотя и не выходят за рамки допускаемых значений. В этом случае на результаты даже безупречно проведенных испытаний повлияет не только параметр СВП, но и вариация параметров качества компонентов асфальтобетонной смеси. Исключение такого влияния требует большого количества испытаний и, как следствие, удорожание эксперимента. Поэтому величину модуля упругости эталонного асфальтобетона лучше определить расчетом с использованием значений модулей упругости $E_{\text{гост}}$ рекомендуемых в ГОСТ Р 71404, содержании воздушных пустот СВП_{гост}, при котором эти значения определены. При такой постановке задачи расчетная формула примет вид:

$$E_{\max} = \frac{E_{\text{ГОСТ}}}{1 - \text{СВП}_{\text{ГОСТ}}}. \quad (10)$$

Для применения формулы (10) необходимо определить параметр СВП_{гост}. При этом будем полагать, что эти модули упругости определены при СВП, соответствующем их среднему допускаемому значению 4,5% в кернах покрытия и 5,5% – основания. Избегая десятых и обеспечивая запас по прочности для последующих расчетов, примем СВП_{гост} = 4% для асфальтобетонов покрытий и СВП_{гост} = 5% – оснований.

Таким образом, в данном подразделе нашей публикации разработана методика вычисления модуля упругости асфальтобетона с учетом содержащихся в его структуре воз-

душных пустот. Методика базируется на общеизвестной теории повреждаемости Качанова – Работного, а также принципах эквивалентности физического и механического состояния, представленных в работах Ж. Леметра. На первом шаге вычислений производят расчет модуля упругости эталонного асфальтобетона, под которым понимается абстрактный материал с нулевым содержанием воздушных пустот. В расчете по формуле (10) используют значения модулей упругости, регламентируемые ГОСТ Р 71404, и содержание воздушных пустот практически, равное их среднему допустимому значению. На втором шаге по формуле (8) определяют искомый модуль, учитывающий фактическое содержание воздушных пустот. Здесь хотим еще раз обратить внимание специалистов, что модуль упругости E_{\max} представляет собой абстрактную величину. Ввод этого параметра был необходим для донесения логики нашего расчета. Сделав такие пояснения, можно произвести подстановку формулы (10) в основную зависимость (8). В результате получим

$$E_{\text{СВП}} = \frac{E_{\text{ГОСТ}}}{1 - \text{СВП}_{\text{ГОСТ}}} \cdot (1 - \text{СВП}). \quad (11)$$

Рассматривая формулу (11), можно констатировать, что из нее абстрактное понятие модуля упругости эталонного абсолютно плотного асфальтобетона исключено. Тем самым мы демонстрируем абстрактность величины E_{\max} и показываем, что ввод этой величины и соответствующего ей понятия не должен вызывать нареканий. Во всем остальном предлагаемый нами расчет полностью вписан в концепцию повреждаемости материалов Качанова – Работнова – Леметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оговорив все условия расчета модулей упругости эталонного асфальтобетона, их можно вычислить по формуле (10). Результаты расчета модулей упругости эталонного асфальтобетона на битуме марок БНД приведены в таблице 2.

Таблица 2

Кратковременные модули упругости эталонного асфальтобетона

Источник: табличные данные получены авторами в результате расчета по формуле (10).

Table 2

Short-term elasticity moduli of ideal standard asphalt concrete

Source: compiled by the author as a result of calculation with the use of formula 10.

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	Модуль упругости асфальтобетона, МПа, при температуре, °C					
		0	10	20	30	40	50
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства покрытия	БНД 130/200	3802	2240	1146	781	521	313
	БНД 100/130	5417	3125	1667	1042	573	365
	БНД 70/100	6667	4323	2813	1510	677	521
	БНД 50/70	7500	5000	3490	1927	938	625
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства основания	БНД 130/200	3316	1684	842	579	368	263
	БНД 100/130	4684	2421	1316	895	474	368
	БНД 70/100	5737	3421	2211	1316	579	474
	БНД 50/70	6421	3895	2684	1632	789	547

Таблица 3

Рекомендуемые значения модулей упругости асфальтобетонов для расчета на кратковременную нагрузку

Источник: табличные данные получены авторами в результате расчета по формуле (8).

Table 3

**Recommended values of the elastic moduli of asphalt concrete for calculation
the effect of a short-term load application**

Source: compiled by the author as a result of calculation with the use of formula 8.

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	СВП, % (д.е.)	Модуль упругости асфальтобетона, МПа, при температуре, °C					
			0	10	20	30	40	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства покрытия	БНД 130/200	0 (0)	3802	2240	1146	781	521	313
		2 (0,02)	3726	2195	1123	765	511	307
		3 (0,03)	3688	2173	1112	758	505	304
		4 (0,04)	3650	2150	1100	750	500	300
		5 (0,05)	3612	2128	1089	742	495	297
		6 (0,06)	3574	2106	1077	734	490	294
		7 (0,07)	3536	2083	1066	726	485	291
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства покрытия	БНД 100/130	0 (0)	5417	3125	1667	1042	573	365
		2 (0,02)	5309	3063	1634	1021	562	358
		3 (0,03)	5254	3031	1617	1011	556	354
		4 (0,04)	5200	3000	1600	1000	550	350
		5 (0,05)	5146	2969	1584	990	544	347
		6 (0,06)	5092	2938	1567	979	539	343
		7 (0,07)	5038	2906	1550	969	533	339
	БНД 70/100	0 (0)	6667	4323	2813	1510	677	521
		2 (0,02)	6534	4237	2757	1480	663	511
		3 (0,03)	6467	4193	2729	1465	657	505
		4 (0,04)	6400	4150	2700	1450	650	500
		5 (0,05)	6334	4107	2672	1435	643	495
		6 (0,06)	6267	4064	2644	1419	636	490
		7 (0,07)	6200	4020	2616	1404	630	485
	БНД 50/70	0 (0)	7500	5000	3490	1927	938	625
		2 (0,02)	7350	4900	3420	1888	919	613
		3 (0,03)	7275	4850	3385	1869	910	606
		4 (0,04)	7200	4800	3350	1850	900	600
		5 (0,05)	7125	4750	3316	1831	891	594
		6 (0,06)	7050	4700	3281	1811	882	588
		7 (0,07)	6975	4650	3246	1792	872	581

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	СВП, % (д.е.)	Модуль упругости асфальтобетона, МПа, при температуре, °C					
			0	10	20	30	40	50
1	БНД 130/200	3	4	5	6	7	8	9
		0 (0)	3316	1684	842	579	368	263
		3 (0,03)	3217	1633	817	562	357	255
		4 (0,04)	3183	1617	808	556	353	252
		5 (0,05)	3150	1600	800	550	350	250
		6 (0,06)	3117	1583	791	544	346	247
		7 (0,07)	3084	1566	783	538	342	245
		8 (0,08)	3051	1549	775	533	339	242
	БНД 100/130	0 (0)	4684	2421	1316	895	474	368
		3 (0,03)	4543	2348	1277	868	460	357
		4 (0,04)	4497	2324	1263	859	455	353
		5 (0,05)	4450	2300	1250	850	450	350
		6 (0,06)	4403	2276	1237	841	446	346
		7 (0,07)	4356	2252	1224	832	441	342
		8 (0,08)	4309	2227	1211	823	436	339
		0 (0)	5737	3421	2211	1316	579	474
	БНД 70/100	3 (0,03)	5565	3318	2145	1277	562	460
		4 (0,04)	5508	3284	2123	1263	556	455
		5 (0,05)	5450	3250	2100	1250	550	450
		6 (0,06)	5393	3216	2078	1237	544	446
		7 (0,07)	5335	3182	2056	1224	538	441
		8 (0,08)	5278	3147	2034	1211	533	436
		0 (0)	6421	3895	2684	1632	789	547
		3 (0,03)	6228	3778	2603	1583	765	531
	БНД 50/70	4 (0,04)	6164	3739	2577	1567	757	525
		5 (0,05)	6100	3700	2550	1550	750	520
		6 (0,06)	6036	3661	2523	1534	742	514
		7 (0,07)	5972	3622	2496	1518	734	509
		8 (0,08)	5907	3583	2469	1501	726	503
		8 (0,08)	5617	3389	2373	1404	629	436

Примечание: красным шрифтом указаны значения модуля упругости E_{max} для эталонного абсолютно плотного асфальтобетона, а синим шрифтом – значения, совпадающие с модулями упругости E_{GOST} , регламентированными ГОСТ 71404–2024.

При известных значениях модулей упругости эталонного асфальтобетона по формуле (7) можно рассчитать величину модуля упругости при любом СВП, соответствующем допускаемым по ГОСТ Р 58406.2 значениям. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Анализируя данные таблицы 3, отметим, что превышение величины модуля упругости асфальтобетона, вычисленной при наименьшем допустимом содержании воздушных пустот, над значением этого параметра, рассчитанным при наибольшем СВП, составляет чуть более 5%. Казалось бы, разница невелика и фактором влияния СВП на величину модуля упругости в инженерных расчетах можно было

бы пренебречь. Однако, принимая во внимание требования к надежности проектирования дорожных одежд, необходимо отметить, что для капитальных дорожных одежд для дорог I и II категории уровень надежности составляет 0,98 и 0,95 соответственно. Это значит, что уровни значимости или вероятности ошибки составляют всего 2 и 5%. Поэтому учет влияния содержания воздушных пустот на величину модуля упругости является обязательным при проектировании капитальных одежд для дорог I и II категории и желательным для проектирования таких конструкций для дорог III и IV категорий, а также проектирования облегченных дорожных одежд.

Внедрение результатов нашей работы в практику расчета нежесткой дорожной одежды потребует индивидуального подхода к модификации каждого из трех критериев прочности. Такая необходимость продиктована тем, что изменение модуля упругости материала верхнего слоя двухслойной системы неодинаково влияет на изменение рассчитываемых параметров напряженно-деформированного состояния. В связи с этим дадим пояснения об особенностях модификации критериев расчета.

Рассматривая критерий упругого прогиба, отметим, что уменьшение модуля упругости асфальтобетона ($E_{\text{асвп}}$) с увеличением содержания воздушных пустот (СВП) приведет к уменьшению модуля упругости материала верхнего слоя (E_v) в двухслойной расчетной модели. Тогда отношение модуля упругости нижнего слоя (E_n) к модулю упругости верхнего слоя (E_v), наоборот, увеличится. Увеличение отношения (E_n/E_v) приводит к увеличению рассчитываемого отношения ($E_{\text{общ}}/E_v$). Однако в этом отношении $E_v = E_{\text{асвп}}$. Отсюда следует, что увеличение отношения $E_{\text{общ}}/E_v$ компенсируется уменьшением величины E_v , которая равна $E_{\text{асвп}}$. В этом случае сохраняется следствие традиционного расчета, согласно которому чем меньше модуль E_v , тем меньше общий модуль упругости на поверхности двухслойной модели. Тогда модификация критерия по упругому прогибу выполняется простой заменой модулей упругости, регламентируемых ГОСТ Р 71404–2024, на их аналогии, рекомендуемые нами в таблице 3.

Аналогичная замена модулей упругости, регламентированных ГОСТ Р 71404–2024, на рекомендуемые нами значения, возможна в расчете по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна и слоях дорожной одежды из малосвязных материалов. В этом случае чем больше содержание воздушных пустот, тем меньше модули упругости асфальтобетона $E_{\text{асвп}}$. Это приводит к уменьшению модуля упругости верхнего слоя двухслойной модели E_v , величина которого рассчитывается как усредненное значение модулей упругости конструктивных слоев по толщине конструкции, лежащей выше рассчитываемого слоя. В данном случае уменьшение величины E_v приводит к уменьшению отношения E_v/E_n . Тогда для одних и тех же значений отношения h/D и угла внутреннего трения ϕ_n при расчете по номограммам ГОСТ Р 71404–2024, величина

напряжения сдвига от временной нагрузки будет тем больше, чем меньше значение отношения E_v/E_n . Следовательно, чем больше содержание воздушных пустот в верхних слоях дорожной одежды из асфальтобетона, тем больше повреждена дорожная одежда и выше напряжение сдвига в рассчитываемом элементе конструкции. Это соответствует концепции Л.М. Качанова.

Особое место в предлагаемой нами модификации занимает расчет по критерию сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе монолитных слоев. В этом расчете модуль упругости верхнего слоя E_v двухслойной системы рассчитывается как усредненное значение $E_{\text{уср}}$ модулей упругости асфальтобетонных слоев E_i по их суммарной толщине. В данном случае чем больше СВП, тем меньше модуль упругости асфальтобетона E_i в каждом слое, а значит, меньше величина усредненного модуля упругости $E_{\text{уср}}$ и модуля упругости верхнего слоя двухслойной системы E_v . Тогда при уменьшении модуля упругости E_v величина отношения E_v/E_n тоже уменьшится. Уменьшение рассчитываемого растягивающего напряжения σ . Это соответствует представлениям механики сплошной среды, но противоречит концепции Л.М. Качанова, согласно которой чем больше поврежден материал и меньше его сплошность, тем больше эффективное напряжение в нем. Отсюда вытекает необходимость изменения критерия, регламентируемого ГОСТ Р 71404–2024, для расчета асфальтобетонных слоев по сопротивлению усталостному разрушению от растяжения при изгибе. Для этого можно использовать концепцию Л.М. Качанова. Тогда критерий прочности примет вид:

$$\frac{\sigma_r}{(1-\text{СВП}) \cdot k_1} < \frac{R_0 \cdot k_2 \cdot (1 - V_R \cdot t)}{K_{\text{пр}}} , \quad (12)$$

где σ_r – наибольшее растягивающее напряжение в слое асфальтобетона, устанавливаемое расчетом для эталонного условно не-поврежденного асфальтобетона (то есть при нулевом содержании воздушных пустот), характеризующегося модулем упругости E_{max} (см. в таблицах 2 и 3 при нулевой температуре), Па; R_0 – нормативное значение предельного сопротивления растяжению при изгибе; k_1 – коэффициент, учитывающий снижение

прочности вследствие усталостных явлений при многократном приложении нагрузки; k_2 – коэффициент, учитывающий снижение прочности во времени от воздействия природно-климатических факторов; V_R – коэффициент вариации, равный 0,1; t – коэффициент нормированного отклонения.

В левой части критерия (12) напряжение в сплошном асфальтобетоне σ , делится на произведение двух параметров. Первый параметр представляет собой разность единицы и СВП, он аналогичен сплошности Л.М. Качанова и учитывает увеличение эффективного напряжения в результате повреждения структуры материала воздушными пустотами. Второй множитель k_1 – это функция усталости, определяемая так же, как в ГОСТ Р 71404–2024. Этот параметр тоже подобен сплошности Л.М. Качанова, но учитывает эксплуатационную поврежденность материала в результате накапливания повреждений в процессе приложения повторных нагрузок.

Специфику расчета по предлагаемым нами модификациям целесообразно показать в отдельной статье, приведя сопоставительные расчеты по ГОСТР Р 71404–2024 и предлагаемой модификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе выполнен анализ решений по учету влияния усталостных процессов на модуль упругости асфальтобетона и срок службы конструктивных слоев дорожной одежды из этого материала. Такие решения устанавливают функциональные зависимости, описывающие уменьшение модуля упругости и сокращение срока службы из-за накопления в асфальтобетоне повреждений. Показано, что специалисты, разработавшие математические модели, сталкивались с необходимостью принятия введения гипотезы о начальном состоянии асфальтобетонного образца. В этом случае образец считается сплошным, а наличие в нем необходимого содержания воздушных пустот во внимание не принимается. Этот недостаток содержит ГОСТ Р 71404–2024, в котором значения модулей упругости асфальтобетона не зависят от содержания воздушных пустот. Найденное авторами этой работы решение базируется на теории повреждаемости Качанова – Работнова – Леметра, которая является общеизвестной мировым сообществом специалистов в области прочности материалов.

Основываясь на принципе деформационной эквивалентности, получена формула для расчета модуля упругости асфальтобетона, учитывающая начальное содержание воздушных пустот. Согласно результатам расчета, модуль упругости уменьшается при повышении содержания воздушных пустот.

Рекомендуемые значения модулей упругости можно применить при расчете нежесткой дорожной одежды. Специфика их применения показана на примере сравнения результатов расчета по критериям упругого прогиба и сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе. При этом установлено, что разница в модулях упругости асфальтобетона при наибольшем и наименьшем допускаемом содержании воздушных пустот составляет чуть более 5%. При этом отличие общих модулей упругости на поверхности нижнего и верхнего слоев покрытия не превышает 3%. Казалось бы, что различие совсем незначительное, но надежность проектирования дорожных одежд с усовершенствованным покрытием достаточно высокая. Так, капитальные нежесткие дорожные одежды для дорог I, II, III и IV категорий проектируют с надежностью 0,98, 0,95, 0,92 и 0,90 соответственно. Отсюда следует, что учет содержания воздушных пустот в асфальтобетоне при назначении его модуля упругости для расчета по критерию упругого прогиба для дорог I и II категорий обязателен, для дорог III и IV категорий – учет этого фактора можно характеризовать как желательный.

Задачей дальнейшего решения является: разработка предложений по применению вычисленных значений модуля упругости асфальтобетона в расчете нежесткой дорожной одежды. В частности, представляется интересным модификация расчета по критерию упругого прогиба, в которой модуль упругости слоев дорожной одежды из асфальтобетона может быть определен с учетом технологической и эксплуатационной поврежденности. Под технологической поврежденностью понимается необходимое содержание воздушных пустот. Под эксплуатационной поврежденностью понимается увеличения количества повреждений, обусловленное воздействием транспортной нагрузки и климатических факторов. В этом случае модуль упругости асфальтобетона определится по формуле

$$E_D = E_{\max} \cdot (1 - \text{СВП}) \cdot (1 - D)$$

Приоритетной задачей дальнейших исследований является определение функции накопления повреждений D , которая должна учитывать количество расчетных нагрузок, их величину, температуру материала в конструктивном слое, а также состав асфальтобетона. Таким образом, нами намечено движение к созданию модели, не уступающей моделям Хирша и Витчака, а также их современным модификациям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косенко Н.В., Горячев М.Г. Обоснование кратковременных расчетных модулей упругости асфальтобетонов для проектирования дорожных одежд улично-дорожной сети // Наука и техника в дорожной отрасли. 2025. № 2. С. 20–22.
2. Косенко Н.В., Горячев М.Г. Обоснование расчетных характеристик асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2–2020 при проектировании дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. 2022. № 2. С. 24–27.
3. Экспериментальные исследования модулей упругости асфальтобетонов для проектирования дорожных одежд / Н.В. Косенко, М.Г. Горячев, С.М. Дмитриев, С.В. Яркин // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 1. URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS124.pdf>. (дата обращения: 29.10.2025). [Https://doi.org/10.15862/04SATS124](https://doi.org/10.15862/04SATS124)
4. Углова Е.В. Прогнозирование остаточного ресурса асфальтобетонных покрытий с учетом реальных условий эксплуатации // Вестник ВолгГАСУ. Серия Строительство и архитектура. 2010. № 17(36). С.43–47.
5. Uglova E.V., Tiraturjan A.N., Eganyan G.V. Calibration of the prediction model for fatigue damage accumulation in asphalt courses of flexible pavements for the conditions specific to the Russian Federation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. T. 698. Article No 077010. [Https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077010](https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077010)
6. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шило О.А. Прогнозирование накопления усталостных разрушений в асфальтобетонных слоях нежестких дорожных одежд // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 52–61. [Https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006](https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006)
7. Пегин П.А., Капский Д.В., Буртыль Ю.В. Разработка методики оценки продольной ровности при изменении прочности дорожных конструкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 4. С. 37–47. [Https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-37-47](https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-37-47)
8. Буртыль Ю.В., Капский Д.В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретико-практических исследований // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 570–583. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583)
9. Iskakbayev A.I., Teltayev B.B., Rossi C.O. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings // In book: Transport Infrastructure and Systems. 2017. С. 3-8. [Https://doi.org/10.1201/9781315281896-1](https://doi.org/10.1201/9781315281896-1)
10. Elnashar G., Bhat R.B., Sedaghati R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis. // Applied Sciences. 2019. Т. 1. Article No 229. [Https://doi.org/10.1007/s42452-019-0238-5](https://doi.org/10.1007/s42452-019-0238-5)
11. Fahad M., Nagy R. Fatigue damage analysis of pavements under autonomous truck tire passes. // Pollack Periodica. 2022. Т. 17. № (3). С 59–64. [Https://doi.org/10.1556/606.2022.00588](https://doi.org/10.1556/606.2022.00588)
12. Olexa T., Mandula J. Comparison of complex modulus and elasticity modulus of bitumen bonded materials. // Pollack Periodica. 2016; Т. 11. №3. С. 131–140. [Https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.12](https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.12)
13. Aleksandrova N.P., Chusov V.V., Stolbov Y.V. Criteria Of Strength And Plasticity Of Asphalt Concrete With The Account Of Effect Of Accumulation Of The Damage While Influence Of Re-Load. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Т. 463. 2. С. 022021.
14. Chusov V.V., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Accounting Of Damage Of Asphalt Concrete In The Criteria For Calculating The Pavement. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1079. № 5. С. 052016.
15. Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Применение принципа эквивалентности энергетической эквивалентности сплошных и поврежденных тел к расчету асфальтобетонных покрытий по критериям прочности и пластичности // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 3 (711). С. 79–88.
16. Экспериментальное исследование накапливания повреждений в асфальтобетонных покрытиях / Александрова Н.П., Александров А.С., Семенова Т.В., Чусов В.В. // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 4. С. 114–127.
17. Hassan N.A. et al. Effects of air voids content on the performance of porous asphalt mixtures. // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Т 20. № 11. С. 11884–11887.
18. Igwe E.A. Effects of Air Voids Variation on Stiffness Property of HMA Concrete Modified with Rubber Latex. // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2015. Т. 3. № 9. С. 86–93.
19. Igwe E.A., Ottos C.G. Investigating the Effect of Air Voids Content in Fatigue Life of Hot Mix Asphalt Mixtures: Case Study of Rubberized Asphalt Con-

- crete. // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2016. T. 3. № 5. C. 56–64.
20. Salini R., Lenngren C., High air-void volume implications for asphalt concrete service-life and price penalty. // The Civil Engineering Journal. 2022. T. 1, article No 5. C. 1–8.
 21. Baimukhametov G., Gayfutdinov R., Khafizov E. Calculation of the influence of various compaction on the wear resistance of asphalt concrete using material loss calculation approach. // Magazine of Civil Engineering. 2024. T. 17. № 1. Article no. 12505. <Https://doi.org/10.34910/MCE.125.5>
 22. Ekwulo E.O., Eme D.B. Expected traffic, pavement thickness, fatigue and rutting strain relationship for low volume asphalt pavement // The International Journal Of Engineering And Science. 2013. T. 2. № 8. C. 62–77.
 23. Owais M. Analysing Witczak 1-37A, Witczak 1-40D and Modified Hirsch Models for asphalt dynamic modulus prediction using global sensitivity analysis. // International Journal of Pavement Engineering. 2023. T. 24. № 1. Article No 2268808. <Https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268808>
 24. Asadi B., Hajj R., Al-Qadi I.L. Asphalt concrete dynamic modulus prediction: Bayesian neural network approach. // International Journal of Pavement Engineering. 2023. T. 24. No 2. Article № 2270569, <Https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2270569>
 25. Belhaj M., et al. Evaluating Factors Influencing Dynamic Modulus Prediction: GRA-MLR Compared with Sigmoidal Modelling for Asphalt Mixtures with Reclaimed Asphalt. // Infrastructures. 2025. №. 10. Article № 269. <Https://doi.org/10.3390/infrastructures10100269>
 26. Hanandeh S., et al. Prediction the Dynamic Modulus of Hot Asphalt Mix Using Genetic Algorithms and Neural Network Modeling. // Civil Engineering Journal. 2025. T. 11(7): 2765–2781. <Https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-08>
 27. Симчук Е.Н., Жданов К.А., Дедковский И.А. Совершенствование подходов и методов оценки физических и эксплуатационных свойств дорожного асфальтобетона в России // Дороги и мосты. 2021. Вып. 45. № 1. С. 181–221.
- ## REFERENCES
1. Kosenko N.V., Goryachev M.G. Justification of the loading duration of the street and road network pavements. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2025; 2: 20–22. (In Russ.)
 2. Kosenko N.V., Goryachev M.G. Justification of Design Parameters of Asphalt Concrete According to GOST R 58406.22020 for Pavement Design. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2022; 2: 24–27. (In Russ.)
 3. Kosenko N.V., Goryachev M.G., Dmitriev S.M., Yarkin S.V. Investigational studies of asphalt concrete elastic moduli for pavement design. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2024; 11(1). Available at: <Https://t-s.today/PDF/04SATS124.pdf> (in Russ.). <Https://doi.org/10.15862/04SATS124>. (In Russ.)
 4. Uglova E.V. Forecasting of the residual resource asphalt concrete coverings with the account real working conditions. *Bulletin of Volgograd state university of architecture and civil engineering. Series Construction and Architecture*. 2017; 36(17): 43–47 (in Russ.)
 5. Uglova E.V., Tiraturjan A.N., Eganyan G.V. Calibration of the prediction model for fatigue damage accumulation in asphalt courses of flexible pavements for the conditions specific to the Russian Federation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 698: Article No 077010. <Https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077010>
 6. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shilo O.A. Prediction of Failure Fatigue Accumulation in Asphalt Concrete Layers of Flexible Pavements. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019; 55(3): 52–61. (In Russ.) Doi 10.25987/VSTU.2019.55.3.006
 7. Pegin P.A., Kapski D.V., Burtyl Yu.V. Development of Assessment Methodology for Pavement Longitudinal Evenness When Road Construction Durability Changes. *Bulletin of scientific research results*. 2022; 4: 37–47. (In Russ.) <Https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-37-47>
 8. Burtyl Y. V., Kapski D. V. Modelling the relationship of smoothness and resistibility in non-rigid pavements based on theoretical and practical studies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(4): 570–583. <Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>
 9. Iskakbayev A.I., Teltayev B.B. Rossi C.O. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings. In book: *Transport Infrastructure and Systems*. 2017; 3-8. <Https://doi.org/10.1201/9781315281896-1>
 10. Elnashar G., Bhat R.B., Sedaghati R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis. *Applied Sciences*. 2019; 1: Article No 229. doi.org/10.1007/s42452-019-0238-5
 11. Fahad M., Nagy R. Fatigue damage analysis of pavements under autonomous truck tire passes. *Pollack Periodica*. 2022; 17(3): 59–64. <Https://doi.org/10.1556/606.2022.00588>
 12. Olexa T., Mandula J. Comparison of complex modulus and elasticity modulus of bitumen bonded materials. *Pollack Periodica*. 2016; T. 11. №3. C. 131–140. <Https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.12>
 13. Aleksandrova N.P., Chusov V.V., Stolbov Y.V. Criteria Of Strength And Plasticity Of Asphalt Concrete With The Account Of Effect Of Accumulation Of

The Damage While Influence Of Re-Load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; Article No. 022021.

14. Chusov V.V., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Accounting Of Damage Of Asphalt Concrete In The Criteria For Calculating The Pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079: 5: Article No. 052016.

15. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Application of the principle of energy equivalence of continuous and damaged bodies to calculation of asphalt concrete coatings by strength and plasticity criteria. *News of higher educational institutions. Construction*. 2018; 71(3): 79–88.

16. Aleksandrova N.P., et al. Experimental investigation of damage accumulation in asphalt-concrete coatings. *News of higher educational institutions. Construction*. 2019; 724(4): 114–127.

17. Hassan N.A. et al. Effects of air voids content on the performance of porous asphalt mixtures. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016; 20(11): 11884–11887.

18. Igwe E.A. Effects of Air Voids Variation on Stiffness Property of HMA Concrete Modified with Rubber Latex. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2015; 9(3): 86–93.

19. Igwe E.A., Ottos C.G. Investigating the Effect of Air Voids Content in Fatigue Life of Hot Mix Asphalt Mixtures: Case Study of Rubberized Asphalt Concrete. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2016; 3(5): 56–64.

20. Salini R., Lenngren C., High air-void volume implications for asphalt concrete service-life and price penalty. *The Civil Engineering Journal*. 2022; 1: article No 5: 1–8.

21. Baimukhametov G., Gayfutdinov R., Khafizov E. Calculation of the influence of various compaction on the wear resistance of asphalt concrete using material loss calculation approach. *Magazine of Civil Engineering*. 2024; 17(1): Article no. 12505. [Https://doi.org/10.34910/MCE.125.5](https://doi.org/10.34910/MCE.125.5)

22. Ekwulo, E.O., Eme, D.B. Expected traffic, pavement thickness, fatigue and rutting strain relationship for low volume asphalt pavement. *The International Journal Of Engineering And Science*. 2013; 2(8): 62–77.

23. Owais M. Analysing Witczak 1-37A, Witczak 1-40D and Modified Hirsch Models for asphalt dynamic modulus prediction using global sensitivity analysis. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24(1): Article No 2268808. [Https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268808](https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268808)

24. Asadi B., Hajj R., Al-Qadi I.L. Asphalt concrete dynamic modulus prediction: Bayesian neural network approach. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24(2): Article No 2270569, [Https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2270569](https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2270569)

25. Belhaj M., et al. Evaluating Factors Influencing Dynamic Modulus Prediction: GRA-MLR Compared with Sigmoidal Modelling for Asphalt Mixtures

with Reclaimed Asphalt. *Infrastructures*. 2025; 10: Article No 269. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10100269>

26. Hanandeh S., et al. Prediction the Dynamic Modulus of Hot Asphalt Mix Using Genetic Algorithms and Neural Network Modeling. *Civil Engineering Journal*. 2025; 11(7): 2765–2781. [Https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-08](https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-08)

27. Simchuk E. N., Zhdanov K. A., Dedkovsky I. A. Improving approaches and methods for assessing physical and operational properties of road asphalt concrete in Russia. *Roads and Bridges*. 2021; 45(1): 181–221.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Чусов В.В. Сформулировал основную идею работы, установил аналогию между содержанием воздушных пустот в асфальтобетоне и поврежденностью Ю.Н. Работнова, обосновал применимость принципа деформационной эквивалентности к расчету модуля упругости асфальтобетона.

Муртазин Р.Х. Выполнил расчеты величины модуля упругости асфальтобетона в зависимости от содержания воздушных пустот, составил таблицы, дополняющие данные ГОСТ Р 71404–2024.

Александров А.С. Анализ состояния вопроса, написание текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Chusov V.V. Main idea formulation, establishment of the analogy between the void content in asphalt concrete and the damage mechanics described by Yu. N. Rabotnov, justification the applicability of the principle of deformational equivalence to the calculation of the asphalt concrete elastic modulus.

Murtazin R. Kh. Calculations of the asphalt concrete elastic modulus of asphalt concrete depending on the content of air voids, and compiling tables supplementing the data from GOST R 71404-2024.

Aleksandrov A.S. Literature review, writing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чусов Василий Владимирович – преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СиБАДИ), соискатель ученой степени канд. техн. наук (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5765-2726>,

SPIN-код: 2212-2543,

Author ID: 865632,

e-mail: chysow@gmail.com

Муртазин Раис Харисович – магистрант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СиБАДИ), работает над

магистерской диссертацией (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-код: 7573-4997,

Author ID (РИНЦ): 639655,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

gree of Candidate of Technical Sciences. (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

Murtazin Rais Kh. – Master's student, Road Construction and Operation Department, The Siberian State Automobile and Road University (SibADI), currently working on his Master's thesis. (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

Aleksandrov Anatoliy S. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Road Construction and Operation Department, The Siberian State Automobile and Road University (SibADI). (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-code: 7573-4997,

Author ID (РИНЦ): 639655,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chusov Vasiliy V. – Lecturer, Road Construction and Operation Department, The Siberian State Automobile and Road University (SibADI), pursuing a de-

Научная статья

УДК 625.711

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

EDN: ZHZDSN



Check for updates

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЛЬДА

И.С. Кузнецов , В.Н. Кузнецова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»

г. Омск, Россия,

ответственный автор

iulyxa_kuznetsov@vk.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях Сибирского и Уральского федеральных округов эксплуатация нефтегазовых месторождений требует круглогодичного транспортного сообщения. Особое значение имеют автозимники и ледовые переправы, являющиеся ключевыми элементами логистики. Их надежность напрямую зависит от несущей способности льда, что делает актуальным поиск способов её повышения. Цель исследования – экспериментальное определение эффективности применения модифицирующих материалов и добавок для увеличения прочности ледовых переправ.

Методы и материалы. Для анализа использовались образцы льда, изготовленные из дистиллированной и речной воды (р. Иртыш, р. Омь), армированные древесной стружкой (пайкеритом), геосинтетическим материалом Армдор K100, а также с добавлением раствора поливинилового спирта (PVA 1788), и их комбинаций. Испытания проводились при температуре образцов -15°C с использованием лабораторного комплекса Gotech AI-7000 LA 10. Определялась деформативность льда при имитации нагрузки от проезда тяжелой колесной техники.

Результаты. Результаты экспериментов показали, что прочность льда зависит от состава воды – наибольшие показатели были у образцов из дистиллированной воды. Армирование геосинтетическими материалами и использование древесной стружки повышали несущую способность и деформативность льда. При этом применение поливинилового спирта оказалось наиболее эффективным.

Заключение. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования комбинированных технологий усиления льда, особенно в случае сочетания геосеток и модификаторов. Это обеспечивает повышение несущей способности ледовых переправ и возможность их эксплуатации при более высоких нагрузках. Рекомендовано проведение опытно-конструкторских испытаний в реальных условиях для дальнейшей проверки и внедрения предложенных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовая переправа, механические свойства льда, несущая способность льда, предел прочности, модификация льда

Статья поступила в редакцию 12.09.2025; одобрена после рецензирования 14.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Кузнецов И.С., Кузнецова В.Н. Экспериментальное определение физико-механических характеристик модифицированных ледовых покрытий // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 1018-1027. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

© Кузнецов И.С., Кузнецова В.Н., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

EDN: ZHZDSN

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED ICE COATINGS

Ilya S. Kuznetsov , Viktoria N. Kuznetsova

The Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russia

 corresponding author
ilyxa_kyznetsov@vk.com

ABSTRACT

Introduction. In the conditions of the Siberian and Ural Federal Districts, the exploitation of oil and gas fields requires year-round transport communications. Of particular importance are winter roads and ice crossings, which are key elements of logistics. Their reliability directly depends on the bearing capacity of ice, which makes it important to search for ways to increase the latter. The purpose of the study is to experimentally determine the efficiency of using modifying materials to increase the strength of ice crossings.

Methods and materials. Ice samples made from water of various compositions were used for the analysis, as well as ice samples reinforced with various materials: wood chips (pykrete), polyvinyl alcohol solution (PVA 1788), Armendor K100 geosynthetic material and their combinations. The tests were carried out at a temperature of -15 °C with the use of the Gotech AI-7000 LA 10 laboratory complex. The bending strength and deformability were determined when simulating heavy vehicle loads.

Results. The experiments have shown that the ice strength depends on the water composition: the highest values were found in samples made of distilled water. Reinforcement with geosynthetic materials and the use of wood chips significantly increased the bearing capacity and deformability of ice. The use of polyvinyl alcohol turned out to be the most effective.

Conclusion. The obtained results confirm the feasibility of using combined ice reinforcement technologies, especially a combination of geogrids and modifiers. This ensures increased reliability of ice crossings and the possibility of their operation under higher loads. It is recommended to conduct experimental design tests in real conditions for further verification and implementation of the proposed designs.

KEYWORDS: ice crossing, physical and mechanical properties of ice, bearing capacity of ice, tensile strength, ice modification

The article was submitted: September 12, 2025; **approved after reviewing:** December 14, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Kuznetsov I.S., Kuznetsova V.N. Experimental determination of physical and mechanical characteristics of modified ice coatings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 1018-1027.
<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

© Kuznetsov Ilya S., Kuznetsova Viktoria N., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

На территории Сибирского и Уральского федеральных округов расположено множество месторождений нефти и газа, которые чаще всего находятся в отдалении от крупных городов в условиях недостатка транспортной инфраструктуры. Для перекачки добываемых полезных ископаемых обычно используют трубопроводы, но для оснащения нефтепромысловых кустов обязательно необходимы дороги, по которым осуществляется поставка оборудования, необходимых продуктов и персонала. Добыча полезных ископаемых не останавливается круглый год, поэтому важно обеспечить надежность транспортного сообщения в течение всего года. Особенно это актуально в зимний период, ведь для организации транспортного сообщения используют автозимники и ледовые переправы [1, 2, 3, 4].

В большинстве случаев по пути строительства автозимника расположены различные водные преграды, такие как озера и реки. Если пусть следования автозимника прокладывают в обход озер, то обойти реку часто не пред-

ставляется возможным. В таком случае необходимо организовать ледовую переправу, которая должна стать надежным связующим звеном частей сухопутного автозимника. От максимальной несущей способности ледовых переправ зависит максимально допустимая нагрузка на автозимник [5, 6, 7, 8]. Цель исследования состоит в экспериментальном определении наиболее предпочтительных методов повышения несущей способности ледовой переправы путем использования модифицирующих материалов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Расчет несущей способности переправы является достаточно трудоемкой задачей. Существует множество факторов, которые влияют на этот параметр и могут изменяться в широком диапазоне. К сегодняшнему времени сформировано большое количество как теоретических, так и прикладных методов определения несущей способности ледового основания (рисунок 1) [9, 10, 11, 12, 13, 14].

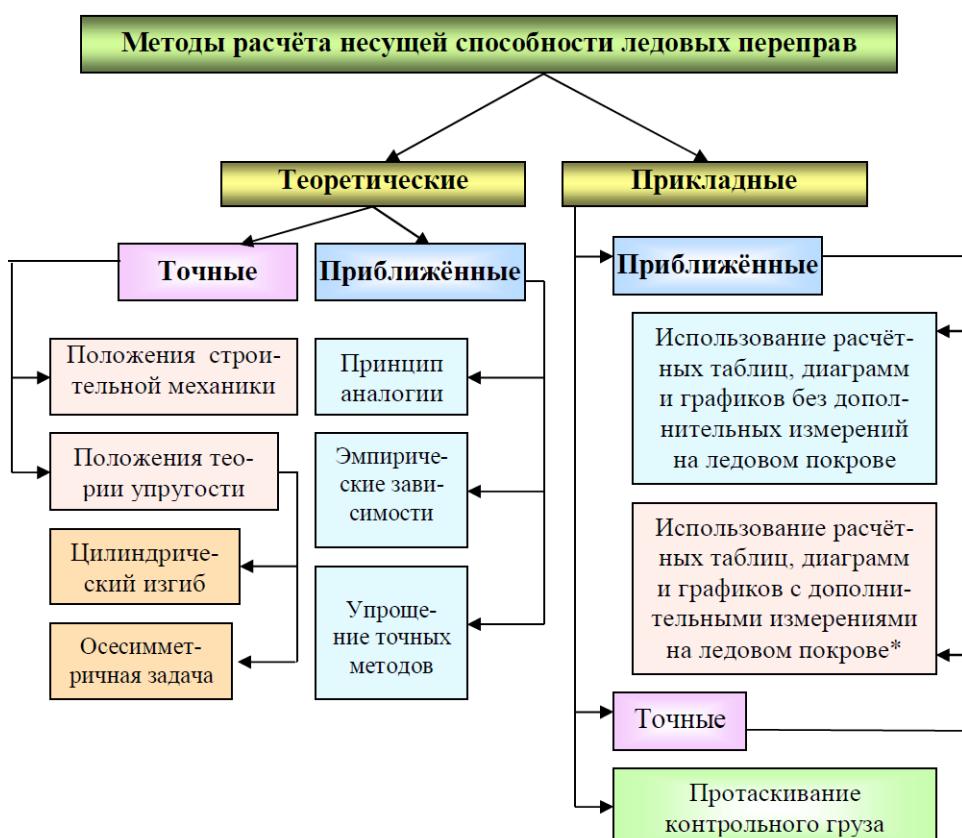


Рисунок 1 – Методы расчета несущей способности [15]

Figure 1 – Bearing capacity calculation methods [15]

Для ускоренного определения несущей способности льда часто используют прикладные методы, такие как таблицы и графики, которые описаны в нормативных документах по строительству ледовых переправ¹. По среднесуточной температуре и по измеренной толщине льда определяют его несущую способность [16, 17, 18, 19]. Но существуют и более точные методы определения прочности льда. Например, на месте обустройства переправы из ледового покрова можно выпилить балочки для последующего испытания при помощи мобильного пресса для определения предела прочности. Такой метод дает более точный результат, так как учитывает фактическое состояние ледового покрытия на месте строительства. Это очень важный параметр, ведь в зависимости от структуры льда его прочность может отличаться на десятки процентов [20, 21, 22, 23].

При лабораторных испытаниях образцов льда можно оценить влияние тех или иных факторов на его прочность. На сегодняшний день отсутствует общепринятая и научно обоснованная методика проведения сравнительных испытаний водного льда.

Для замораживания образцов льда использовали воду из 3 источников: дистиллированная вода, вода из реки Оми, вода из реки Иртыш. Речная вода обладает большим количеством примесей, что влияет на характеристики получаемого льда.

Химический состав р. Иртыш может включать следующие компоненты:

- гидрокарбонаты (в период зимней межени их количество находится в пределах 178–182 мг/л);
- кальций (37,5–38,9 мг/л);
- хлориды (20,5–24,8 мг/л);
- магний (11,6–13,2 мг/л);
- сульфаты (22,91–27,67 мг/л);
- фосфаты-ионы (0,05–0,28 мг/л);
- ионы аммония и аммиака (1–1,23 мг/л).

Также в воде Иртыша могут присутствовать загрязняющие вещества, такие как железо, марганец, цинк, медь, фенолы, нефтепродукты. Их показатели могут значительно превышать ПДК.

Химический состав воды р. Оми характеризуется высокой степенью загрязнённости. Это связано с природными факторами (река берёт начало с Васюганских болот, откуда несёт

воды с большим количеством «химии») и воздействием человека (отходы химических удобренений, которые попадают в воду с дождём и ветром).

Некоторые загрязняющие вещества, которые ежегодно превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) в воде Оми:

- соединения железа (1,5–2,8 ПДК);
- меди (3,6–4,1 ПДК);
- цинка (1,1–2,9 ПДК);
- марганца (16,5–20,3 ПДК);
- фенолы (2–3 ПДК);
- нефтепродукты (1,2–2 ПДК).

Наличие гуминовых соединений и железа приводит к тому, что показатели цветности и мутности Оми регулярно превышают предельно допустимые в 7–10 раз, окисляемости в 3–4 раза.

Для проведения эксперимента были сформированы образцы льда в виде плит размером 700x500x100 мм. В ходе данного эксперимента определяется влияние состава и способа формирования образцов льда на их несущую способность.

Были изготовлены следующие виды образцов:

- лед, сформированный из воды из различных источников (дистиллированная вода, вода из р. Иртыш, вода из р. Оми);
- 5 см льда и 5 см льда с использованием древесной стружки (послойно, снизу вверх);
- 5 см льда и 5 см льда с использованием 2%-го раствора поливинилового спирта (PVA 1788)(послойно, снизу вверх);
- лед, армированный геосинтетическим материалом Армдор K100;
- комбинированная ледяная плита № 1 (5 см льда, геосетка Армдор K100, 5 см льда с использованием древесной стружки)(послойно, снизу вверх);
- комбинированная ледяная плита № 2 (5 см льда, геосетка Армдор K100, 5 см льда с использованием 2%-го раствора поливинилового спирта) (послойно, снизу вверх).

Сформированные образцы замораживались в климатической камере до достижения температуры образцов -15 °C в течение не менее 48 ч. После замораживания проверялись геометрические параметры и ровность образцов. При необходимости выполнялось выравнивание поверхностей плиты с последующим терmostатированием до нужной температуры в течение 24 ч.

¹ ОДН 218.010–98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ [Электронный ресурс]. Введён 1998-10-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания «Кодекс». СПб., 2010.



Рисунок 2 – Общий вид нагружочного устройства и образца льда после испытаний
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – General view of the loading device and ice sample after testing
Source: compiled by the authors.

Нагружение сформированных образцов осуществлялось вертикальным перемещением траверсы лабораторного комплекса Gotech AI-7000 LA 10. Испытания проводятся по разработанной авторской методике, при которой сформированные плиты доводили до разрушения для определения величины разрушающего давления при помощи штампа, имитирующего колесо автомобильной техники. В процессе нагружения выполнялась фиксация показаний индикаторов часового типа ИЧ-10, размещенных на расстоянии 100 мм от места приложения нагрузки. Это позволило определить деформации образцов в процессе нагружения.

Для имитации воздействия тяжелой техники на поверхность ледовой переправы в качестве штампа было использовано колесо, изготовленное из металлического сплава. Радиус колеса составил 180 мм, ширина колеса – 50 мм. В конце каждого эксперимента измерялась площадь пятна нагружения от колеса для определения разрушающего давления.

Образцы плит извлекают из форм, устанавливают на стенд-раму, изготовленную из стальных уголков размером 75x75x5 мм. На внутренней поверхности рамы закреплен слой отражающей теплоизоляции, который необходим для предотвращения оттаивания льда в

ходе проведения эксперимента и имитации нежесткого закрепления образцов, т.е. опирание плиты по контуру.

Для приложения нагрузки на поверхность образца к верхней траверсе испытательной машины закрепляют колесо на специальной оси, которая позволяет избежать смещения точки контакта в ходе проведения эксперимента. Для контроля прогиба верхней образующей поверхности плиты используют индикаторы часового типа. Под наконечники индикаторов подкладывают тонкий слой теплоизоляции, чтобы предотвратить оттаивание льда.

При проведении испытаний на испытательной машине устанавливают скорость вертикального перемещения траверсы, равной 6 мм/мин (рисунок 2).

В процессе приложения нагрузки тензометрический датчик, расположенный на траверсе, определяет и записывает максимальную приложенную к образцу нагрузку (кгс). Кроме того, в процессе нагружения фиксируются показания индикаторов часового типа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 приведены усредненные результаты, полученные при испытаниях не менее чем трех образцов, изготовленных по однотипной технологии.

Таблица 1
Величина разрушающей нагрузки для различных образцов льда
Источник: составлено авторами.

Table 1
The magnitude of the failure load for different ice samples
Source: compiled by the authors.

Вид образцов	Разрушающее давление, МПа
Лёд из дистиллированной воды	0,96
Лёд из воды р. Оми	0,84
Лед из воды р. Иртыш	0,88
Лёд из воды р. Оми с древесными материалами (пайкерит)	1,00
Модифицированный раствором ПВС	0,96
Армированный геосинтетическим материалом	1,05
Комбинированная ледяная плита № 1 (из воды р. Оми) *	1,02
Комбинированная ледяная плита № 2 (из воды р. Оми) **	1,23

* Комбинированная ледяная плита № 1 – конструкция из водного льда, армированного георешеткой и модифицированного древесной стружкой.

** Комбинированная ледяная плита № 2 – конструкция из водного льда, армированного георешеткой и модифицированного 2%-ным раствором поливинилового спирта.

Для образцов, изготовленных из дистиллированной воды и с применением воды из р. Оми, выполнялся контроль прогибов в процессе проведения эксперимента. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2
Величина разрушающей нагрузки и значения прогибов различных образцов льда
Источник: составлено авторами.

Table 2
The magnitude of the failure load and the values of deflections of various ice samples
Source: compiled by the authors.

Водный лёд	Разрушающее давление для льда из воды, МПа		Предельные значения прогиба в центре приложения нагрузки для льда из воды, мм		Предельные значения прогиба, на расстоянии 10 см для льда из воды, мм	
	Дистиллированная	р. Омь	Дистиллированная	р. Омь	Дистиллированная	р. Омь
Без армирования и модификации	0,96	0,84	0	0,1	0	0,08
С древесными материалами (пайкерит)	1,29	1,00	0,02	0,06	0,01	0,01
Модифицированный раствором ПВС	1,19	0,96	0,01	0,05	0	0,06
Армированный геосинтетическим материалом	1,07	1,05	0,06	0,05	0,02	0,02
Комбинированная ледяная плита № 1 *	1,00	1,02	0,01	0,15	0,05	0,1
Комбинированная ледяная плита № 2 **	1,39	1,23	0,08	0,07	0,07	0,05

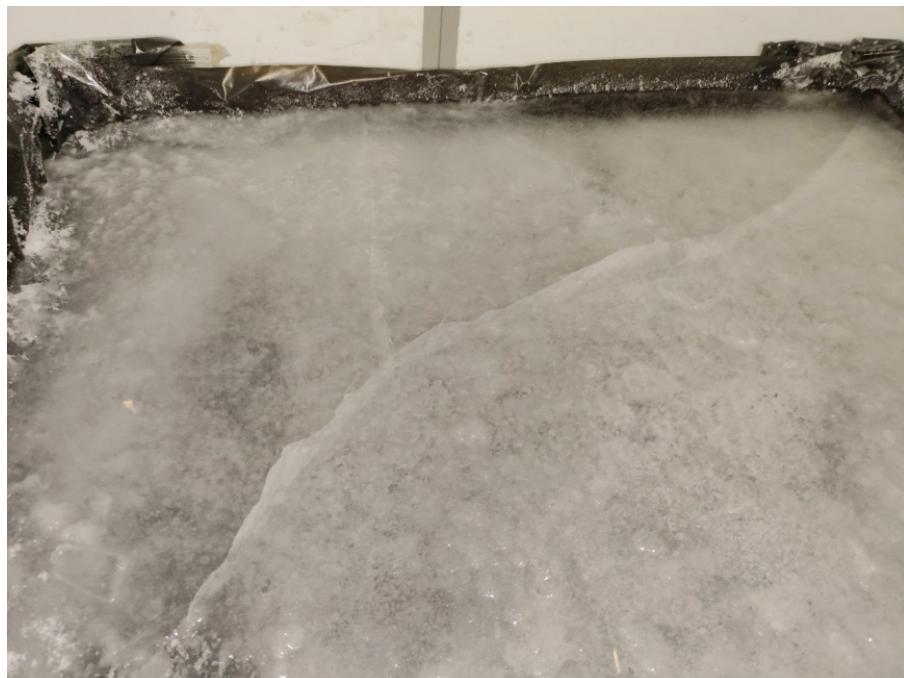


Рисунок 3 – Вид образца, армированного геосинтетическим материалом, после проведения испытаний
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – View of a sample reinforced with geosynthetic material after testing
Source: compiled by the authors.

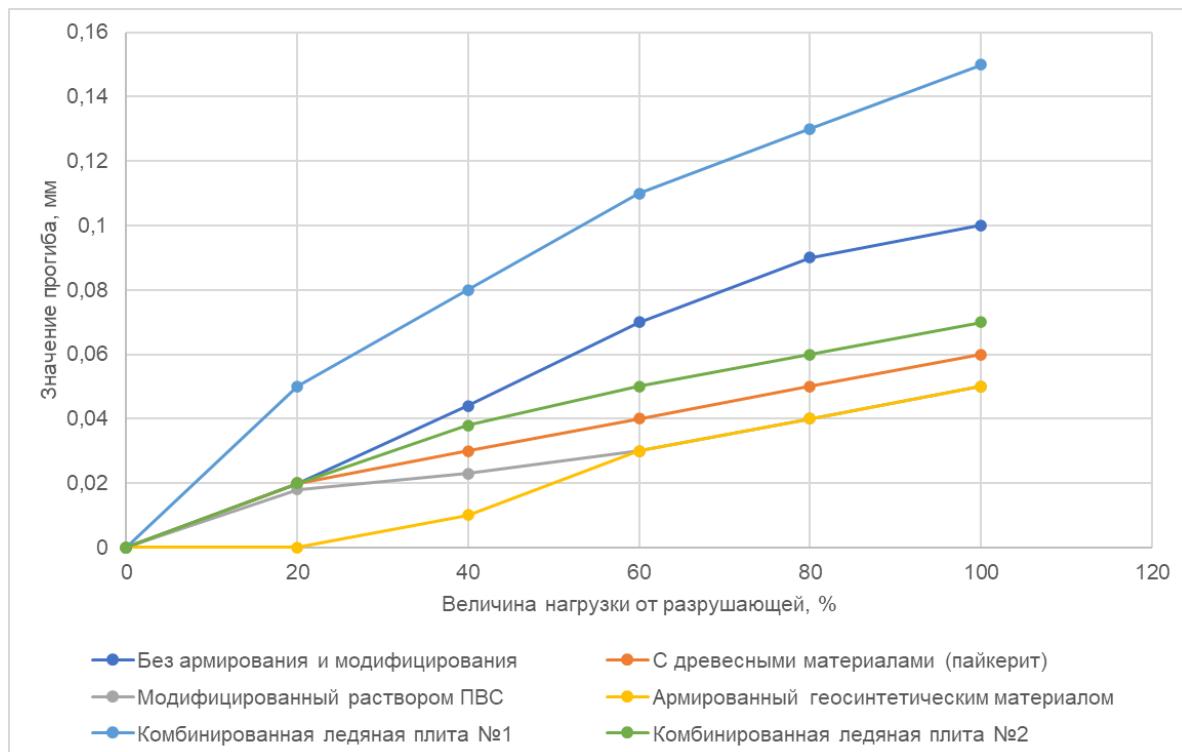


Рисунок 4 – Диаграмма значений прогибов при приложении нагрузки к различным образцам льда
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Deflection values when applying load to different ice samples
Source: compiled by the authors.

Результаты проведенного эксперимента позволяют сделать следующие выводы: если в образце не применяется армирование геосинтетическим материалом, то процесс разрушения водного льда носит хрупкий характер, а все трещины являются сквозными. Использование армирующего слоя позволяет не только распределить нагрузку по большей площади, но и связать отдельные элементы льда после разрушения. При этом на поверхности данной трещина носит закрытый характер, раскрытие трещины происходит в основном под геосинтетическим материалом. На рисунке 3 изображен общий вид образца, армированного геосинтетическим материалом, после проведения испытаний. Подобный характер разрушения также характерен для комбинированной ледяной плиты.

Результаты определения деформативности (прогибов) ледяной плиты без армирования и модифицирования, образцов с армированием и модифицированием, комбинированной ледяной плиты № 1 и комбинированной ледяной плиты № 2 от разрушающей нагрузки приведены на рисунке 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний показывают существенное влияние состава воды на характеристики образцов, полученных с применением водного льда, что необходимо учитывать при проведении проектно-изыскательских работ и обустройстве ледовых переправ с поверхностным намораживанием льда. Разница в значениях прочности между водой из различных источников и дистиллированной водой составляет в среднем 20%. Почти во всех случаях прочность водного льда из дистиллированной воды больше, чем из воды р. Оми и р. Иртыш. Это объясняется значительным количеством примесей, содержащихся в воде, которая находится в естественных условиях. Только армированный георешёткой пайкерит изо льда р. Оми показал прочность несколько выше, чем из дистиллированной воды.

Результаты испытаний показывают эффективность применения модификаторов ледового покрытия и геосинтетических материалов для армирования переправ: прочность увеличивается, при этом деформативность в некоторых случаях становится ниже. Отметим существенное отличие деформативности образцов с применением армирующих геосинтетических материалов и пайкерита от прочих испытанных образцов (к примеру, комбинированная ледяная плита № 1). На наш взгляд,

это связано с образованием дефектов при смачивании водой древесной стружки в районе ее границы с геосинтетическим материалом, что обеспечивает возможность большей деформации, не приводящей к разрушению конструкции.

В дальнейшем, на основании результатов проведенных исследований, могут быть сформированы рекомендации по строительству опытных участков ледовых переправ для проверки предлагаемых конструкций в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автозимников с помощью армирования и модификации льда // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 786–797. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797)
- Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Кузнецова В.Н. Методы расчета несущей способности ледовых переправ // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4(98). С. 606–617. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617)
- Сиротюк В.В., Якименко О.В., Крашенинин Е.Ю., Щербо А.Н. Строительство и испытание опытного участка ледовой переправы, армированной геосинтетическими материалами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 4(21). С. 157–165.
- Годецкий С.В., Кокин О.В., Кузнецова О.А., Цвёцинский А.С., Архипов В.В. Оценка пределов прочности льда на одноосное сжатие в Охотском море по данным измерений и расчётов // Лёд и Снег. 2021;61(4):561–570. [Https://doi.org/10.31857/S2076673421040108](https://doi.org/10.31857/S2076673421040108)
- Babaee H., Barrette P. D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. – National Research Council Canada, 2020.
- Towell K. L. T. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions // Cold Regions Science and Technology. 2022. Т. 198. [Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103508](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103508)
- Li C. et al. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover // Cold Regions Science and Technology. 2023. [Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103925](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103925)
- Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice // Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. – Cham: Springer International Publishing, 2023. pp. 159-203. [Https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9_5)
- Ren D., Park J-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker // Ocean Engineering. 2023. 270 p. [Https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113478](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113478)

10. Alan F., Willem J. Limitations of Gold's formula for predicting ice thickness requirements for heavy equipment // Canadian Geotechnical Journal. 2023. No. 61 (1). pp. 183–188. <Https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0464>
11. Ye L. Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice // Ships and Offshore Structures. 2020. T. 15. no. 5. pp. 535-549. <Https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1661626>
12. Jia B. et al. Peridynamic Simulation of the Penetration of an Ice Sheet by a Vertically Ascending Cylinder // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. T. 12. no. 1. pp. 188. <Https://doi.org/10.3390/jmse12010188>
13. Tugulan C.C. et al. Flexural-Gravity Waves Generated by Different Load Sizes and Configurations on Varying Ice Cover // Water Waves. 2024. pp. 1-17. <Https://doi.org/10.1007/s42286-024-00083-5>
14. Q. Xie Numerical modeling of the stress-strain state of the ice beam by specified constitutive model // Material Science, Engineering and Applications. 1–8, Jun. 2022. Vol. 2, No. 1, pp. <Https://doi.org/10.21595/msea.2022.22278>
15. Якименко О.В., Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами: монография. Омск: ФГБОУ ВПО «СибАДИ», 2015. 166 с. ISBN 978-5-93204-777-4.
16. Сыромятникова А.С. Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переправ // Арктика: экология и экономика. 2022. № 2. 281 с.
17. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials // Cold Regions Science and Technology. 2022. T. 196. P. 103490.
18. Barrette P.D. A laboratory study on the flexural strength of white ice and clear ice from the Rideau Canal skateway. Can. J. Civ. Eng. 2011. 38, 1435–1439.
19. Weyhenmeyer G.A., Obertegger U., Rudebeck H. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. Nat Commun. 2022. 13, 4974. <Https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>
20. Masterson D.M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction. 2009. 58(3), 0–112. <Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.04.002>
21. Коновалов С.В. Обзор физико-механических свойств льда // Вестник науки и образования. 2020. №11-1 (89). С. 34–39.
22. Ren Di, Park Jong-Chun, Hwang Sung-Chul, Jeong Seong-Yeob, Kim Hyun-Soo. Failure simulation of ice beam using a fully Lagrangian particle method. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2019. 11(2). 639–647. <Https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.01.001>
23. Wang Q., Li Z., Lu P., Xu Y., Li Z. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the Prydz Bay // East Antarctic, The Cryosphere. 2022. 16. 1941–1961. <Https://doi.org/10.5194/tc-16-1941-2022>
24. Goncharova G.Y., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Orlov P.V., Dolgodvorov R.E. Loadbearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2023;6(94):786-797. (In Russ.) <Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>
25. Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Kuznetsova V.N. Methods for calculating the bearing capacity of ice crossings. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024;4(98):606-617. (In Russ.) <Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>
26. Sirotiuk V.V., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Krasheninin E.Yu., Shcherbo A.N. Construction and testing of a pilot section of an ice crossing reinforced with geosynthetic materials. Journal of Construction and Architecture. 2008; 4(21):157-165. (In Russ.)
27. Godetsky S.V., Kokin O.V., Kuznetsova O.A., Tsvetinskaya A.S., Arhipov V.V. Estimation of ice strength limits for uniaxial compression in the Sea of Okhotsk according to measurements and calculations. Ice and Snow. 2021;61(4):561-570. (In Russ.) <Https://doi.org/10.31857/S2076673421040108>
28. Babaei H., Barrette P.D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. National Research Council Canada, 2020.
29. Towell K.L. T. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. Cold Regions Science and Technology. 2022; T. 198. <Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103508>
30. Li C. et al. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover. Cold Regions Science and Technology. 2023. <Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103925>
31. Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice. Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. Cham: Springer International Publishing, 2023: 159-203. Https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9_5
32. Ren D., Park J.-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker. Ocean Engineering. 2023: 270. <Https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113478>
33. Alan F., Willem J. Limitations of Gold's formula for predicting ice thickness requirements for heavy equipment. Canadian Geotechnical Journal. 2023; 61 (1): 183–188. <Https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0464>
34. Ye L.Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice. Ships and Offshore Structures. 2020; T. 15. no. 5: 535-549. <Https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1661626>
35. Jia B. et al. Peridynamic Simulation of the Penetration of an Ice Sheet by a Vertically Ascending Cylinder. Journal of Marine Science and Engineering. 2024; T. 12. no 1: 188. <Https://doi.org/10.3390/jmse12010188>
36. Tugulan C.C. et al. Flexural-Gravity Waves Generated by Different Load Sizes and Configurations on Varying Ice Cover. Water Waves. 2024: 1-17. <Https://doi.org/10.1007/s42286-024-00083-5>
37. Xie Q. Numerical modeling of the stress-strain state of the ice beam by specified constitutive model. Material Science, Engineering and Applications. 2022;

REFERENCES

1. Goncharova G.Y., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Orlov P.V., Dolgodvorov R.E. Loadbearing ca-

Vol. 2, No. 1: 1–8, Jun. 2022. [Https://doi.org/10.21595/msea.2022.22278](https://doi.org/10.21595/msea.2022.22278)

15. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Strengthening ice crossings with geosynthetic materials. Omsk, SibADI, 2015: 166. (In Russ.)
16. Syromyatnikova A.S. Perspektivy primenjenija ledjanyh kompozicionnyh materialov dlja stroite l'stavaledovyh pereprav [Prospects for the use of ice composite materials for the construction of ice crossings] Arktika: jekologijaijekonomika. 2022; 2: 281. (in Russ.)
17. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022; T. 196: 103490.
18. Barrette P.D. A laboratory study on the flexural strength of white ice and clear ice from the Rideau Canal skateway. *Can. J. Civ. Eng.* 2011; 38: 1435–1439.
19. Weyhenmeyer G.A., Obertegger U., Rudebeck H. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *NatCommun.* 2022; 13, 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>
20. Masterson D.M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction. 2009; 58(3), 0–112. doi:10.1016/j.coldregions.2009.04.002
21. Konovalov S.V. Review of physical and mechanical properties of ice. *Vestnik nauki i obrazovanija*. 2020; 11-1 (89): 157-165. (In Russ.)
22. Ren Di, Park Jong-Chun, Hwang Sung-Chul, Jeong Seong-Yeob, Kim Hyun-Soo. Failure simulation of ice beam using a fully Lagrangian particle method. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2019; 11(2): 639–647. doi:10.1016/j.ijnaoe.2019.01.001
23. Wang Q., Li Z., Lu P., Xu Y., Li Z. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the Prydz Bay. *East Antarctic, The Cryosphere*. 2022; 16: 1941–1961. [Https://doi.org/10.5194/tc-16-1941-2022](https://doi.org/10.5194/tc-16-1941-2022)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кузнецов И.С. Обзор результатов предшествующих исследований. Выбор методологии и методов исследования. Разработка плана эксперимента и его реализация. Обработка полученных данных. Формулировка результатов и выводов (60 %).

Кузнецова В.Н. Формулирование проблемы, направления и темы исследования. Постановка задачи исследования. Руководство процессом разработки темы (40 %).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kuznetsov I.S. Review of previous research results, selection of research methodology and methods, development of an experimental plan and its implementation, processing of the obtained data, formulation of results and conclusions. (60 %).

Kuznetsova V.N. Defining the research area, topic and the research question, research design, setting the main objectives and monitoring the research process. (40 %).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Илья Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,

SPIN-код: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kuznetsov@vk.com

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN-код: 1039-7546,

e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Ilya S. – Associate Professor, the Department of Operation of Oil and Gas and Construction Equipment, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (5, ave. Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,

SPIN-code: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kuznetsov@vk.com

Kuznetsova Victoria N. – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Professor at the Department of Operation of Oil and Gas and Construction Equipment, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (5, ave. Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN-код: 1039-7546,

e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция признает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (**УДК**) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссыльаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики представляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы представляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

ОБЩИЙ ПОРЯДОК ОПУБЛИКОВАНИЯ

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятими редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присыпаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректура статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высыпаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.