

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



научный рецензируемый журнал

• **ВЕСТНИК** The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

СИБАДИ •

“Vestnik SibADI”

Том 23, № 2. 2026
Vol. 23, No. 2. 2026

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
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: 10.26518/2071-7296-2026-23-2

TOM 23, № 2. 2026

VOL. 23, No. 2. 2026



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;

Издается с 2004 года
Периодичность издания – 6 раз 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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2026

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 ПИ № 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 – р 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 ВИНТИ 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 30.04.2026. Дата выхода в свет 30.04.2026. 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.

Исключительное 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)», 2026

"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 vestnik.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 30.04.2026. Publication date is 30.04.2026. Format is 60 × 84 1/8.

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)", 2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Жигadlo Александр Петрович, д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф., член-кор. АН, 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** 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

Бурьянов Александр 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** 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 AuthorID 6603741286, **ResearcherID** 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 AuthorID 10040194400, **ResearcherID** AAM-4262-2021, **ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

Гумаров Гали Сагингалиевич, д-р техн. наук, проф., член-кор. Российская Академия Естественных наук. 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» Донской государственный технический университет, 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** 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** 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 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 55887733300, **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 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016 **ORCID ID** 0000-0002-2378-3947

Макеев 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 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 Ысманалиевич, д-р техн. наук, проф.
КГТУ им. И. Раззакова, г. Бишкек, Киргизская Республика.
Researcher ID P-2811-2017, **ORCID ID** 0000-0001-5393-7700

Мещеряков Виталий Александрович, 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 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. д-р наук, доц. инженерного факультета.
Международный дистанционный университет 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, проф.
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, проф.
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., проф.
Мичиганский технологический университет, Хаутон, США.
Scopus Author ID 14420403300, **Researcher ID** P-4406-2015,
ORCID ID 0000-0002-9103-6599

Эдвин 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 Alexandr 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 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 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 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 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 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

Taalaibek 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, Plsen, 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

Zhirkalbek 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, Bialystok, 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. Maksimyyuk
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***В.Н. Дятлов, В.А. Попов***ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ДЕГРАДАЦИИ
ПРИ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ 172***А.П. Миллер, К.Г. Пугин, Р.Ф. Шаихов***ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ГИДРОЦИЛИНДРОВ 184***К.А. Гундарев, С.В. Кондаков, А.В. Подзерко, М.А. Асфандияров, И.Е. Левшин***КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ 196****РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ***С.А. Бурага, И.Е. Азуреев***АЛГОРИТМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАНЦИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
И СТРАХОВЩИКА ПРИ РЕМОНТЕ АВТОМОБИЛЕЙ..... 210***М.В. Банкет, Р.Е. Шипицына, И.А. Эйхлер, И.В. Погуляева***АНАЛИЗ ПОТЕРЬ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ МЕХАНИКАМИ
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ 224***Р.М. Хамитов***МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ АВАРИЙНО-ОПАСНЫХ ЗОН НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ О ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ 240***И.И. Тараховский, А.Ю. Михайлов***ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАКРОСКОПИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ 254***А.И. Фадеев, А.М. Ильянков***ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖДУГОРОДНЕГО ПАССАЖИРСКОГО СПРОСА ПОСРЕДСТВОМ СИСТЕМЫ
ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА..... 266***И.В. Анохов, Н.Ю. Торопов***ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РЕШЕНИЯ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ (ТРИЗ)
ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ АВТОТРАНСПОРТА
И РАЗРАБОТКИ МАТРИЦЫ ЗРЕЛОСТИ 282***А.А. Юнг, А.Г. Шевцова, Д.А. Полещенко, Ю.А. Цыганков***РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ АВАРИЙНОСТИ ОБЪЕКТОВ
НА ГОРОДСКОЙ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ 294***А.Т. Саргсян***РАЗРАБОТКА МЕТОДА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ
ГОРОДСКИХ ПЕРЕКРЁСКОВ НА ОСНОВЕ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ 306***Б.В. Журавский, С.И. Цехош***УГЛУБЛЕННОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФОРСУНОК
АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМЫ ВПРЫСКА ТОПЛИВА СИЛОВОГО АГРЕГАТА АВТОМОБИЛЯ 316***Е.А. Двоеглазов, О.А. Козелков, Ф.К. Дьяков***МЕТОД БОРТОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПО СПЕКТРУ ТОКОВ СТАТОРА 334****РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА***В.И. Сологеев***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТА ИЛИ МАТЕРИАЛА
ПРИ ЗАЩИТЕ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ 350**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Vyacheslav N. Dyatlov, Valery A. Popov

**VISUAL AND OPTICAL METHOD FOR CORROSION DEPTH ASSESSMENT
OF ESCALATOR METAL STRUCTURES..... 173**

Alexandr P. Miller, Konstantin G. Pugin, Rinat F. Shaikhov

ADDITIONAL PARAMETERS IN THE TECHNICAL DIAGNOSTICS OF HYDRAULIC CYLINDERS..... 185

Kirill A. Gundarev, Sergey V. Kondakov, Alexander V. Podzerko

KINEMATIC ANALYSIS OF NEW DESIGN OF DEEP SOIL COMPACTION EQUIPMENT 197

PART II. TRANSPORT

Sergey A. Buraga, Igor E. Agureev

**INTERACTION ALGORITHMS BETWEEN AUTOMOBILE SERVICE CENTERS
AND THE INSURANCE COMPANIES DURING CAR REPAIR 211**

Mikhail V. Banket, Roksana Ye. Shipitsyna, Ivan A. Eychler, Irina V. Pogulyaeva

ANALYSIS OF THE WORKING TIME LOSS BY MECHANICS PERFORMING CAR MAINTENANCE... 225

Renat M. Khamitov

**METHODOLOGY FOR IDENTIFYING ACCIDENT-PRONE ZONES BASED
ON SPATIAL CLUSTERING OF ROAD ACCIDENT DATA..... 241**

Igor I. Tarakhovsky, Alexander Yu. Mikhailov

ON THE CHOICE OF MACROSCOPIC TRAFFIC FLOW MODELS FOR TRAFFIC MONITORING 255

Aleksandr I. Fadeyev, Aleksey M. Ilyankov

**DETERMINATION OF INTERCITY PASSENGER DEMAND
BY MEANS OF A VEHICLE VIDEO SURVEILLANCE SYSTEM..... 267**

Igor V. Anokhov, Nikolay Yu. Toropov

**THEORY OF INVENTIVE PROBLEM SOLVING (TIPS) IN THE FIELD OF AUTOMOBILE TRANSPORT:
AN ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR INTELLECTUALIZATION AND THE DEVELOPMENT
OF A MATURITY MATRIX 283**

Anastasia A. Jung, Anastasia G. Shevtsova, Dmitry A. Poleshchenko, Yury A. Tsygankov

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING TRAFFIC ACCIDENT RISK
ON URBAN ROAD NETWORKS 295**

Arman T. Sargsyan

**DEVELOPMENT OF METHOD FOR ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL AT URBAN
INTERSECTIONS BASED ON VEHICLE NAVIGATION DATA 307**

Boris V. Zhuravsky, Sofia I. Tsekhosh

**IN-DEPTH DIAGNOSTICS OF ELECTROHYDRAULIC INJECTORS FOR BATTERY-POWERED
FUEL INJECTION SYSTEM OF VEHICLE POWERTRAIN 317**

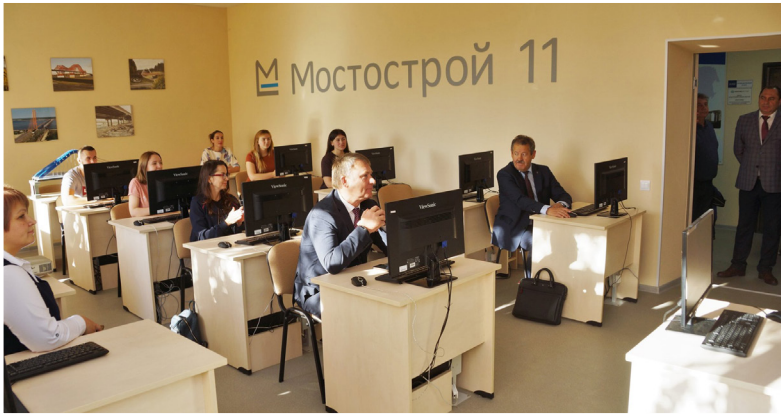
Egor A. Dvoeglazov, Oleg A. Kozelkov, Philip K. Dyakov

**ON-BOARD DIAGNOSTICS METHOD FOR DETECTING BEARING DEFECTS IN TRACTION
SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET MOTORS BASED ON STATOR CURRENT SPECTRUM 335**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Valeriy I. Sologaev

**DETERMINATION OF AIR PERMEABILITY OF SOIL OR MATERIAL
IN PROTECTION FROM FLOODING IN URBAN CONSTRUCTION..... 351**



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



**PART I.
TRANSPORT,
MINING AND MECHANICAL
ENGINEERING**

Научная статья
УДК 621.876.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>
EDN: CJDDZO



ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ

В.Н. Дятлов¹ ✉, **В.А. Попов²**

¹Инженерно-экономический лицей имени Академика И.М. Виноградова,
г. Великие Луки, Россия

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор
w.dyatlov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Несущая металлоконструкция является основой эскалатора: на неё монтируются приводные агрегаты, тяговые системы, ограждающие устройства и другие узлы, обеспечивающие собственно его работу. Один из наиболее типичных видов коррозионного разрушения металлоконструкций эскалаторов – сплошная равномерная коррозия по всей поверхности. Данный процесс характеризуется поступательным проникновением коррозионных изменений от наружных слоёв материала к его внутренней структуре, что приводит к уменьшению эффективного поперечного сечения и снижению прочностных характеристик и, при практически неизменных эксплуатационных нагрузках, к росту значений возникающих механических напряжений.

Основная цель настоящего исследования заключается в снижении трудовых и финансовых затрат комплексных обследований металлоконструкций эскалаторов за счёт внедрения дистанционных методов контроля, которые обеспечивают непрерывный мониторинг за их состоянием и позволяют автоматизировать расчётные процедуры, повышая тем самым свою эффективность без снижения качества оценок технического состояния.

Материалы и методы. При написании статьи были использованы данные комплексного обследования эскалаторов ГУП «Петербургский метрополитен», реализованного совместно экспертной организацией ООО «СТЭК» и специалистами кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), использовались конструкторская документация, статистические методы и методы математического моделирования.

Результаты. Функциональный принцип предлагаемого визуально-оптического метода диагностики предполагает использовать как составной элемент комплексной системы наблюдения за коррозией, ориентированной на непрерывную оценку эксплуатационного состояния несущих металлоконструкций эскалаторов и на заблаговременное выявление возможных отказов, связанных с развитием коррозионного повреждения.

Заключение. Предлагаемый метод обеспечивает комплексную количественную оценку коррозионных повреждений по трём параметрам: по глубине проникновения, по локальным (очаговым) дефектам и по изменению механических свойств металла. Расширение спектра одновременно оцениваемых характеристик приводит как минимум к 30-процентному росту информативности результатов, что даёт возможность в полтора раза повысить корректность прогноза остаточного ресурса металлоконструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метрополитен, эскалатор, металлоконструкция, визуально-оптический метод, коррозия, математическое моделирование

Статья поступила в редакцию 08.02.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Дятлов В.Н., Попов В.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Дятлов В.Н., Попов В.А. Визуально-оптический метод определения глубины деградации при коррозионных повреждениях металлоконструкций эскалаторов // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 172-183. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>

EDN: CJDDZO

VISUAL AND OPTICAL METHOD FOR CORROSION DEPTH ASSESSMENT OF ESCALATOR METAL STRUCTURES

Vyacheslav N. Dyatlov¹ ✉, Valery A. Popov²

¹Engineering and Economics Lyceum named after Academician I.M. Vinogradov
Velikiye Luki, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

✉ corresponding author

w.dyatlov@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Supporting metal structure is the basis of escalator: drive units, track systems, guard devices, and other components that ensure the escalator operation are mounted on it. One of the most common types of corrosion damage on escalator metal structures is uniform corrosion over the entire surface. This process is characterized by progressive penetration of corrosion from the material outer layers to its internal structure, resulting in a decreased effective cross-section and reduced strength characteristics. As operating loads remain relatively constant, this leads to increased strain.

The implications of this study refer to reduced labor and financial costs of comprehensive inspections of escalator metal structures through introducing remote control methods that provide continuous monitoring of their condition and allow for the automation of calculation procedures, thereby increasing their efficiency without compromising the quality of technical condition assessments.

Materials and methods. Data from a comprehensive survey of escalators of St. Petersburg Metro State Unitary Enterprise have been used, the study being completed by STEK LLC expert organization and specialists from Land Transport and Technological Complexes Department of St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (PSUTS). Analysis of design documentation, statistical methods and mathematical modeling has been used in the study.

Results. The functional principle of the proposed visual-optical diagnostics method is to be used as an integral part of a comprehensive corrosion monitoring system aimed at continuous assessment of the operational condition of escalator load-bearing metal structures and early identification of potential failures associated with the development of corrosion damage.

Conclusion. The proposed method provides a comprehensive quantitative assessment of corrosion damage based on three parameters: penetration depth, local (focal) defects, and changes in the mechanical properties of the metal. Expanding the range of characteristics leads to at least a 30% increase in informative value of the results, which allows for a 1.5-fold improvement in the accuracy of predicting the residual life of metal structures.

KEYWORDS: subway, escalator, metal structure, visual-optical method, corrosion, mathematical modeling

The article was submitted: February 08, 2025; approved after reviewing: March 12, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Dyatlov V.N., Popov V.A. Visual and optical method for corrosion depth assessment of escalator metal structures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 172-183. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>

© Dyatlov Vyacheslav N., Popov Valery A., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодная утрата металла из-за процессов коррозии в мировом масштабе достигает примерно десяти части от общего фонда^{1, 2}. Эта тенденция оказывает существенное влияние на машиностроительное производство, вынуждая отрасль искать эффективные способы диагностики и превентивного выявления коррозионных разрушений.

Многообразие форм коррозионных повреждений предполагает использование различных критериев оценки^{3, 4}, в качестве которых выступают потеря массы, уменьшение геометрических параметров сечений элементов, изменение механических характеристик и т.д. Перечень необходимых оценочных параметров в первую очередь зависит от природы развивающегося коррозионного процесса.

Один из наиболее типичных видов коррозионного разрушения металлоконструкций эскалаторов – сплошная равномерная коррозия по всей поверхности [1, 5, 13]. Данный процесс характеризуется последовательным проникновением коррозионных изменений от наружных слоёв материала к его внутренней структуре, что приводит к значительному уменьшению прочностных и, соответственно, их несущих свойств. С уменьшением площади поперечного сечения возрастает уровень механических напряжений под действием внешних практически неизменяемых эксплуатационных нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Параметром, используемым для оценки интенсивности коррозионного разрушения, служит глубина деградации δ [1, 2, 8], определяемая по отношению к фиксированному сроку экспозиции изделия τ по формуле

$$\delta = v \cdot \tau, \quad (1)$$

где v – усредненное значение скорости коррозии, мм/год;

Современные методики предоставляют широкий арсенал технологий для оценки кор-

розийного состояния элементов металлоконструкций эскалаторов [6, 7]. При этом процедуры обследования и диагностики выполняются в соответствии с программой экспертизы с применением неразрушающих методов контроля, а также в соответствии с «СТО 9701105632-003–2021. Инструкция по визуальному и измерительному контролю, регламентирующему порядок визуальной и инструментальной проверки». Охарактеризуем некоторые из них (таблица 1).

Вышеуказанные способы диагностирования сплошной коррозии нашли наиболее широкое применение. Для более точного количественного определения глубины деградации δ чаще всего применяют ультразвуковую толщинометрию – данная технология обеспечивает высокий уровень достоверности результатов, в то же время область её использования существенно ограничена рядом факторов:

– локальность измерений – при проведении измерений с использованием данной технологии толщина элемента металлоконструкции определяется лишь в одной конкретной точке. Чтобы получить представление о размерах зоны, затронутой коррозией, требуется существенно увеличить количество точек измерения, что, в свою очередь, приводит к росту трудозатрат оператора и усложнению процесса диагностики;

– недоступность ряда участков контролируемой поверхности исследуемых объектов – для определения глубинного параметра δ требуется прямой контакт пьезоэлектрического преобразователя с исследуемой зоной, опыт же практической эксплуатации металлоконструкций [3, 5, 11, 16] показывает, что наиболее интенсивному коррозионному износу зачастую подвергаются области, расположенные в местах с затруднённым доступом или его полным отсутствием;

– подготовка поверхности перед проведением контроля – данный этап предполагает зачистку участков с очагами коррозии до появления чистого металлического слоя и обработку зоны контроля контактной жидкостью для повышения качества сигналов [4, 18, 19].

¹ Schweitzer P.A. Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals. Boca Raton, CRC Press, 2006, 752 p.

² Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969. 448 с.

³ Сероштан В.И. Диагностика грузоподъемных машин. М.: Машиностроение, 1992. 192 с.

⁴ Поминов И.Н. Эскалаторы метрополитена. Устройство, обслуживание и ремонт. М.: Транспорт. 1994. 320 с.

Таблица 1

Характеристика способов диагностирования сплошной поверхностной коррозии металлоконструкций
Источник: составлено авторами.

Table 1

Characteristics of methods for diagnosing continuous surface corrosion of metal structures

Source: compiled by the authors.

Метод диагностики	Принцип работы	Принцип определения показателя коррозии	Преимущества	Недостатки
Визуальная оценка	Качественное сравнение реальных очагов коррозии и фотоматериалов, описание процессов и текущего состояния объекта	Дедукция – заключение делается по общему состоянию очага коррозии	Низкая трудоемкость, доступность оборудования, отсутствует необходимость в предварительной обработке поверхности	Высокая субъективность и низкая точность количественной оценки
Ультразвуковая толщинометрия	Измерение толщины конструктивного элемента прямым способом: на заранее подготовленную (очищенную и выровненную) поверхность устанавливается измерительный датчик	Индукция – заключение экспертизы производится по частным замерам	Точная количественная оценка	Высокая трудоемкость, требует наличия специального оборудования и соответствующей подготовки персонала

Учитывая рассмотренные ограничения и особенности существующих методов, представляется целесообразным выделить ряд условий, выполнение которых значительно повысит эффективность оценки степени коррозионного износа металлических конструкций:

– дедуктивность оценки – определение δ по общему состоянию очага коррозии при общем сокращении числа обязательных замеров без ущерба для достоверности;

– простота и устойчивость выбранного метода – уменьшение трудозатрат при выполнении контроля непосредственно связано с оптимизацией финансовых ресурсов [9, 10, 16];

– доступность применяемого оборудования – чем больше оно унифицировано и шире распространено, тем быстрее проходит обучение специалистов и тем выше оперативность и экономичность обследований;

– дистанцирование и автоматизация процесса диагностирования – дистанционный мониторинг способствует не только расширению возможностей автоматизации, но и снижению риска для сотрудников, задействованных в обследовании объектов.

Значительная часть из предъявляемых выше требований может быть реализована с помощью визуально-оптического подхода, для чего в практической деятельности предла-

гается использовать цифровые фотокамеры совместно с портативными вычислительными устройствами.

Для корректной фиксации цветностных характеристик коррозионных повреждений фотокамеры должны обладать:

– возможностью съёмки в RAW-формате с глубиной не менее 12 бит;

– широким динамическим диапазоном и нейтральной цветопередачей матрицы;

– ручной установкой баланса белого и выбором нейтрального цветового профиля;

– оптикой, обеспечивающей макросъёмку без существенных геометрических и цветовых искажений.

При проведении съёмки в кадр обязательно вводится цветовой или серый эталон, а условия освещения и настройки камеры фиксируются и воспроизводятся при всех повторных измерениях.

Выделяя ключевые преимущества такого метода, важно отметить, что фотосъёмка корродированных участков позволяет выполнять дедуктивность оценки степени коррозионного разрушения посредством максимального использования функций разрешения объективов, снижая тем самым затраты времени и материальных ресурсов, а также минимизируя физическое участие персонала в обследовании. Оборудование, представленное фотока-

мерами и портативными вычислительными устройствами, отличается широкой доступностью и распространенностью, что дополнительно способствует упрощению организации контроля.

Анализ показал, что главные условия для эффективной оптимизации в достаточной степени могут быть реализованы, но вместе с тем, как и при использовании простого метода визуальной оценки, основной проблемой здесь остается значительный уровень субъективности восприятия и ограниченная точность количественной интерпретации величины δ .

Это обстоятельство приводит к необходимости разработки подходов, способных повысить достоверность и объективность определения глубинного показателя коррозии методом визуально-оптического диагностирования.

Для повышения точности количественной диагностики коррозии требуется детальный анализ хемосорбционных явлений, происходящих на поверхности материалов, подвергающихся коррозионному износу.

Образование ржавчины связано с протеканием на поверхности железа и созданных на его основе сплавов ряда окислительно-восстановительных процессов в присутствии электролитсодержащей среды, то есть представляет собой типичный случай электрохимической коррозии. Образующийся слой ржавчины не является однородным⁵ – в его составе выделяют три отдельных подслоя, причем адгезионные свойства возрастают по мере приближения к основному металлу.

Особое внимание заслуживает механизм образования ржавчины, связанный с атмосферным воздействием, когда влага из воздуха конденсируется на поверхности или попадает на неё напрямую по ряду различных причин⁶. Слой ржавчины, возникающий в подобных условиях, имеет сложную фазовую структуру и включает сочетания гидроокислов гетита (α -FeOOH), лепидокрокита (γ -FeOOH) и окисла магнетита (Fe_3O_4)⁷.

Для отдельно взятого подслоя соотношение этих соединений заметно различается. В приповерхностной зоне преобладают гетит и лепидокрокит при незначительном присутствии магнетита; в промежуточном подслое основными фазами становятся гетит и магнетит, тогда как лепидокрокит присутствует в сравнительно меньшем объёме; внутренний подслой практически полностью состоит из магнетита и феррита с небольшими вкраплениями гетита [1, 4, 11, 14, 15].

При диагностировании коррозионных повреждений оценивается прежде всего состояние поверхности очага коррозии, исходя из того, что в процессе развития атмосферной коррозии именно поверхностный подслой со временем отслаивается и постепенно осыпается, открывая доступ агрессивной среде и способствуя развитию коррозионных процессов вглубь материала.

Так как при диагностике фактически оценивается главным образом состояние наружной поверхности очагов коррозионных поражений, ключевым направлением исследования становится анализ параметров именно внешнего подслоя коррозионных продуктов (ржавчины)⁸.

В этом слое формируются основные продукты окисления – гидроокислы гетита и лепидокрокита, при наличии морской атмосферы или повышенного содержания хлорид-ионов возможно также формирование акаганеита. На начальных этапах развития коррозии преобладание лепидокрокита определяется ограниченной доступностью кислорода, за счёт чего ржавчина принимает темно-зеленый оттенок⁹. По мере экспозиции, в результате последующего окисления, содержание лепидокрокита постепенно снижается, и уже через два года компонент может полностью отсутствовать, уступая место более насыщенному кислородом гетиту с характерной темно-красной окраской. Сам факт формирования гетита сопровождается практически полным исчезновением лепидокрокита [2, 4, 20].

⁵ Продукты атмосферной коррозии железа и окраска по ржавчине / О. Кукурс, А. Упите, И. Хонзак [и др.]. Рига: Зинатне, 1980. 163 с.

⁶ Физико-химические свойства окислов: справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова [и др.]; под общ. ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1987. 472 с.

⁷ Сухотин А.М. Физическая химия пассивирующих пленок на железе. Л.: Химия, 1989. 320 с.

⁸ Продукты атмосферной коррозии железа и окраска по ржавчине / О. Кукурс, А. Упите, И. Хонзак [и др.]. 163 с.

⁹ Физико-химические свойства окислов: справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова [и др.]; под общ. ред. Г.В. Самсонова. 472 с.

Существенную роль в свойствах наружного подслоя также играет магнетит, концентрация которого напрямую определяется условиями внешней среды, в частности уровнем загрязненности атмосферы смесями, включающими в свой состав хлорид-ионы, и газами типа SO_2 .

На основании проведенного анализа фазового состава продуктов коррозии можно сделать вывод, что концентрацию одного из окислов, входящих в состав внешнего подслоя ржавчины, целесообразно использовать в качестве значимого диагностического показателя.

В частности, усредненное значение скорости коррозионного разрушения v может быть оценено по доле магнетита, зафиксированной во внешнем подслое ржавчины, поскольку именно этот показатель непосредственно репрезентирует воздействие степени агрессивности окружающей эксплуатационной среды на протекание коррозионного процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно данным рисунка 1 получаем следующую зависимость:

$$v = 0,0086 + 0,0054 \cdot e^{0,1263 \cdot M}, \quad (2)$$

где M – площадь, занимаемая магнетитом, в % от общей площади очага коррозии.

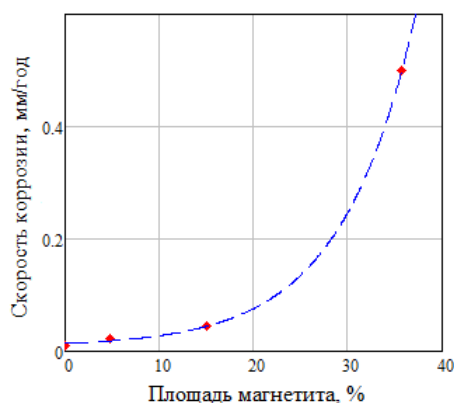


Рисунок 1 – Средняя скорость коррозии при содержании магнетита в слое ржавчины:

◆◆◆ – экспериментальные точки;
— — установленная зависимость
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Average corrosion rate with magnetite content in the rust layer:

◆◆◆ – experimental points;
— — established dependence
Source: compiled by the authors.

По мере эксплуатации объекта удельное количество магнетита во внешнем подслое ржавчины не остаётся постоянным. На основании результатов исследований [1, 3, 12, 20] были установлены характерные интервалы колебаний его доли, соответствующие тем или иным условиям окружающей среды. В частности, в условиях слабоагрессивной среды M обычно изменяется в пределах от 5 до 15%, тогда как в среднеагрессивной среде этот показатель варьируется в пределах от 15 до 35%.

Ещё одним параметром, поддающимся контролю при использовании оптического метода, является продолжительность воздействия среды τ . Как было показано ранее, по мере увеличения срока экспонирования происходит трансформация лепидокрокита в гетит, в результате чего изменяется соотношение площадей, занятых различными гидроокислами на поверхности зоны коррозионного поражения. В качестве информативного диагностического показателя целесообразно рассматривать площадь, занимаемую гетитом, поскольку лепидокрокит со временем полностью исчезает.

Проведенный на основе данных [1, 6, 7, 8] анализ позволил установить, что удельная доля гетита зависит от степени агрессивности окружающей среды. Дополнительно были выведены три аналитические функции, позволяющие количественно описать долю гетита в подслое ржавчины при различных вариантах аэрохимического воздействия среды (рисунки 2, 3, 4).

Для неагрессивной среды:

$$\tau = -0,0759 + 0,3570 \cdot e^{0,0487 \cdot \alpha}, \quad (3)$$

где α – площадь, занимаемая гетитом, в % от общей площади очага коррозии;

для слабоагрессивной среды:

$$\tau = 0,0933 + \frac{0,0277 \cdot (e^{0,0191 \cdot \alpha} - 1)}{0,0191} \quad (4)$$

и для среднеагрессивной среды:

$$\tau = -0,1465 + 0,0045\alpha + 0,0011\alpha^2. \quad (5)$$

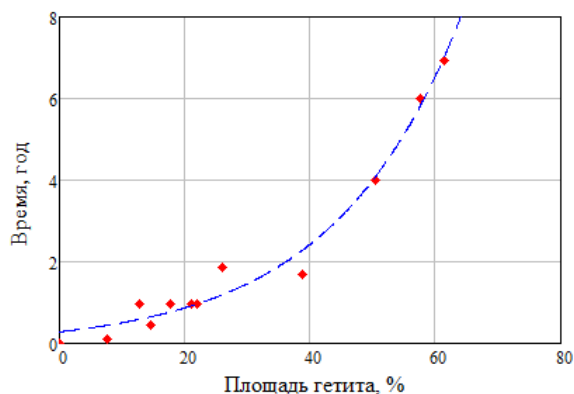


Рисунок 2 – Содержание гетита в наружном подслое ржавчины (неагрессивная среда):
 ♦♦♦ – экспериментальные точки; — — — установленная зависимость
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Content of goethite in the outer rust sublayer (non-aggressive environment):
 ♦♦♦ – experimental points; — — — established dependence
 Source: compiled by the authors.

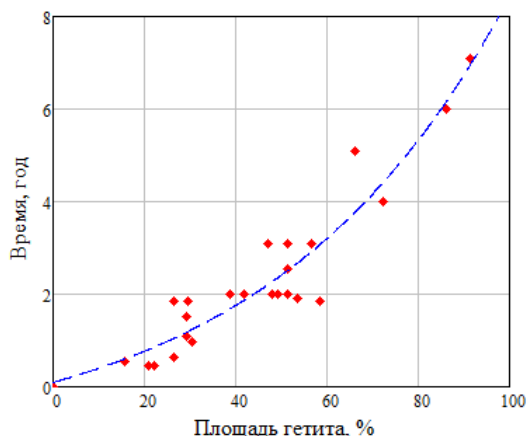


Рисунок 3 – Содержание гетита в наружном подслое ржавчины (слабоагрессивная среда):
 ♦♦♦ – экспериментальные точки; — — — установленная зависимость
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Content of goethite in the outer rust sublayer (weakly aggressive environment):
 ♦♦♦ – experimental points; — — — established dependence
 Source: compiled by the authors.

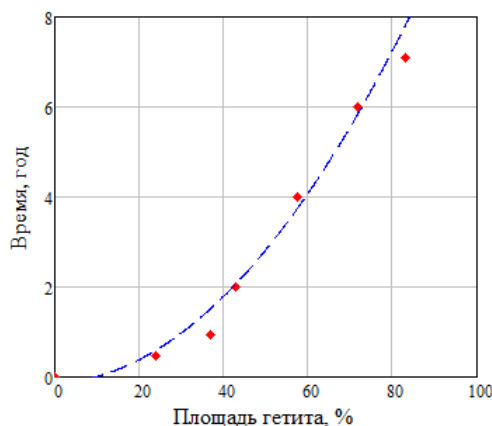


Рисунок 4 – Содержание гетита в наружном подслое ржавчины (среднеагрессивная среда):
 ♦♦♦ – экспериментальные точки; — — — установленная зависимость
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Content of goethite in the outer rust sublayer (medium-aggressive environment):
 ♦♦♦ – experimental points; — — — established dependence
 Source: compiled by the authors.

Определив значения параметров ν и τ , можно рассчитать величину глубины деградации, опираясь на соотношение (1) либо на расчетную модель, представленную в работе [3]. Тем самым обеспечивается возможность количественной оценки рассматриваемого диагностического показателя на базе визуально-оптического метода контроля.

Особого внимания требует вопрос количественной фиксации площади поврежденной коррозией зоны, на которой локализован конкретный вид продуктов ржавления.

Для её решения применимо измерение цветовых координат поврежденной зоны по шкале RGB, поскольку визуальные характеристики ржавчины зависят от состава и фазового состояния оксидов. Согласно источникам^{10, 11}, со временем цветовые параметры наружного слоя изменяются по последовательности: темно-зеленый, затем темно-коричневый, позже переходят в темно-красные тона и, наконец, в желто-бурый оттенок.

¹⁰ Сухотин А.М. Физическая химия пассивирующих пленок на железе. 320 с.

¹¹ Физико-химические свойства окислов: справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова [и др.]; под общ. ред. Г.В. Самсонова. 472 с.

Таблица 2

Колориметрические параметры продуктов ржавчины
Источник: составлено авторами.

Table 2

Colorimetric parameters of rust products
Source: compiled by the authors.

Продукт ржавчины	Цвет	Характеристика координат RGB
Лепидокрокит	В диапазоне оттенков от насыщенного тёмно-зеленого до глубокого тёмно-коричневого	Доминирование зелёной составляющей (координата G) при уровне красного канала (R) в пределах 80–120
Гётит	В диапазоне от насыщенного тёмно-красного до выраженного желтовато-бурого	Доминирование красного канала R , при этом его числовое значение лежит в диапазоне 120–160
Магнетит	Интенсивно чёрный, с железисто-чёрным оттенком	Практически равные значения всех цветовых каналов (R , G и B), формирующие тёмные серые тона при уровне каждой компоненты ниже 110

Для оценки цветовых параметров слоя ржавчины использовался графический редактор Paint, с помощью которого фиксировались цифровые значения цветовых координат анализируемого слоя.

В ходе исследования было выявлено, что поверхность элемента конструкции, не подвергшаяся влиянию коррозионных процессов, демонстрирует серую цветовую тональность, для которой характерно приблизительное совпадение компонент R , G и B в интервале значений от 130 до 180. Обобщённые экспериментальные данные по цветовым координатам представлены в таблице 2.

Таким образом, доминирующий цветовой компонент может быть использован для определения величин ν и τ на рассматриваемом участке.

ОБСУЖДЕНИЕ

Функциональный принцип предлагаемого визуально-оптического метода диагностики заключается в интеграции его в систему мониторинга коррозии, предназначенную для постоянного наблюдения за техническим состоянием несущих металлоконструкций эскалаторов, а также для прогноза возникновения потенциальных отказов вследствие коррозионных процессов. Такая методика позволяет не только своевременно выявлять появление дефектов, но и способствует оценке остаточ-

ного ресурса данных сооружений с учетом фактической деградации их элементов.

Основной целью данного подхода становится повышение точности в определении степени повреждения, при этом расширяется возможность фиксировать начальные этапы коррозионного разрушения. Для реализации этого принципа на определённом участке конструкции, где предположительно развивается коррозия, осуществляется установка бесконтактного датчика, который регистрирует динамику коррозионных изменений посредством анализа оптических характеристик зоны поражения. Мониторинг изменений этих свойств позволяет оценить время развития очага, а также степень агрессивности окружающей среды, способствующей протеканию коррозионных реакций.

Продолжительность развития коррозионного очага устанавливается посредством количественного анализа сдвигов цветовых координат главенствующего типа окислов железа (гетита, лепидокрокита или магнетита) с использованием RGB -шкалы (рисунок 5). Зафиксировав площадь поверхности, обладающей определёнными цветовыми параметрами, характерными для каждого из указанных окислов, становится возможным установить время формирования и развития очага, а также оценить характер окружающей среды с точки зрения коррозионной активности.

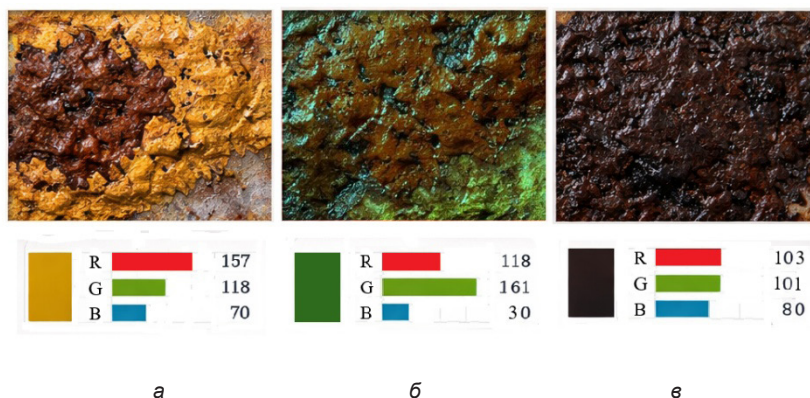


Рисунок 5 – Примеры цветowych координат (RGB-шкала) для преобладающих типов окислов железа: а – гетита, б – лепидокрокита, в – магнетита. Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Examples of color coordinates (RGB scale) for the predominant types of iron oxides: а – goethite, б – lepidocrocite, в – magnetite. Source: compiled by the authors.

Детализация методики измерения глубины деградации посредством визуально-оптического метода осуществляется следующим образом. Прежде всего, исследуемая зона фотографируется с помощью цифрового фотоаппарата, после чего полученные изображения подвергаются компьютерной обработке.

На этапе обработки фотоизображений первоначально оценивается площадь коррозионного очага S_K , а затем вычисляется параметр M :

$$M = \frac{S_M}{S_K} \cdot 100\% , \quad (6)$$

где S_M – площадь очага коррозии, занятая магнетитом.

После определения величины M , используя выражение (2), вычисляется значение v и при соотношении полученного результата с данными таблицы 3 [3] устанавливается степень агрессивности окружающей среды.

После этого определяем величину α :

$$\alpha = \frac{S_\alpha}{S_K} \cdot 100\% , \quad (7)$$

где S_α – площадь очага коррозии, занятая гетитом.

На основании предварительно установленной степени агрессивности среды производится расчёт параметра τ с применением формул (3)–(5), после чего становится возможным вычисление глубины деградации δ .

Показатель δ рассматривается как информативный параметр, характеризующий степень разрушения вследствие коррозии. Величина v позволяет определять степень агрессивности среды, а следовательно, и адсорбционное понижение прочности материала и концентрацию агрессивных компонентов в окружающей атмосфере.

Таблица 3
Классификация агрессивности сред
Источник: составлено авторами.

Table 3
Classification of media aggressiveness
Source: compiled by the authors.

Агрессивность среды	Скорость коррозии низкоуглеродистой стали, мм/год	Снижение прочности, %
Неагрессивная	До 0,01	0
Слабоагрессивная	0,01–0,05	до 5
Среднеагрессивная	0,05–0,5	до 10
Сильноагрессивная	Более 0,5	15

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования привели к совершенствованию технологии визуально-оптического диагностирования несущих металлоконструкций эскалаторов посредством достижения более точного количественного определения параметров, характеризующих коррозионное разрушение по глубинному, очаговому и механическому критериям. Кроме того, данный подход позволяет учитывать концентрацию агрессивных примесей, воздействующих на материал. От всех иных методов отличается комплексной количественной оценкой сразу трех показателей коррозии: глубинного, очагового и механического. Такое расширение набора регистрируемых характеристик – по сравнению с традиционными технологиями, включающими визуальную оценку и ультразвуковое измерение толщины – увеличивает информативность анализа минимум на треть, что обеспечивает полуторакратное повышение корректности оценки остаточного ресурса металлоконструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дятлов В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 1 (68). С. 29–35.
2. Селиверстов Г.В., Данилов А.С. Исследование коррозионной усталости металлоконструкций грузоподъемных машин // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. № 2-1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. С. 248–253.
3. Дятлов В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 3 (70). С. 46–50.
4. Дятлов В.Н., Орлов С.В., Попов В.А. Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 4 (107). С. 21–28. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-3
5. Ватулин Я.С., Попов В.А., Дятлов В.Н. Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3. С. 241–250. DOI: 10.17816/2074-0530-106323
6. Тулин Д.Е., Соколов С.А., Грачев А.А. Влияние остаточных сварочных напряжений на сопротивление конструкций хрупкому разрушению // Вестник машиностроения. 2022. № 3. С. 24–30. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-3-24-30
7. Попов В.А., Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности и безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Управление рисками // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3 (49). С. 10–22. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22
8. Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности и безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Алгоритм прогнозирования технического состояния // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 2. С. 32–41.
9. Ермилова А.В., Будрина Е.В. Инновационный вектор развития эффективной стратегии эксплуатации тоннельных эскалаторов // Экономика. Право. Инновации. 2020. № 1. С. 57–64.
10. Casals M., Gangolells M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. Applied energy, vol. 166, pp. 150-164. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029
11. Харлов М.В., Попов В.А. Методика оценки технического состояния эскалатора // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т.9, № 4. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
12. Kazarinov N., Smirnov A., Petrov Y., Gruzdkov A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system (2020) E3S Web of Conferences, 157, статья № 01020, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111141&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015701020&partnerID=40&md5=ff349ae2159696f6435772713fca13e8> (дата обращения: 25.01.2026). DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020
13. Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures (2020) E3S Web of Conferences, 157, статья № 06021, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111517&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706021&partnerID=40&md5=2c52657ac32615f175abb033915b52dc> (дата обращения: 25.01.2026). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021
14. Тимофеева Г.Ю., Мазлумян Г.С., Бустонов Д.А. Коррозия деталей технических систем, эксплуатирующихся в Арктике // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2025. № 10. С. 28–40. DOI: 10.31044/1684-2561-2025-0-10-28-40
15. Вагапов Р.К. Исследование особенностей формирования и состава продуктов углекислотной коррозии в водно-спиртовых средах // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». 2025. № 17. С. 1–11. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-17-1-11
16. Мензилова М.Г., Лебедев О.Ю. Исследование прочности лакокрасочных покрытий на отрыв // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2024. № 2. С. 21–24.
17. Байдюшев И.Г. Важность прогнозирования и моделирования процессов коррозии // Новая наука: от идеи к результату. 2024. № 5. С. 255–260.
18. Гладких Т.Д., Маркин А.Н. Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления // Практика противокоррозионной защиты. 2024. Т. 29, № 1. С. 20–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2

19. Маркин А.Н. Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления (часть 2) // Практика противокоррозионной защиты. 2024. Т. 29, № 2. С. 21–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2

20. Елшина Л.И. Влияние марки и технологии производства арматурной стали на фазовый состав ее продуктов коррозии // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». 2023. № 14. С. 1–11. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-14-1-11

REFERENCES

1. Dyatlov V.N. Modeling of the corrosion process of bearing metal structures of the subway escalator. *Vestnik MADI*. 2022; no. 1(68), pp. 29-35. (In Russ.)

2. Seliverstov G.V., Danilov A.S. Research of Corrosion Fatigue of Metal Structures of Lifting Machines. *Izvestiya TulGU. Series Technical Sciences*. 2009; no. 2 -1, pp. 248-253. (In Russ.)

3. Dyatlov V.N. Clarification of the model of development of corrosion defects of bearing metal structures of metro escalators. *Vestnik MADI*. 2022; 3(70), pp.46-50. (In Russ.)

4. Dyatlov V.N., Orlov S.V., Popov V.A. Combined Influence of Cyclic Loads and Corrosion on the Technical Condition of Metal Structures of Metro Escalators. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 4 (107), pp. 167–174. (In Russ.) DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-3

5. Vatulin Y.S., Popov V.A., Dyatlov V.N. Technical diagnostics of embedded elements of crane tracks of lifting equipment in the machine rooms of tunnel escalators. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2022; no. 16 (3), pp. 241–250. (In Russ.) DOI: 10.17816/2074-0530-106323

6. Tulin D.E., Sokolov S.A., Grachev A.A. Influence of residual welding stresses on the resistance of structures to brittle failure. *Vestnik mashinostroeniya*. 2022; no. 3. pp. 24-30. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-3-24-30

7. Popov V.A., Yelantsev V.V. Increasing the efficiency and safety of operation of underground tunnel escalators. Management of risks. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021; no. 3 (49), pp. 10-22 (in Russ.) DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22

8. Yelantsev V.V. On the issue of improving the efficiency and safety of operation of subway tunnel escalators. The algorithm for predicting the technical condition. *International journal of applied and fundamental research*. 2021; no. 2, pp. 32-41 (in Russ.)

9. Yermilova A.V., Boudrina E.V. Innovative vector of development of effective strategy for tunnel escalator operating. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2020; no. 1, pp. 57–64 (In Russ.)

10. Casals M., Gangoells M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. *Applied energy*, vol. 166, pp. 150-164. (in Eng.). DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029

11. Kharlov M.V., Popov V.A. *Internet-zhurnal Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 4, available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (25.07.2024). (In Russ.)

12. Kazarinov, N., Smirnov, A., Petrov, Y., Gruzdkov, A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system (2020) *E3S Web of Conferences*, 157, 01020, (in Eng.) DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020

13. Uzdin A., Prokopovich, S. Some principles of generating seismic input for calculating structures (2020) *E3S Web of Conferences*, 157, article № 06021, (in Eng.). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021

14. Timofeeva G.Yu., Mazlumyan G.S., Bustonov D.A. Corrosion of Technical System Parts Used in the Arctic. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*. 2025; no. 10, pp. 28–40. (In Russ.) DOI: 10.31044/1684-2561-2025-0-10-28-40

15. Vagapov R.K. Research on the Formation and Composition of Carbon Dioxide Corrosion Products in Water-Alcohol Media. *Corrosiya: Zashchita, Materiali. Supplement to the Journal «Metal Technology»*. 2025; no. 17, pp. 1–11. (In Russ.) DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-17-1-11

16. Menzilova M.G., Lebedev O.Yu. Research of the Tear Resistance of Paint and Varnish Coatings. *Nauchniye problemi transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2024; no. 2, pp. 21–24. (In Russ.)

17. Baidushev I.G. The Importance of Forecasting and Modeling Corrosion Processes. *Novaya nauka: ot idei k Resultatu*. 2024; no. 5, pp. 255–260. (In Russ.)

18. Gladkikh T.D., Markin A.N. Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance Sensors. *Practica protivokorroziionnoi zashchiti*. 2024; vol. 29; no. 1, pp. 20–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2

19. Markin A.N. Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance Sensors (Part 2). *Practica protivokorroziionnoi zashchiti*. 2024; vol. 29; no. 2, pp. 21–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2

20. Yelshina L.I. Influence of the grade and production technology of reinforcing steel on the phase composition of its corrosion products. *Corrosiya: Zashchita, Materiali. Supplement to the Journal «Metal Technology»*. 2023; no. 14, pp. 1–11. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-14-1-11

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Дятлов В.Н. Определение цели научного исследования, выделение исходных данных при анализе результатов комплексного обследования металлоконструкций эскалаторов и построение математической модели, подготовка публикации.

Попов В.А. Координация выполнения исследовательской работы, постановка её целей и задач. Формирование и обоснование научной концепции исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dyatlov V.N. Determining the research goal, selecting initial data for the analysis of comprehensive survey results on escalator metal structures, building a mathematical model, writing the manuscript.

Popov V.A. Coordination of research, setting research goals and objectives, research concept design.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дятлов Вячеслав Николаевич – канд. техн. наук, учитель Инженерно-экономического лицея имени Академика И.М. Виноградова (182100, г. Великие Луки, ул. Заслонова, д. 70).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>,

SPIN-код: 2978-6706,

e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Попов Валерий Анатольевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, д. 9).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2635-5427>,

SPIN-код: 2418-7152,

e-mail: vpopov_58@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dyatlov Vyacheslav N. – Cand. of Sci. (Engineering), Teacher at the Engineering and Economics Lyceum named after Academician I.M. Vinogradov (70, Zaslouova Street, Velikiye Luki, Pskov Region, 182100).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>,

SPIN-code: 2978-6706,

e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Popov Valery A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of Land Transport and Technological Complexes of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(9, Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 190031).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2635-5427>,

SPIN-code: 2418-7152,

e-mail: vpopov_58@mail.ru

Научная статья
УДК 621.879.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-184-195>
EDN: DYUEMR



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

А.П. Миллер^{1,2} ✉, К.Г. Пугин^{1,2}, Р.Ф. Шаихов¹

¹Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, г. Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

✉ ответственный автор
aleksandrmillera@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Продолжительность эксплуатации гидропривода рабочих органов наземных машин зависит от своевременной их диагностики. Выход из строя гидравлической системы во время работы в сложных условиях может привести к значительным экономическим затратам для восстановления её работоспособности. Для предотвращения внезапных отказов гидроцилиндров следует проводить диагностику с учётом показателей по результатам, по которым можно сделать вывод о техническом состоянии.

Материалы и методы. Исследование базируется на использовании переходного процесса (гидроподпора) и перетока жидкости между полостями гидроцилиндра с фиксацией утечек в сопряжении «поршень-гильза» и получения характеристики отклика на эти факторы. В качестве параметра отклика предложено использовать скорость нарастания давления (угол повышения давления). В данной статье приведён теоретический анализ. Установлено, что в качестве диагностирующего параметра можно использовать скорость нарастания давления в сливной магистрали, которая учитывает давление и утечки в гидроцилиндре.

Результаты. В результате исследования было установлено влияние утечки между полостями гидроцилиндра на угол повышения давления, также проведены эксперименты, насколько влияет тип трубопровода на скорость нарастания давления ввиду влияния коэффициента объёмной жёсткости.

Обсуждение и заключение. Исследование подтвердило влияние объёмной жёсткости трубопроводов на угол повышения давления. Угол повышения давления для рукавов высокого давления составил от 43,1 до 40,7 градусов (разница 17,5%) включительно, а для стального трубопровода от 45,7 до 44,5 (разница 20,3%) соответственно, что говорит о влиянии жёсткости трубопровода гидропривода на угол повышения давления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроцилиндр, угол повышения давления, рабочая жидкость, диагностирование, утечка

Статья поступила в редакцию 17.01.2026; одобрена после рецензирования 16.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Миллер А.П., Пугин К.Г., Шаихов Р.Ф. Дополнительные параметры в технической диагностике гидроцилиндров // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 184-195. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-184-195>

© Миллер А.П., Пугин К.Г., Шаихов Р.Ф., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-184-195>
EDN: DYUEMR

ADDITIONAL PARAMETERS IN THE TECHNICAL DIAGNOSTICS OF HYDRAULIC CYLINDERS

Alexandr P. Miller^{1,2} ✉, Konstantin G. Pugin^{1,2}, Rinat F. Shaikhov¹

¹Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

✉ corresponding author
aleksandrmllera@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The service life of the hydraulic drive for ground vehicle working parts depends on their timely diagnostics. Failure of the hydraulic system during operation in difficult conditions can lead to significant financial wastes to restore its operability. To prevent sudden failures of hydraulic cylinders, diagnostics should be carried out taking into account the indicators based on the results, which can be applied to define the technical condition.

Materials and methods. The study is based on the use of a transient process (hydraulic support) and fluid flow between the cavities of a hydraulic cylinder with a leakage detection in the piston-sleeve interface and obtaining response characteristics to these factors. It is proposed to use the pressure rise rate (pressure rise angle) as a response parameter. This article provides a theoretical analysis. It has been established that the rate of pressure rise in the drain line can be used as a diagnostic parameter, which takes into account pressure and leaks in the hydraulic cylinder.

Results. As a result of the study, the effect of leakage between the cavities of the hydraulic cylinder on the angle of pressure increase has been established, experiments have also been conducted to determine the effect of pipeline type on the rate of pressure rise due to the influence of the volumetric stiffness coefficient.

Discussion and conclusion. The study has confirmed the influence of the volumetric stiffness of the pipelines on the pressure rise angle. The pressure rise angle for the high-pressure hoses ranged from 43.1 to 40.7 degrees (a difference of 17.5%), inclusive, and for the steel pipeline from 45.7 to 44.5 (a difference of 20.3%), respectively, which indicates the influence of the rigidity of the hydraulic drive pipeline on the pressure rise angle.

KEYWORDS: hydraulic cylinder, pressure rise angle, working fluid, diagnosis, leakage

The article was submitted: January 17, 2026; approved after reviewing: February 16, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Miller A.P., Pugin K.G., Shaikhov R.F. Additional parameters in the technical diagnostics of hydraulic cylinders. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 184-195. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-184-195>

© Miller Alexandr P., Pugin Konstantin G., Shaikhov Rinat F., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Долговечность гидрофицированных машин в значительной мере определяется своевременностью диагностики их гидросистем [1, 2, 3]. Оценка состояния гидравлических систем может проводиться с использованием различных диагностических параметров, таких как давление, расход и температура рабочей жидкости [4, 5, 6].

Современные гидросистемы, применяемые в машиностроении, строительных и дорожных машинах, характеризуются высокой энергонасыщенностью и сложной структурой, включающей насосы, распределительную аппаратуру, исполнительные механизмы, трубопроводы и вспомогательные элементы [3]. Надёжность таких систем в значительной степени определяется их техническим состоянием, которое изменяется в процессе эксплуатации под воздействием износа, старения рабочей жидкости, появления утечек и газовых включений [2, 4].

Традиционные методы контроля технического состояния гидросистем, основанные на анализе установившихся параметров (давление, расход, температура), обладают ограниченной чувствительностью к начальным стадиям деградации элементов. В связи с этим актуальной является разработка и обоснование диагностических методов, использующих динамические параметры, отражающие переходные процессы в гидросистеме [3, 4].

Одним из таких параметров является скорость нарастания давления, регистрируемая в неустановившихся режимах работы. Данный параметр интегрально отражает совокупность физических процессов, протекающих в гидросистеме, и потому представляет значительный интерес с точки зрения диагностики [5].

Современные подходы к диагностике гидросистем уделяют значительное внимание динамическим характеристикам давления как информативному признаку неисправностей [5, 6]. Одной из актуальных тем являются методы анализа переходных состояний и сигналов давления для обнаружения дефектов [7, 8]. Так, в ряде работ анализируются высокочастотные составляющие сигналов давления и их спектральные признаки для диагностики физических состояний насосов и гидросистем в переходных режимах, включая применение методов обработки сигналов для выявления аномалий в динамике давления и расхода рабочей жидкости [9, 10, 11].

В статье [12] изложены результаты экспериментальных исследований, касающихся влия-

ния давления рабочей жидкости, температуры и её вязкости на характеристики гидросистем. В исследованиях [11, 13, 14] авторов из Белорусско-Российского университета и Тюменского индустриального университета показаны примеры влияния некоторых факторов на работоспособность отдельных элементов гидросистемы. В предыдущих исследованиях было продемонстрировано, что эксплуатационные условия гидросистем существенно влияют на их эффективность и функционирование отдельных компонентов. При достижении определённых значений диагностических параметров общая работоспособность гидравлических систем может оказаться неудовлетворительной.

Диагностические данные, включая изменения температуры, давления рабочей жидкости и наличие твердых частиц в ней, предоставляют возможность оценить контролируемый параметр двумя дискретными значениями [15]. Это позволяет определить текущий характер изменения технического состояния гидросистемы [9, 10]. Однако использование таких диагностических данных, как правило, не позволяет сделать прогнозы о будущем состоянии системы, в том числе с использованием искусственного интеллекта [14, 15, 16].

В статьях китайских авторов [17, 18, 19] из университета г. Цинань и г. Шанхай приведена диагностика гидравлической системы экскаватора с использованием дерева отказов и нейронных сетей, что требует внедрения большого количества датчиков и большого времени на обучение, но позволяет оперативно реагировать на изменения измеряемых показателей, таких как вибрация гидронасоса и температура утечки рабочей жидкости.

В статье [20] польского автора из Гданьского морского университета предложено использовать оптимальный момент запуска гидравлической системы для минимизации рисков теплового удара с учётом зазоров в ней, что подчёркивает важность температуры рабочей жидкости.

После анализа приведённых выше исследований и основываясь на своём опыте, предлагаем дополнительно учитывать теорию объёмной жесткости, что позволит получить более точные экспериментальные данные и в дальнейшем разработать метод диагностики гидроцилиндров отличных от других.

Как было отмечено в исследовании [1], в гидравлических приводах носителем энергии является рабочая жидкость, которая под вы-

соким давлением транспортируется по магистралям гидравлической системы. При этом в связи с сжатием жидкости и деформации трубопроводов, на неустановившихся режимах работы системы, нарушается действие уравнения неразрывности потока. Это осложняет моделирование работы таких систем на неустановившихся режимах.

Классическим подходом к моделированию работы гидравлического привода на не установившихся режимах является введение некоторого фиктивного расхода рабочей жидкости, который компенсирует нарушение действия уравнения неразрывности. Однако более перспективным методом расчёта силового гидравлического привода является применение теории объёмной жёсткости [8]. В этом случае в математической модели взамен приведенного модуля упругости системы используют приведенный коэффициент объёмной жёсткости, определённый для большинства гидроаппаратов, в том числе и гидравлических линий.

Изменение давления в замкнутом объёме гидросистемы при перекрытии потока определяется балансом между подачей насоса и расходами, не участвующими в сжатии рабочей среды. Реальная гидросистема обладает конечной сжимаемостью, обусловленной как свойствами рабочей жидкости, так и упругостью элементов конструкции [9].

Для учёта совокупного влияния этих факторов вводится понятие эффективной объёмной жёсткости гидросистемы. Процесс нарастания давления в напорной магистрали можно представить выражением

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K_{эф}}{V_{эф}} (Q_n - Q_{ут}(p)), \quad (1)$$

где $K_{эф}$ – эффективная объёмная жёсткость гидравлической системы;

$V_{эф}$ – приведённый объём жидкости в гидросистеме;

Q_n – подача насоса;

$Q_{ут}$ – расход утечек.

При линейной зависимости утечек от давления (p) решение уравнения имеет экспоненциальный характер.

Внутренние утечки приводят к уменьшению скорости нарастания давления и увеличению кривизны зависимости $p(t)$. Газонасыщенность рабочей жидкости вызывает резкое снижение эффективной объёмной жёсткости, что проявляется в пологом начальном участке кривой давления. Износ насоса сопровождается снижением установившегося давления при сохранении формы зависимости.

Эффективную объёмную жёсткость гидравлической системы можно представить как совокупность отдельных элементов, имеющих свои жёсткости (рисунок 1).

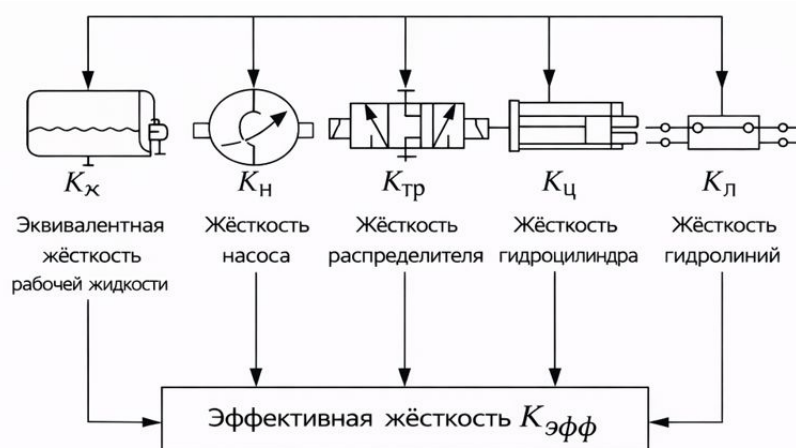


Рисунок 1 – Упрощённая схема приведённых жёсткостей гидросистемы
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Simplified diagram of the hydraulic system stiffnesses under consideration
Source: compiled by the authors.

Эффективная жёсткость системы определяется как совокупность жёсткостей отдельных элементов, соединённых последовательно по принципу суммирования обратных величин:

$$\frac{1}{K_{\text{эф}}} = \frac{1}{K_{\text{ж}}} + \frac{1}{K_{\text{н}}} + \frac{1}{K_{\text{р}}} + \frac{1}{K_{\text{ц}}} + \frac{1}{K_{\text{л}}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{ж}}$, $K_{\text{н}}$, $K_{\text{р}}$, $K_{\text{ц}}$, $K_{\text{л}}$ – жёсткости рабочей жидкости, насоса, распределителя, гидроцилиндра и гидролиний соответственно [9].

Определение коэффициентов приведённой объёмной жёсткости трубопроводов гидравлической системы, и особенно рукавов высокого давления, позволяет значительно повысить качество теоретических исследований гидравлических приводов машин и механизмов.

Анализируя взаимное влияние на общую жёсткость всей гидросистемы, можно предположить, что при $t \rightarrow 0$ и малых значениях давления, величина утечек стремится к нулю, вследствие чего выражение для диагностического критерия по скорости нарастания давления принимает вид

$$K_d = \frac{K_{\text{эф}}}{V_{\text{эф}}} Q_{\text{н}}. \quad (3)$$

Таким образом, диагностический критерий K_d определяется исключительно эффективной объёмной жёсткостью гидросистемы и действительной подачей насоса q и может быть рассчитан в дальнейших исследованиях по данной тематике.

Физический смысл критерия K_d заключается в оценке способности гидросистемы накапливать энергию давления за счёт сжатия рабочей жидкости и упругой деформации элементов конструкции. Снижение K_d свидетельствует о наличии газа в рабочей жидкости; увеличении податливости элементов системы; снижении действительной подачи насоса.

Номинальное значение K_d соответствует исправному состоянию гидросистемы при заданных условиях испытаний. Таким образом, критерий K_d может быть использован в качестве интегрального показателя объёмной жёсткости и герметичности гидросистемы и, как следствие, может быть использован в качестве диагностического показателя технического состояния гидравлической системы. В отличие от установившегося давления, критерий K_d не зависит от установившегося баланса расходов и позволяет выявлять дефекты на ранней стадии их развития. Наибольшая диагностическая чувствительность критерия

наблюдается при анализе начального участка переходного процесса (нарастания давления), где влияние утечек минимально, а влияние сжимаемости максимально.

В исследовании [2] показано, что анализ изменения скорости во времени указывает на существенное отличие характера перемещения поршней гидроцилиндров при учёте и без учёта приведённых объёмных жёсткостей гидроцилиндров. Главным отличием является то, что при учёте приведённой объёмной жёсткости гидроцилиндров по мере выдвижения поршней амплитуда колебания их скорости увеличивается: это объясняется уменьшением приведённой объёмной жёсткости гидроцилиндров. В то же время при бесконечной объёмной жёсткости гидроцилиндров амплитуда колебания скорости поршней остаётся неизменной.

В работе [1] было установлено, что при экспериментальном исследовании зависимостей приведённого коэффициента объёмной жёсткости рукавов высокого давления (РВД) от давления было также замечено, что жёсткостные свойства РВД обратно пропорциональны их длине. Таким образом, нет необходимости экспериментально определять коэффициенты приведённой объёмной жёсткости каждого из них, достаточно лишь знать коэффициент приведённой объёмной жёсткости единицы длины каждого типа оболочки [9,10].

Анализ исследований [1, 2] показал, что основная разница в жёсткости РВД и металлических труб заключается в показателе «Податливость стенок трубы». У труб он гораздо больше, чем у РВД, что положительно влияет на жёсткость всей системы.

Для оценки степени износа уплотнительных элементов поршня гидроцилиндра во время производственной эксплуатации гидросистемы возможно использовать изменение скорости нарастания давления в полости гидроцилиндра при переходе из движения поршня без внешней нагрузки к остановке при резкой блокировке сливной магистрали. Блокировка сливной магистрали непосредственно у гидроцилиндра будет имитировать непреодолимую нагрузку для гидроцилиндра. Рассматривая гидроцилиндр как тело, имеющее определённую жёсткость своих элементов, скорость нарастания давления в гидроцилиндре будет пропорциональна этой жёсткости. При изменении уплотнительных свойств гидроцилиндра, вследствие перетечки части жидкости, жёсткость гидроцилиндра как тела будет меньшей и меньшей будет скорость на-

растания давления в полости гидроцилиндра. В этой связи мы рекомендуем использовать в качестве диагностических параметров угол повышения давления, что характеризует скорость нарастания давления [5] в напорном трубопроводе, и величину утечек в сливной магистрали, которые позволяют определить техническое состояние гидроцилиндра, а также дать прогноз допустимого времени эксплуатации. Для повышения эффективности предлагаемого диагностического показателя необходимо учитывать объемную жесткость гидромагистралей, которая может внести значительные коррективы в точность оценки технического состояния гидроцилиндров.

Для подтверждения выдвинутой теории необходимо установить влияние жесткости трубопроводов на значение предлагаемого диа-

гностического показателя – угла повышения давления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для подтверждения влияния теории объёмной жёсткости на угол повышения давления были проведены эксперименты, где использован гидроцилиндр с уплотнениями поршня, уже имеющими наработку и требующие замены. Степень износа была оценена с помощью определения утечки жидкости через данное уплотнение при его установке на поршень. Опыты проведены на гидравлическом стенде с возможностью регулировки давления в напорной магистрали с помощью дросселя [5]. Гидравлическая схема стенда представлена на рисунке 2.

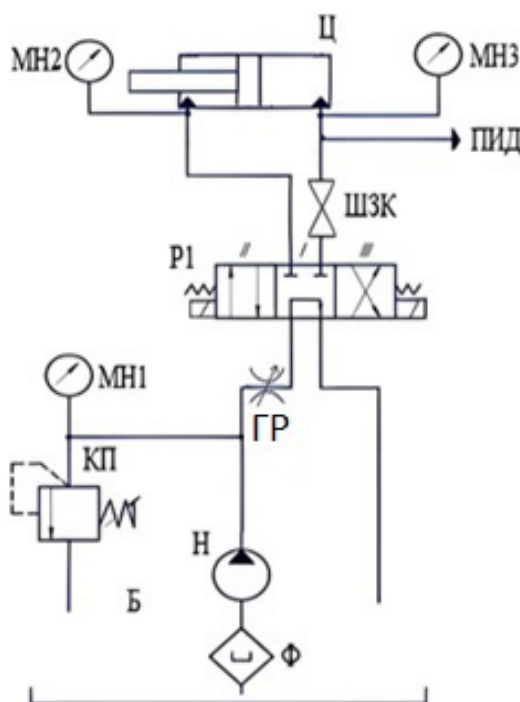


Рисунок 2 – Принципиальная гидравлическая схема стенда:
 Б – бак, Ф – фильтр, Н – насос, КП – клапан предохранительный, ШЗК – шаровой запорный клапан,
 МН1 – манометр, ГР – гидроклапан редуциционный, Р1 – гидрораспределитель,
 МН2 и МН3 – дублирующие манометры избыточного давления по магистралям,
 ПВД – преобразователь избыточного давления, Ц – исследуемый гидроцилиндр
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Schematic hydraulic diagram of the stand.
 B – tank, F – filter, H – pump, KP – safety valve, SHZK – ball shut-off valve, MN1 – pressure gauge,
 GR – pressure reducing hydraulic valve, R1 – hydraulic distributor,
 MN2 and MN3 – backup pressure gauges for the excess pressure in the lines,
 PID – overpressure converter, TC - hydraulic cylinder under test
 Source: compiled by the authors.

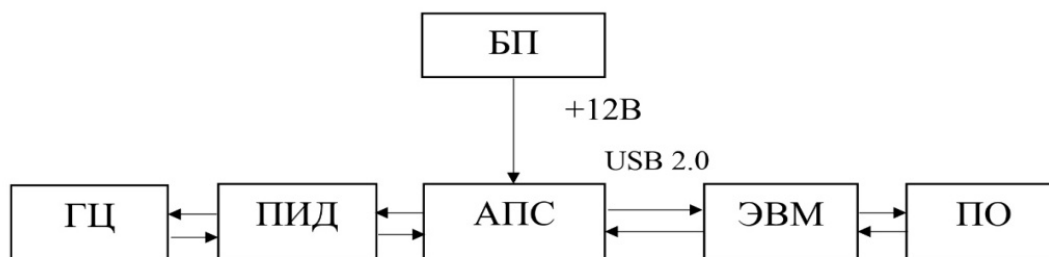


Рисунок 3 – Принципиальная схема аппаратно-программного комплекса
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Schematic diagram of the hardware and software complex
Source: compiled by the authors.

В качестве рабочей жидкости (РЖ) использовано гидравлическое масло с товарной маркой ВМГЗ со следующими характеристиками: кинематическая вязкость при $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $16\text{ мм}^2/\text{с}$, вязкость динамическая $967\text{ мПа}\cdot\text{с}$, плотность при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 852 кг/м^3 .

В гидросистеме установлены: насос НШ-10, гидроспределитель Р1 с двумя электромагнитными клапанами, шаровой запорный клапан (ШЗК) модели V2RH с рабочим давлением 35 МПа и максимальным расходом РЖ 180 л/мин , преобразователь избыточного давления (ПИД) ПД 100 – ДИ измеряет давление РЖ в диапазоне измерений: от $0,06$ до 10 МПа , манометры избыточного давления (МН2, МН3) модели ТМ-610Р.00 служат для дублирования показаний при проведении испытаний как в поршневой, так и при необходимости в штоковой полости гидроцилиндра, предохранительный клапан КП модели VMP L не допускает повышения давления в гидросистеме сверх его регулировки (от 1 до 18 МПа) [5, 6].

ШЗК используется только при измерении угла повышения давления. Для измерения утечек из гидроцилиндра он открыт и не участвует в экспериментах по их определению.

Для регистрации показаний давления в гидроцилиндре и вывода их на мониторе компьютера (ЭВМ) с помощью разработанного программного обеспечения (ПО) был использован аппаратно-программный комплекс (АПК) [5]. Его принципиальная схема представлена на рисунке 3.

Диагностический комплекс состоит из аппаратно-программного средства (АПС), ЭВМ (но-

утбук), ПО (разработанная компьютерная программа для отображения графика повышения давления), преобразователя избыточного давления (ПИД) и блока питания с напряжением питания 12 В (БП). В качестве АПС выступает Arduino Uno. Arduino – это открытая платформа, которая позволяет создавать различные устройства для измерения, преобразования и управления аналоговыми и цифровыми сигналами.

На экране ЭВМ при проведении испытания в ПО автоматически строится график повышения давления. На графиках по оси X отложено время в миллисекундах, а по оси Y давление МПа. Интервалы между вертикальными осями на графике равны 10 миллисекундам. По характеру повышения давления судят о техническом состоянии испытуемого гидроцилиндра [5].

Пример построенного графика показан на рисунке 4.

Для установления влияния жесткости трубопроводов на значения показателя угла повышения давления были проведены эксперименты с гибким (РВД) и жестким трубопроводом (стальная оцинкованная труба).

Рукава высокого давления (РВД), соответствующие стандарту EN 853 2SN. Длина РВД составляет $1,2\text{ м}$. Внутренний рукав шланга состоит из синтетической маслоупорной резины, далее идет высокопрочная стальная оплетка и наружный слой из синтетической прочной резины. Диаметр внутренний и внешний 20 и $29,3$ соответственно. Номинальное давление составляет 25 МПа [5].

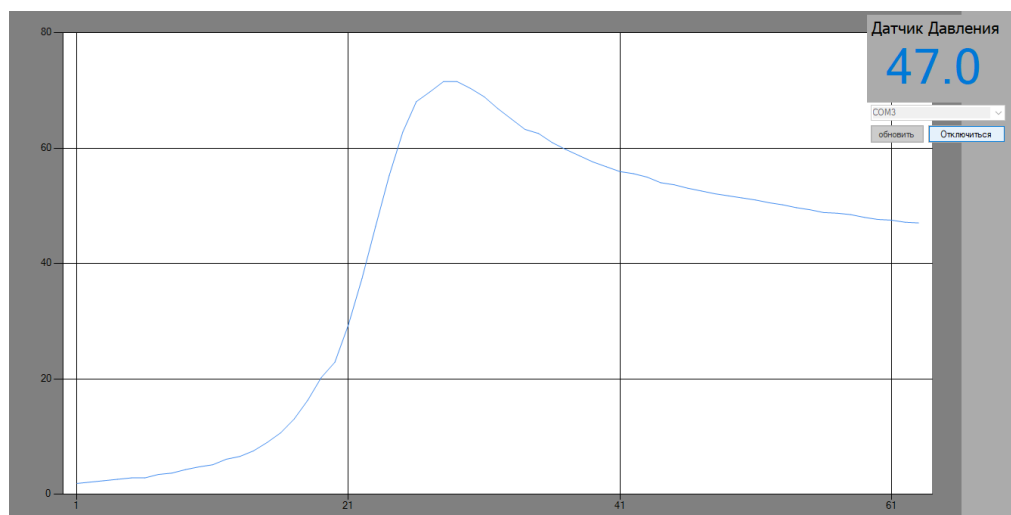


Рисунок 4 – График повышения давления
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Pressure rise graph
Source: compiled by the authors.

В качестве жёсткого трубопровода была использована стальная оцинкованная труба длиной 1,2 м, изготовленная в соответствии DIN 2391 C, EN 10305–4 и ГОСТ 8734 75 с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 2 мм. Стальная труба была установлена вместо РВД на участке напорной гидролинии от гидрораспределителя до входа в штоковую полость гидроцилиндра.

Для определения угла повышения давления на стенде следует предварительно закрыть кран ШЗК, далее с помощью электромагнитного клапана гидрораспределителя Р1 по напорной магистрали в штоковую полость гидроцилиндра происходит подача рабочей жидкости. Регистрация характера повышения давления в поршневой полости производится преобразователем избыточного давления (ПИД) через ПО на ЭВМ [5]. При проведении эксперимента также происходит дополнительный контроль избыточного давления в поршневой полости с помощью манометра МНЗ.

Сам угол определяется с помощью виртуального транспорта путём наложения на него фото графика повышения давления.

С учётом исследования [5, 6] были проведены испытания с учётом утечек из поршне-

вой полости гидроцилиндра. Для этого требовалось снять шланг сливной магистрали с гидроцилиндра, потом подать РЖ в противоположную полость под давлением 8 МПа и зафиксировать утечки по прошествии 10 сек. Испытания проводились при температуре РЖ +40 °С для исключения влияния на эксперименты температурного расширения жидкости и материалов.

В экспериментах был использован гидроцилиндр двухстороннего действия с односторонним штоком ГЦ-100.50.400.700(690).40., который используется в механизме подъёма секции дисковых борон серии БДМ.

В экспериментах проведены замеры с комплектами уплотнений, имеющих наработку в сравнении с новыми.

Следует пояснить, что под комплектом уплотнений поршня понимается два фторопластовых направляющих (опорных) BUR08 и одно полиуретановое уплотнительное кольцо KPR в сопряжении поршень-гильза.

Срок работы комплектов уплотнений, использованных в экспериментах (за исключением нового комплекта), составил от 1000 до 4000 мото-часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследовании были использованы 6 комплектов уплотнений поршня гидроцилиндра. Экспериментально произведена оценка утечек через данные комплекты уплотнений на стенде. Полученные данные утечек представлены в таблице 1. В составе комплекта № 1 использованы новые поршневые уплотнения. В составе комплектов № 2-6 использованы уплотнения, имеющие наработку и визуальные дефекты.

Таблица 1
Экспериментальные данные по утечкам через уплотнения поршня
Источник: составлено авторами.

Table 1
Experimental data on leaks through the piston seals
Source: compiled by the authors.

№ комплекта	Величина утечки через уплотнения поршня, мл/мин
1	6,5
2	7,6
3	8,9
4	9,4
5	10,7
6	11,7

На основании ранее представленного алгоритма диагностирования гидроцилиндров были произведены замеры угла повышения давления с разными трубопроводами для подтверждения влияния жёсткости трубопровода

на его величину. Замеры проведены с новым комплектом уплотнений поршня для минимизации влияния утечек на угол повышения давления. Экспериментальные данные по замерам угла повышения давления с учётом трубопровода приведены в таблице 2.

Таблица 2
Экспериментальные данные по замерам угла повышения давления с учётом трубопровода
Источник: составлено авторами.

Table 2
Experimental data on pressure rise angle measurements, taking into account the pipeline
Source: compiled by the authors.

№ комплекта уплотнения	Угол повышения давления, град	
	Трубопровод гибкий (РВД)	Трубопровод жёсткий (стальной)
1	43,1	45,7
2	42,9	45,4
3	42,5	45
4	42,3	45
5	41,7	44,8
6	40,7	43,5

Проведённые эксперименты подтвердили, что на угол повышения давления оказывает влияние жёсткость трубопровода.

На основании таблицы 1 и 2 построен график зависимости угла повышения давления с учетом жесткости материала трубопровода (рисунок 5).

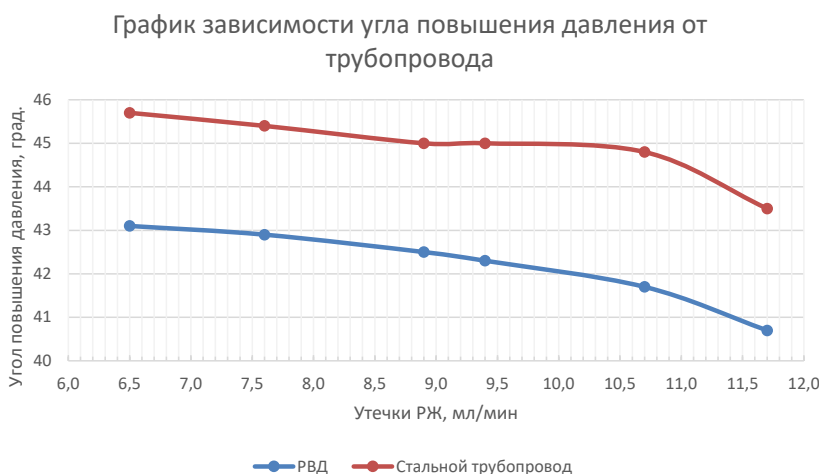


Рисунок 5 – График зависимости угла повышения давления от утечек с учётом трубопровода
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graph of the dependence of the pressure rise angle on leaks, taking into account the pipeline
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ публикации последних лет, посвященной данной теме, позволяет выделить следующие ключевые тенденции в развитии методов технической диагностики гидравлических систем строительных и дорожных машин: переход от статической диагностики к динамической, где важную роль играет анализ переходных процессов, включая временные профили давления; рост роли цифровой обработки сигналов, в том числе применение преобразования Фурье и спектрального анализа, для выделения информативных признаков; активное внедрение методов машинного обучения и искусственного интеллекта для автоматической диагностики и классификации дефектов по временным рядам; углубление физического моделирования гидродинамических процессов, что позволяет точнее связывать диагностические признаки с реальными физическими процессами в гидросистемах; интеграция сенсорных технологий и интеллектуального мониторинга в комплексные системы управления и диагностики.

Проведенные исследования показали, что анализ переходных процессов позволяет выявлять внутренние физические особенности системы, которые могут служить косвенными признаками дефектов или ухудшения технического состояния гидравлических систем в целом, так и отдельных ее элементов.

Исследование установило, что жёсткость трубопроводов влияет на угол повышения давления (скорость нарастания давления в напорной магистрали). Угол повышения давления для РВД составил от 43,1 до 40,7 градусов (разница 17,5%) включительно, а для стального трубопровода от 45,7 до 44,5 (разница 20,3%) соответственно, что говорит о влиянии жёсткости трубопровода гидропривода на предлагаемый диагностический параметр.

Учёт коэффициентов объёмной жёсткости трубопроводов гидравлической системы, и особенно рукавов высокого давления, в дальнейшем позволит значительно повысить качество теоретических и практических исследований гидравлических приводов машин.

Скорость нарастания давления относится к группе динамических диагностических признаков, формируемых в процессе перехода гидросистемы из одного состояния в другое. В отличие от статического давления, определяемого балансом сил и сопротивлений, характеризует способность системы аккумулировать энергию давления во времени.

С точки зрения теории диагностики данный параметр можно считать интегральным, так

как формируется под воздействием нескольких физических факторов: чувствительным, поскольку даже незначительные изменения структуры системы приводят к заметным изменениям динамики давления; информативным, так как содержит сведения не только о величине давления, но и о форме временной зависимости давления от времени.

Результаты проведенных экспериментов могут стать основой для разработки нового метода технической диагностики элементов гидросистем. Использование дополнительных параметров, таких как изменение скорости нарастания давления и объёмной жёсткости гидросистемы, позволяет перейти от количественной оценки величины давления к комплексной оценке технического состояния гидросистемы. Это создаёт предпосылки для разработки автоматизированных алгоритмов диагностики, основанных на анализе переходных процессов без необходимости вывода системы на установившиеся режимы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вялов С.А., Чукарина И.М. Коэффициент объёмной жёсткости рукавов высокого давления как показатель динамических свойств гидравлического привода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 431–437. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-431-437. EDN OWNJLX.
2. Галдин Н.С. Математическое моделирование гидравлических ударных устройств // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2010. № 4 (18). С. 72–77.
3. Дубовик Е.А. Объёмная жёсткость и её влияние на динамику гидромеханической системы // Автомобильная промышленность. 2016. № 5. С. 37–39. EDN WAQQVJ.
4. Лесковец И.В., Грац А.А., Рогожин В.Д. Диагностирование гидропривода аэродромной техники // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3(103). С. 356–367. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367. EDN DOFLIH.
5. Миллер А.П., Пугин К.Г. Диагностирование гидроцилиндров строительно-дорожных машин с помощью гидравлического подпора // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 551–559. DOI: 10.17816/0321-4443-568992. EDN JSUAFI.
6. Миллер А.П., Пугин К.Г., Шаихов Р.Ф. Использование дополнительных параметров при диагностировании гидроцилиндров // Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии, инновации: материалы Международной конференции. В 3-х частях, Пермь, 11–15 ноября 2024 года. Пермь: ИПЦ Прокрость, 2024. С. 169–173. EDN BNSBMB.
7. Пугин К.Г., Шаякбаров И.Э. Обеспечение надёжности гидравлических систем строительно-дорожных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 2. С. 176–184. DOI: 10.17816/0321-4443-630654. EDN OACLUG.

8. Рыбак А.Т. Моделирование гидравлических систем на основе теории объёмной жёсткости // Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений – 2017 (СПММОИиПВ-2017): труды Международной научной конференции, пос. Дивноморское, г. Геленджик, Краснодарский край, 4–11 сентября 2017 года. Том II. ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2017. С. 234–242. EDN UXCIRQ.

9. Рыбак А.Т., Ляхницкая О.В. Моделирование приводов технологических машин с учётом объёмной жёсткости их гидравлических систем // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-3(20-3). С. 271–276. DOI: 10.12737/16920. EDN VDQFLD.

10. Рыбак А.Т. Объёмная жёсткость и её влияние на динамику гидромеханической системы // Вестник Донского государственного технического университета. 2006; 6(3): 200–207.

11. Рынкевич С.А., Хадкевич И.Ю. Экспериментальные исследования физических свойств гидропривода мобильной машины // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 4(49). С. 68–78. DOI: 10.53078/20778481_2015_4_68. EDN VBWIBB.

12. Тимохов Р.С., Шоль Н.Р., Бурмистров В.А. Исследование влияния отрицательных температур на изменение показателей гидравлических систем // Успехи современной науки. Белгород. 2017. № 6, Т. 2. С. 95–99.

13. Максименко А.Н., Антипенко Г.Л., Бездников Д.В., Кутузов В.В. Повышение работоспособности гидропривода строительно-дорожных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2007. № 4. С. 24–30.

14. Конев В.В., Мерданов Ш.М., Бородин Д.М. [и др.] Условия эксплуатации строительно-дорожных машин // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-3. С. 502–507.

15. Хазиев М.Л. Методы и средства оперативной диагностики вязкости жидкости гидравлических систем // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 5. С. 192–194. EDN OGEZWE.

16. Хазиев М.Л. Диагностика надёжности гидравлического привода с применением нейронных сетей // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2025. № 1(99). С. 114–122. EDN LLRKOP.

17. Wang Q, Zhu C. Study on Dynamic Characteristics of Hydraulic System of ZYWL-6000D Full Hydraulic Directional Drill. *Journal of Vibration & Shock*, 2014. 33: 174–179, 188.

18. Hong JH, Day M. Monitoring of Cleanliness Level in Hydraulic Systems: Obtaining Reliable On-Line data. *J of Driv and Cont*. 2012; 9(2); 28–38.

19. Ni S.X., Zhang Y.F., Liang X.F. Intelligent Fault Diagnosis Method Based on Fault Tree // *Journal of Shang Hai Jiaotong University*. 2008. Vol. 42 (8). P. 1372–1375.

20. Jasiński R.: Problems of the starting and operating of hydraulic components and systems in low ambient temperature (Part 1), *Polish Maritime Research* 2008, Vol 15; pp. 61-72.

REFERENCES

1. Vyalov S.A., Chukarina I.M. The coefficient of volumetric stiffness of high-pressure hoses as an indicator of the dynamic properties of a hydraulic drive. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2022. No. 5. pp. 431-437. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-431-437. EDN OWNJLX.

2. Galdin N.S. Mathematical modeling of hydraulic impact devices. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy*. 2010. No. 4 (18). pp. 72-77.

3. Dubovik E.A. Volumetric rigidity and its influence on the dynamics of the hydromechanical system. *Automotive industry*. 2016. No. 5. pp. 37-39. (In Russ.) EDN VAKKVJ.

4. Leskovets I.V., Gratz A.A., Rogozhin V.D. Diagnostics of hydraulic drive of airfield equipment. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy*. 2025. Vol. 22, No. 3(103). pp. 356-367. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367. EDN DOFLIH.

5. Miller A.P., Pugin K.G. Diagnostics of hydraulic cylinders of road construction machines using hydraulic backup. *Tractors and agricultural machinery*. 2023. Vol. 90, No. 6. pp. 551-559. (In Russ.) DOI: 10.17816/0321-4443-568992. EDN JSUAFI.

6. Miller A.P., K Pugin.G., Shaikhov R.F. The use of additional parameters in the diagnosis of hydraulic cylinders. *Agrotechnologies of the 21st century: development strategy, technologies, innovations : Proceedings of the International Conference*. In 3 parts, Perm, November 11-15, 2024. Perm: CPI Procost, 2024. pp. 169-173. (In Russ.) EDN BNSBMB.

7. Pugin K.G., Shayakbarov I.E. Ensuring the reliability of hydraulic systems of construction and road machinery. *Tractors and agricultural machinery*. 2025. Vol. 92, No. 2. pp. 176-184. (In Russ.) DOI: 10.17816/0321-4443-630654. EDN OACLUJ.

8. Rybak A.T. Modeling of hydraulic systems based on the theory of volumetric rigidity // Modern problems of mathematical modeling, image processing and parallel computing 2017 (SPMМОИiPV-2017) : Proceedings of the International Scientific Conference, pos. Divnomorskoye, Gelendzhik, Krasnodar Territory, September 04-11, 2017. Volume II. DSTU-PRINT LLC, 2017. pp. 234-242. (In Russ.) EDN UXCIRQ.

9. Rybak A.T., Lyakhnitskaya O.V. Modeling of drives of technological machines taking into account the volumetric rigidity of their hydraulic systems. Actual directions of scientific research of the 21st century: theory and practice. 2015. Vol. 3, No. 9-3(20-3). pp. 271-276. DOI: 10.12737/16920. EDN VDQFLD.

10. Rybak A.T. Volumetric rigidity and its effect on the dynamics of a hydromechanical system. *Bulletin of the Don State Technical University*. 2006;6(3):200-207. (In Russ.)

11. Rynkevich S.A., Khadkevich I.Y. Experimental studies of the physical properties of the hydraulic drive of a mobile machine. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2015. № 4(49). Pp. 68-78. DOI: 10.53078/20778481_2015_4_68. (In Russ.) EDN VBWIBB.

12. Timokhov R.S., Shol N.R., Burmistrov V.A. Investigation of the influence of negative temperatures on changes in hydraulic system parameters. *Successes of modern science. Belgorod*, 2017. No. 6 (2). pp. 95-99. (In Russ.)

13. Maksimenko A.N., Antipenko G.L., Bezdnikov D.V., Kutuzov V.V. Improving the efficiency of hydraulic drive of road construction machines. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2007. No. 4. pp. 24-30. (In Russ.)

14. Konev V.V., Merdanov Sh.M., Borodin D.M. [et al.] Operating conditions of construction and road machinery. *Fundamental research*. 2016. No. 12-3. pp. 502-507. (In Russ.)

15. Khaziev M.L. Methods and means of operational diagnostics of fluid viscosity of hydraulic systems. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2025. No. 5. pp. 192-194. (In Russ.) EDN OGEZWE.

16. Khaziev M.L. Diagnostics of hydraulic drive reliability using neural networks. *Socio-economic and technical systems: research, design, optimization*. 2025. № 1(99). Pp. 114-122. (In Russ.) EDN LLRKOP.

17. Wang Qiu, Zhu S. Investigation of the dynamic characteristics of the hydraulic system of a fully hydraulic directional drilling rig ZYWL-6000D. *The magazine "Vibration and shocks"*, 2014. 33: 174-179, 188.

18. Hong J.H., Day M. Monitoring the level of cleanliness in hydraulic systems: obtaining reliable operational data. *The beginning of the movement and the continuation*. 2012; 9(2); 28-38.

19. Ni S.H., Zhang Yu.F., Liang H.F. Intelligent fault diagnosis method based on a fault tree. *Journal of Shang Hai Jiaotong University*. 2008. Volume 42 (8). pp. 1372-1375.

20. Yasinsky R.: Problems of starting and operating hydraulic components and systems at low ambient temperatures (part 1), *Polish Marine Research*, 2008, Volume 15; pp. 61-72.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Миллер А.П. Анализ научных статей, планирование и проведение экспериментальных исследований, сбор, анализ и обработка статистических данных, формулирование выводов исследования, оформление статьи.

Пугин К.Г. Разработка тематики научного исследования, участие в экспериментальных исследованиях, анализ полученных результатов, общее редактирование статьи.

Шаихов Р.Ф. Анализ полученных результатов, формулировка выводов, общее редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Miller A.P. Analysis of scientific articles, planning and conducting experimental research, collection, analysis and processing of statistical data, formulation of the research conclusions, design of the article.

Pugin K.G. Development of the research theme, participation in experimental studies, analysis of the obtained results, general editing of the article.

Shaikhov R.F. Analysis of the results, formulation of the research conclusions, general editing of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Миллер Александр Павлович – аспирант кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29), старший преподаватель кафедры «Технический сервис и ремонт машин» Пермского государственного аграрно-технологического университета (614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23).

ORCID: 0000-0001-7741-8614,

SPIN-код: 8388-0646,

e-mail: aleksandrillera@mail.ru

Пугин Константин Георгиевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29), доц., заведующий кафедрой «Строительные технологии» Пермского государственного аграрно-технологического университета (614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23).

ORCID: 0000-0002-1768-8177,

SPIN-код: 7972-1668,

e-mail: 123zzz@rambler.ru

Шаихов Ринат Фидарисович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Технический сервис и ремонт машин» Пермского государственного аграрно-технологического университета (614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23).

ORCID: 0009-0000-2638-4776,

SPIN-код: 9799-5636,

e-mail: shr84@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Miller Alexandr P. – Postgraduate student, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy Prospect, Perm, 614990), Senior lecturer, Department of Technical Service and Repair of Machines, Perm State Agro-Technological University (23, Petropavlovskaya street, Perm, 614990).

ORCID: 0000-0001-7741-8614,

SPIN-code: 8388-0646,

e-mail: aleksandrillera@mail.ru

Pugin Konstantin G. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy Prospekt, Perm, 614990), Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Technologies, Perm State Agro-Technological University (23, Petropavlovskaya street, Perm, 614990).

ORCID: 0000-0002-1768-8177,

SPIN-code: 7972-1668,

e-mail: 123zzz@rambler.ru

Shaikhov Rinat F. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Technical Service and Repair of Machinery, Perm State Agro-Technological University (23, Petropavlovskaya street, Perm, 614990).

ORCID: 0009-0000-2638-4776,

SPIN-code: 9799-5636,

e-mail: shr84@list.ru

Научная статья
УДК 624.132.3 + 625.7.08.002.5
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>
EDN: FQDNQR



КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

К.А. Гундарев ✉, С.В. Кондаков, А.В. Подзерко, М.А. Асфандияров, И.Е. Левшин
Южно-Уральский государственный университет,
г. Челябинск, Россия
✉ ответственный автор
pioneer03.95@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Разрушение покрытий автомобильных дорог и гидротехнических сооружений часто происходит из-за недостаточного уплотнения насыпных грунтов ввиду послойного уплотнения на малую глубину. Решение этой проблемы требует совершенствования технологии и оборудования для равномерного уплотнения грунтов на глубину, независимую от толщины насыпного слоя. Целью данного исследования является определение передаточного отношения нового устройства для глубокого уплотнения грунтов, разработанного соавторами.

Материалы и методы. В работе используются методы математического моделирования нового устройства по кинематическим схемам для определения передаточного отношения. Рассмотрены кинематические схемы нового устройства с использованием трех конусных роликов, расположенных между водилом, эпициклом (уплотняемым грунтом) и забурником через равные углы. На основе анализа кинематических схем выявлена зависимость передаточного отношения устройства от угловых скоростей водила и конусного ролика. Определены угловые скорости и построена схема для определения радиусов водила и конусного ролика. Получена зависимость передаточного отношения нового устройства от его геометрических характеристик.

Результаты. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660077. Представлены фрагменты исходного кода программы для расчета передаточного отношения устройства на языке программирования Python. Результаты работы могут быть использованы инженерами и специалистами профильных предприятий, конструкторских бюро и инжиниринговых центров при расчете параметров аналогичных устройств. Практическое значение результатов исследования связано с усовершенствованием устройств глубокого уплотнения грунтов и повышением показателей эффективности дорожно-строительных машин.

Обсуждение и заключение. Ценность работы обусловлена полученным выражением для передаточного отношения нового устройства, обладающим научной новизной. Установленная связь между передаточным отношением, углом между осями конусных роликов и углом наклона образующей конусного ролика позволяет рассчитать крутящий момент на валу рассматриваемого механизма. Также представлен экспериментальный образец нового устройства с оптимальными геометрическими параметрами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: передаточное отношение, математическая модель, дорожно-строительные машины, раскатка котлованов, динамически-уравновешенная система, конусные ролики, водило, эпицикл, площадь контакта, глубокое уплотнение грунтов

Статья поступила в редакцию 21.12.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Гундарев К.А., Кондаков С.В., Подзерко А.В., Асфандияров М.А., Левшин И.Е. Кинематическое исследование нового устройства для глубокого уплотнения грунтов // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 196-208. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>

© Гундарев К.А., Кондаков С.В., Подзерко А.В., Асфандияров М.А., Левшин И.Е., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>

EDN: FQDNQR

KINEMATIC ANALYSIS OF NEW DESIGN OF DEEP SOIL COMPACTION EQUIPMENT

Kirill A. Gundarev ✉, Sergey V. Kondakov, Alexander V. Podzerko

Marat A. Asfandiyarov, Igor E. Levshin

South Ural State University,

Chelyabinsk, Russia

✉ corresponding author

pioneer03.95@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The destruction of road surfaces and hydraulic structures results from insufficient compaction of bulk soils due to layer-by-layer shallow compaction. There is a need to improve technology and equipment for uniform soil compaction at a depth irrelevant to the layer thickness. The purpose of this research is to determine the gear ratio for the new deep soil compaction device designed by the co-authors.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of the new design based on kinematic schemes for determining the gear ratio have been used. The article discusses the kinematic schemes of the new device with three conical rollers mounted between the carrier, the epicycle (compacted soil) and the drill bit at equal angles. According to the diagrams, the gear ratio is expressed by means of angular velocities of the carrier and the conical roller. As angular velocities are determined, the scheme is constructed to determine the radii of the carrier and the conical roller. The relations between the gear ratio of the new design and its geometric characteristics are obtained.

Results. The Certificate of state registration of the computer program No. 2025660077 has been received. Fragments of the source code of a program for calculating the gear ratio of a device in the Python programming language are presented. The applicability of the research results refers to calculating the torque and geometric parameters of similar devices at machine-building enterprises. The practical significance of the research results is related to the improved design of deep soil compaction equipment which increases the efficiency of road construction machinery.

Discussion and conclusion. The research novelty refers to the introduction of the gear ratio for the new device design. Relations between the gear ratio, the angle between the axes centers and the skew angle of the conical rollers make it possible to calculate the torque of such devices. An experimental model of the new device made according to optimal geometric parameters has been presented.

KEYWORDS: gear ratio; mathematical model; road construction machines; rolling out pits; dynamically balanced system; conical rollers; carrier; epicycle; contact area; deep soil compaction

The article was submitted: December 21, 2025; approved after reviewing: February 19, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Gundarev K.A., Kondakov S.V., Podzerko A.I.V., Asfandiyarov M.A., Levshin I.E. Kinematic analysis of new design of deep soil compaction equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 196-208. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>

© Gundarev Kirill A., Kondakov Sergey V., Podzerko Alexander V., Asfandiyarov Marat A., Levshin Igor E., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги и гидротехнические сооружения – это важная система экономического развития региона, страны и континента. Поддержание транспортной сети требует огромных финансовых и природных ресурсов, что способствует изменению климата. Около 10% выбросов парниковых газов приходится на строительство и обслуживание подобных инженерных сооружений [1].

Протяженность автомобильных дорог увеличилась на 12 млн км по всему миру с 2000 г. При этом ожидается, что к 2050 г. будет построено еще 25 млн км дорог, на что потребуется более 70 трлн долларов США [2]. Требование устойчивого развития заключается в снижении затрат на жизненный цикл дорожного покрытия и воздействия на окружающую среду для достижения экономической эффективности, углеродной нейтральности [3] и безопасности дорожного движения в ближайшем будущем [4].

Новые автомобильные дороги и гидротехнические сооружения улучшают логистику, повышение эффективности которой стало движущей силой и определяющим фактором эффективной интеграции в глобальные цепочки создания стоимости, поддержания экономического роста и повышения национальной конкурентоспособности [5].

В настоящее время при строительстве автомобильных дорог и гидротехнических сооружений (плотин, дамб, насыпей и прочих инженерных сооружений) на просадочных и насыпных грунтах всегда возникают сложности в период эксплуатации, вызванные проявлением неравномерных просадок и деформаций грунтового основания, что приводит к аварийным ситуациям и к невозможности эксплуатации данных сооружений. Для решения этих проблем необходимы дополнительные затраты от общей стоимости объекта, на что выделяются все большие суммы государственных и частных инвестиций [5].

Просадочные и насыпные грунты (пески, супеси, суглинки) характеризуются недостаточно высокой несущей способностью, повышенной сжимаемостью и влагонасыщением, ухудшением физико-механических свойств при увлажнении и достаточно низкой устойчивостью на сейсмической местности. Проблемы, возникающие при строительстве гидротехнических сооружений на просадочных и насыпных грунтах, могут быть решены новой технологией и оборудованием для уплотнения грунтов механическими способами.

Новое направление совершенствования дорожно-строительных и гидротехнических

машин с навесным оборудованием – это их оснащение устройством для глубокого уплотнения грунтов. Оказываемое им воздействие на грунт способствует увеличению несущей способности, повышению прочностных характеристик, уменьшению фильтрации воздуха в уплотняемом слое, что создает устойчивую структуру грунтового массива по всей глубине насыпного слоя уплотняемого грунта.

Существующие дорожно-строительные машины (катки, трамбовки, виброплиты и т.п.) при возведении насыпи из различных типов грунтов осуществляют послойное уплотнение таких формаций толщиной 0,3...0,8 м [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. При данном методе уплотнения определенная масса насыпного грунта уменьшается в объеме за счет удаления из его пор небольшой части воды и воздуха, а другая часть подвергается компрессионному сжатию в массиве грунта. В конечном итоге такой грунт приобретает недостаточную плотность в сравнении с требуемыми показателями, подвергается быстрому разрушению в период эксплуатации, вызывает провалы дорожного полотна с нарушением транспортного сообщения и разрушением земляных дамб. Все эти неблагоприятные ситуации несут колоссальный ущерб в финансовом и материальном плане.

Возникает необходимость в уменьшении числа таких ситуаций путем создания грунтовых массивов с улучшенными показателями плотности насыпных и просадочных грунтов. Решить сложившуюся проблему возможно технологией глубокого уплотнения грунтов, независимой от толщины слоя насыпного грунта.

Для уплотнения насыпных грунтов на большую глубину, достигающую нескольких метров (земляное полотно автомобильных дорог, гидротехнических сооружений и других насыпей высотой до 4–6 м), изучен опыт применения оборудования для уплотнения грунтов, внедренного в эксплуатацию.

Известны способы уплотнения грунтов с помощью конусных оболочек, внедряемых в грунт с помощью ударных импульсов [19] (рисунок 1) и методом раскатки [Патент № 1836527 Российская Федерация. Устройство для раскатки скважин в грунте / Л.М. Бобылев, А.Л. Бобылев // № 5000939/03; заявл. 12.07.1991; опубл. 23.08.1993, Бюл. № 31]. Известно устройство набивных свай с применением винтового рабочего органа [20]. Как показывают исследования ученых из г. Омска и г. Новосибирска, плотность грунта в результате глубинного уплотнения может быть повышена на 20–25%, а несущая способность в 1,5–2 раза.



Рисунок 1 – Агрегат с рабочим оборудованием для глубинного трамбования грунта [19]

Figure 1 – Unit with working equipment for deep soil compaction [19]

Относительными недостатками применяемых известных конструкций являются большая площадь контактной поверхности рабочего органа с грунтом, достигающая 6 м^2 , что требует установки гидромолотов большой мощности, а также динамическая неуравновешенность механической системы устройства для раскатки

котлованов [Патент № 161212 Российская Федерация. Устройство для раскатки котлованов / Е.И. Кромский, Д.Р. Каюпов, А.С. Гладченко // № 2015141387; заявл. 29.09.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10] [21,22] и конусного раскатчика [24] с коленчатым валом и одним конусным роликом (рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальный стенд: 1 – механизм подачи; 2 – привод; 3 – коленчатый вал; 4 – конусный раскатчик; 5 – уплотняемый грунт; 6 – разборная форма [23]
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Experimental stand: 1 – drive; 2 – feed mechanism; 3 – crankshaft; 4 – cone reamer; 5 – compacted soil; 6 – collapsible form [23]
Source: compiled by the authors.

Ученые Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (г. Челябинск) модернизировали устройство для раскатки котлованов, применив динамически-уравновешенную систему для устройства глубокого уплотнения грунтов [Патент № 199875 Российская Федерация. Устройство для глубокого уплотнения грунтов / Е.И. Кромский, С.В. Кондаков, К.А. Гундарев, К.З. Тиллоев, М.А. Асфандияров // № 2020109847; заявл. 05.03.2020; опубл. 24.09.2020, Бюл. № 27] в виде трех симметрично расположенных по окружности конусных роликов с возможностью уменьшения осевого усилия путем использования винтового шнека, жестко соединенного с забурником нового

устройства [Патент № 221102 Российская Федерация. Устройство для уменьшения осевого усилия при глубоком уплотнении грунтов / К.А. Гундарев // № 2023108118; заявл. 03.04.2023; опубл. 18.10.2023, Бюл. № 29].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторским коллективом проведены исследования кинематической схемы устройства для глубокого уплотнения грунтов [25], в результате которых определено передаточное отношение планетарного механизма устройства. Для этого рассмотрены схемы устройства (рисунки 3, 4) и проведено математическое моделирование [26, 27].

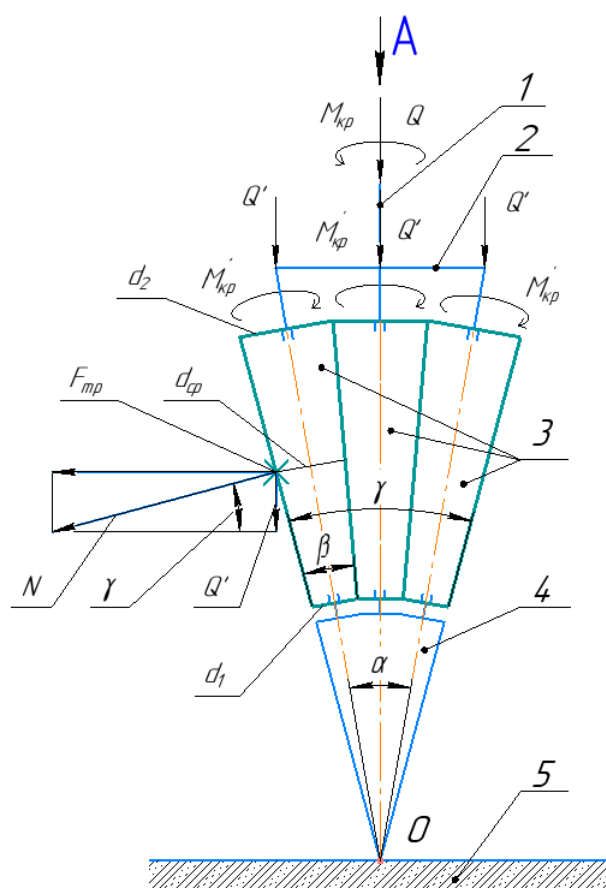


Рисунок 3 – Кинематическая схема нового устройства для глубокого уплотнения грунтов:
1 – вал приводной; 2 – водило; 3 – конусные ролики; 4 – забурник; 5 – грунтовое основание
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Kinematic scheme of the new device for deep soil compaction:
1 – drive shaft, 2 – carrier, 3 – cone rollers, 4 – trapper, 5 – ground base
Source: compiled by the authors.

Вид А

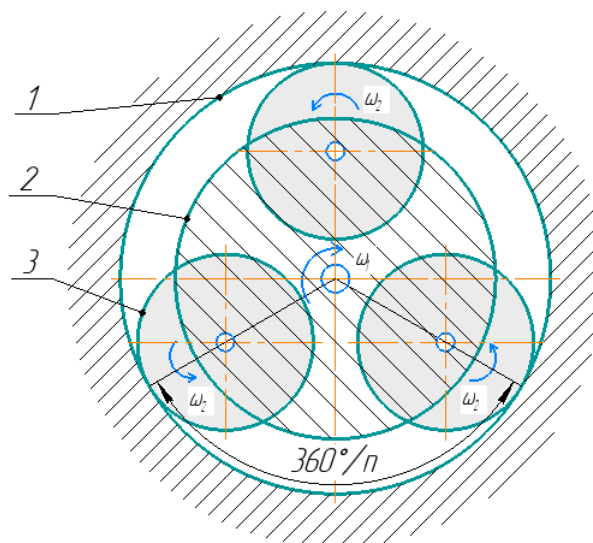


Рисунок 4 – Кинематическая схема нового устройства для глубокого уплотнения грунтов на виде сверху:
 1 – эпицикл; 2 – водило; 3 – конусный ролик; ω_1 – угловая скорость водила;
 ω_2 – угловая скорость одного конусного ролика; n – количество конусных роликов
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Kinematic scheme of the new device for deep soil compaction (top view):
 1 – epicycle; 2 – carrier; 3 – cone roller; ω_1 – angular speed of the carrier;
 ω_2 – angular speed of a cone roller; n – number of cone rollers
 Source: compiled by the authors.

Записано выражение для определения передаточного отношения устройства по схеме (см. рисунок 4):

$$i_{кр} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (1)$$

где ω_1 – угловая скорость водила, c^{-1} ;
 ω_2 – угловая скорость одного конусного ролика, c^{-1} .

Для определения угловых скоростей конусного ролика и водила составлена следующая схема (рисунок 5).

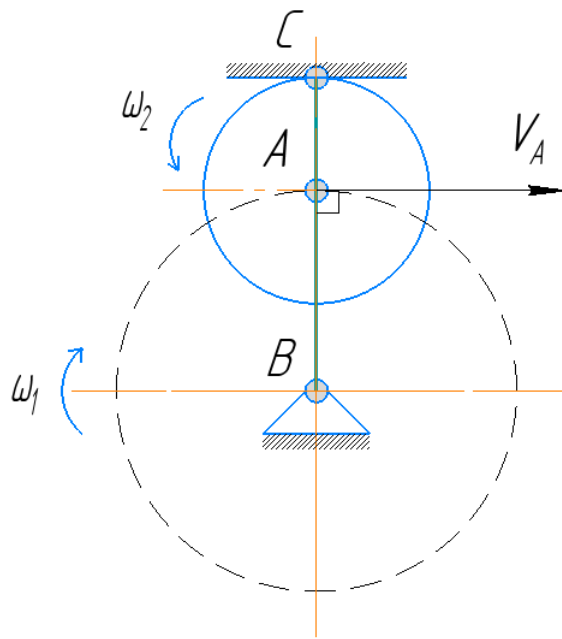


Рисунок 5 – Схема для определения угловых скоростей нового устройства:
 ω_1 – угловая скорость водила; ω_2 – угловая скорость конусного ролика; V_A – абсолютная скорость точки A;
 B, C – точки, принадлежащие водилу и конусному ролику соответственно;
 A – точка, принадлежащая водилу и конусному ролику одновременно
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Scheme for determining the angular speeds of the new device:
 ω_1 – angular speed of the carrier; ω_2 – angular speed of a cone roller; V_A – absolute speed of point A;
 B, C – points belonging to the carrier and the cone roller, respectively;
 A – points belonging both to the carrier and the cone roller
 Source: compiled by the authors.

Записана система уравнений для определения абсолютной скорости точки A относительно точек B и C:

$$\begin{cases} \vec{V}_A \perp AB; V_A = \omega_1 \cdot AB; \\ \vec{V}_A \perp AC; V_A = \omega_2 \cdot AC, \end{cases} \quad (2)$$

где \vec{V}_A – абсолютная скорость точки A, м/с;
 AB – расстояние, равное радиусу водила r_g' , т.е. $AB = r_g'$, м;
 AC – расстояние, равное радиусу конусного ролика r_k' , т.е. $AC = r_k'$, м.

Выражена угловая скорость водила ω_1 из (2) и получено следующее выражение:

$$\omega_1 = \frac{V_A}{AB} = \frac{V_A}{r_g'}, \quad (3)$$

где r_g' – радиус водила, равный расстоянию AB, м.

Выражена угловая скорость конусного ролика ω_2 из (2) и получено следующее выражение:

$$\omega_2 = \frac{V_A}{AC} = \frac{V_A}{r_k'}, \quad (4)$$

где r_k' – радиус конусного ролика в произвольном сечении, равный расстоянию AC, м.

В формулу (1) подставлены данные из формул (3) и (4) и получено выражение

$$i_{кр} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{V_A \cdot r_k'}{r_g' \cdot V_A} = \frac{r_k'}{r_g'} = \frac{AC}{AB}. \quad (5)$$

Для определения радиусов водила и конусного ролика построена следующая расчетная схема (рисунок 6).

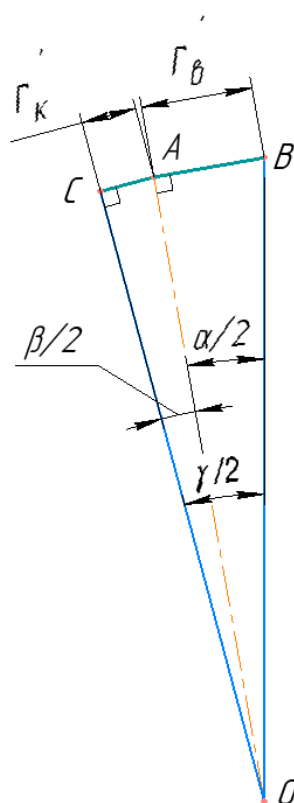


Рисунок 6 – Схема для определения радиусов водила и конусного ролика: r_s' – радиус эпицикла; r_b' – радиус водила; r_k' – радиус конусного ролика; α – угол между центром устройства и осью конусного ролика; β – угол наклона образующих конусного ролика; γ – угол, учитывающий угол α и половину угла β и обозначающий половину угла всего устройства; O – точка пересечения осей и образующих конусных роликов, обозначающая также вершину забурника; A, B, C – вершины углов
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Scheme for determining the radii of the carrier and the cone roller: r_s' – epicycle radius; r_b' – carrier radius; r_k' – cone roller radius; α – angle between the center of the device and the axis of the cone roller; β – angle of inclination of the cone roller elements; γ – half of the angle of the entire device, angle α and half of angle β being taken into account; O – the point of intersection of the axes and the cone rollers, which also refers to the top of the drill bit; A, B, C – vertices of corners
 Source: compiled by the authors.

Для определения радиуса водила на схеме (см. рисунок 6) рассмотрен треугольник AOB . Для этого определено значение острого угла $\alpha/2$ по формуле

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{AB}{OB}, \quad (6)$$

где α – угол между центром устройства и осью конусного ролика, град.;

AB – катет, равный величине радиуса водила, $AB = r_b'$, м;

OB , – гипотенуза прямоугольного треугольника AOB , м.

Радиус водила r_b' (катет AB) найден из выражения (6):

$$r_b' = AB = OB \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (7)$$

Для определения радиуса конусного ролика на схеме (см. рисунок 6) рассмотрен треугольник AOC . Для этого определено значение острого угла $\beta/2$ по формуле

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{AC}{AO}, \quad (8)$$

где β – угол наклона образующих конусного ролика, град.;

AC – катет, равный величине радиуса конусного ролика, $AC = r_k'$, м;

AO – гипотенуза прямоугольного треугольника AOC и одновременно катет прямоугольного треугольника AOB , м.

```
def main():
    # Определим передаточное отношение
    print(cl.Fore.RED + "Определение передаточного отношения")
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение Va, м/с")
    Va = float(input()) #Абсолютная скорость точки А, м/с
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение alpha, град")
    alpha = float(input()) #Угол между центром устройства и осью конусного
    ролика, град
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение beta, град")
    beta = float(input()) #Угол наклона образующих конусного ролика, град
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение OB, м")
    OB = float(input()) #Гипотенуза прямоугольного треугольника AOB
```

Рисунок 7 – Фрагмент исходного кода исходных данных
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – A fragment of the source code of the source data
Source: compiled by the authors.

```
#Выводим результаты
print(cl.Fore.MAGENTA + f"Передаточное отношение устройства: {i_cr}")
print(cl.Fore.MAGENTA + f"Угловая скорость водила ω1: {omega_1}, рад/с")
print(cl.Fore.MAGENTA + f"Угловая скорость конусного ролика ω2:
{omega_2}, рад/с")

print(cl.Fore.BLACK + f"Радиус водила (AB): {rv}, м")
print(cl.Fore.BLACK + f"Гипотенуза прямоугольного треугольника AOC и
одновременно катет прямоугольного треугольника AOB: {AO}, м")
print(cl.Fore.BLACK + f"Радиус конусного ролика (катет AC): {rk}, м")
```

Рисунок 8 – Фрагмент исходного кода результатов расчета передаточного отношения
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Fragment of the source code of the gear ratio calculation results
Source: compiled by the authors.

Радиус конусного ролика r_k' (катет AC) найден из выражения (8):

$$r_k' = AC = AO \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (9)$$

Для определения катета AO на схеме (см. рисунок 6) рассмотрен треугольник AOB. Для этого определено значение косинуса угла $\beta/2$ по формуле

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{AO}{OB}. \quad (10)$$

Катет AO определен из выражения (10):

$$AO = OB \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (11)$$

Значение катета AO из (11) подставлено в (9) и получено следующее выражение:

$$r_k' = AC = OB \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (12)$$

Полученные данные из (7) и (12) подставлены в формулу (5), и после преобразования получено выражение

$$i_{кр} = \frac{r'_k}{r'_e} = \frac{AC}{AB} = \frac{OB \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{OB \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (13)$$

В результате преобразований выражения (13) получена следующая формула:

$$i_{кр} = \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (14)$$

Выражение (14) считается окончательным преобразованием передаточного отношения (1) нового устройства для глубокого уплотнения грунтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе выполнения математического моделирования получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660077 «Расчёт параметров устройства для глубокого уплотнения грунтов». Фрагменты исходного кода программы для расчета передаточного отношения устройства на языке программирования Python представлены ниже (рисунки 7, 8).



Рисунок 9 – Экспериментальный образец нового устройства для глубокого уплотнения грунтов
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Experimental sample of the new device for deep soil compaction
Source: compiled by the authors.

Полученное выражение (14) можно использовать для нахождения крутящего момента, необходимого для вращения нового устройства для глубокого уплотнения грунтов (рисунок 9), изготовленного авторским коллективом в НИИ «Опытное машиностроение» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

Материал о новой разработке авторского коллектива опубликован в средствах массовой информации:

- телеканал «УРАЛ1»: https://vk.com/wall-18784359_68801
- ЮУрГУ (НИУ): <https://www.susu.ru/ru/news/2025/11/05/razrabotka-uchenyhpomozhet-dorogam-prosluzhit-25-let-bezremonta>
- Правительство Челябинской области: <https://pravmin.gov74.ru/prav/news/view.htm?id=11700080>

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны кинематические схемы для определения передаточного отношения нового устройства для глубокого уплотнения грунтов.
2. Расписаны математические модели угловых скоростей водила и конусного ролика данного устройства.
3. Определена зависимость передаточного отношения от геометрических характеристик нового устройства.
4. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660077 «Расчёт параметров устройства для глубокого уплотнения грунтов».
5. Изготовлен экспериментальный образец нового устройства для глубокого уплотнения грунтов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Riekstins A., Haritonovs V., Straupe V. et al. Comparative environmental and economic assessment of a road pavement containing multiple sustainable materials and technologies // Construction and Building Materials. 2024. V. 432, 136522. P. 1-15. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136522
2. Alamgir M., Mason J. Campbell Sloan S. et al. Economic, Socio-Political and Environmental Risks of Road Development in the Tropics // Current Biology. 2017. V. 27. P. 1130-1140. DOI: 10.1016/j.cub.2017.08.067
3. Chauhan S., Dongol R., Chauhan R. Evaluation of economic loss of urban road flooding: A case of Kathmandu Metropolitan City // Environmental Challenges. 2023. V. 13, 100773. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100773

4. Wijnen W. Socio-economic costs of road crashes in middle-income countries: Applying a hybrid approach to Kazakhstan // *IATSS Research*. 2021. V. 45. P. 293–302. DOI: 10.1016/j.iatssr.2020.12.006
5. Mohsin A.K.M., Tushar H., Hossain S.F.A. et al. Green logistics and environment, economic growth in the context of the Belt and Road Initiative // *Heliyon*. 2022. V. 8, e09641. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09641
6. Baliello A., Wang D. *Advances in Road Engineering: Innovation in Road Pavements and Materials // Buildings*. 2024. V. 14, 2250. P. 1–5. DOI: 10.3390/buildings14072250
7. Кромский Е.И., Жилияев С.В. Новая техника для уплотнения земляного полотна // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2016. Т. 16, № 2. С. 14–22. DOI: 10.14529/engin160202
8. Massarsch K.R., Fellenius B.H. Deep vibratory compaction of granular soils // Chapter 19 in *Ground Improvement-Case Histories*, Elsevier publishers, 2005. P. 633–658.
9. Мартюченко И.Г., Иванов С.В. Выбор рациональных размерно-геометрических параметров мерзлоторыхлительного оборудования // *Строительные и дорожные машины*. 2015. № 7. С. 49–51.
10. Skrypchenko O., Katerina K., Tetiana K., Bieliatynskiy A. Method of increasing the roughness of the existing road // 15th International scientific conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development». 2016. № 165. P. 1766–1770. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.920
11. Baidya D.K., Krishna G.M. Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System // *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, № 4, 2001, pp. 409–417.
12. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Анализ уплотнения грунтов перспективными вибрационными катками // *Строительные и дорожные машины*. 2013. № 1. С. 8–10.
13. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and state of the art approaches for wear reduction and quantification) // *Eng. Fail. Anal.* 90, 2018, pp. 554–584. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.026>
14. Holger P., Marco B., Alexander K. et al. Dynamic soil compaction – recent methods and research tools for innovative heavy equipment approach // *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*. 2015. № 125. P. 390–396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.096
15. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. 2020. Vol. 1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_3
16. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
17. Kromsky E.I., Tilloev K.Z., Muhiddinzoda K.J. New Mechanism for Composite Materials Compaction // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. 2021. Vol. 1. P. 173–180.
18. Koshel S., Koshel G. Structural analysis of the mechanism with a third-class structure group of the fourth order // New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing company, 2019. p. 29–33.
19. Кромский Е.И., Кондаков С.В., Асфандияров М.А. Перспективы развития техники для строительства автомобильных дорог с твердым цементобетонным покрытием // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2018. Т.18, № 3. С.30–38.
20. Тиллоев К.З., Кондаков С.В., Шарифов Д.А. Оценка эффективности гусеничного экскаватора с новым технологическим оборудованием // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2023. № 1. С. 125–132. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_1_125
21. Пономаренко Ю.Е., Баранов Н.Б. Устройство набивных свай с применением винтового рабочего органа // *Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: Сб. трудов*. Уфа: Изд-во Башнистрой, 2006. С. 115–118.
22. Heins E., Seitz K.F., Chmelnickijetal A. Advances in numerical modelling of different ground improvement techniques // *Geotechnical Engineering*. 2017. №. 48 (3). P. 87–94.
23. Тиллоев К.З., Кондаков С.В., Асфандияров М.А. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса глубокого уплотнения грунта конусным раскатчиком // *Известия вузов. Горный журнал*. 2021. № 3. С. 60–70. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70
24. Кромский Е.И., Кондаков С.В., Тиллоев К.З., Кадырова Х.И. Новое сменное оборудование гидравлического экскаватора // *Политехнический вестник. Серия «Инженерные исследования»*. 2018. № 3 (43). С. 50–54.
25. Тиллоев К.З. Математическая модель процесса работы конусного раскатчика // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2019. Т. 19, № 3. С. 60–67. DOI: 10.14529/engin190307
26. Кондаков С.В., Асфандияров М.А., Гундарев К.А. Математическое моделирование устройства для глубокого уплотнения грунтов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2021. Вып. 21. № 2. С. 52–59.
27. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
28. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Asfandiarov M.A. Mathematical Model of Mechanism for Sealing Hardly Deformable Materials // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Vol. 1. P. 11–20.

REFERENCES

1. Riekstins A., Haritonovs V., Straupe V. et al. Comparative environmental and economic assessment of a road pavement containing multiple sustainable materials and technologies. *Construction and Building Materials*. 2024; V. 432, 136522. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136522

2. Alamgir M., Mason J. Campbell, Sloan S. et al. Economic, Socio-Political and Environmental Risks of Road Development in the Tropics. *Current Biology*. 2017; V. 27. P. 1130-1140. DOI: 10.1016/j.cub.2017.08.067
3. Chauhan S., Dongol R., Chauhan R. Evaluation of economic loss of urban road flooding: A case of Kathmandu Metropolitan City. *Environmental Challenges*. 2023; V. 13, 100773. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100773
4. Wijnen W. Socio-economic costs of road crashes in middle-income countries: Applying a hybrid approach to Kazakhstan. *IATSS Research*. 2021; V. 45. P. 293-302. DOI: 10.1016/j.iatssr.2020.12.006
5. Mohsin A.K.M., Tushar H., Hossain S.F.A. et al. Green logistics and environment, economic growth in the context of the Belt and Road Initiative. *Heliyon*. 2022; V. 8, e09641. P. 1-7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09641
6. Baliello A., Wang D. *Advances in Road Engineering: Innovation in Road Pavements and Materials*. Buildings. 2024; V. 14, 2250. P. 1-5. DOI: 10.3390/buildings14072250
7. Kromsky E.I., Zhilyaev S.V. New technique for compaction of the roadbed. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»* 2016; Vol. 16, № 2. P. 14–22. DOI: 10.14529/engin160202.
8. Massarsch K.R., Fellenius B.H. *Deep vibratory compaction of granular soils*. Chapter 19 in *Ground Improvement-Case Histories*, Elsevier publishers, 2005; P. 633–658.
9. Martyuchenko I.G., Ivanov S.V. The choice of rational dimensional and geometric parameters of permafrost-leaching equipment. *Construction and road machines*. 2015; № 7. P. 49–51.
10. Skrypchenko O., Katerina K., Tetiana K., Bieliatynskiy A. Method of increasing the roughness of the existing road. 15th International scientific conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development». 2016; № 165. P. 1766–1770. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.920
11. Baidya D.K., Krishna G.M. Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, № 4, 2001, pp. 409–417.
12. Savelyev S.V., Brown G.G. Analysis of soil compaction by promising vibrating rollers. *Construction and road vehicles*. M., 2013; № 1. P. 8–10.
13. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and state of the art approaches for wear reduction and quantification). *Eng. Fail. Anal.* 90, 2018; pp. 554–584. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.026>
14. Holger P., Marco B., Alexander K. et al. Dynamic soil compaction – recent methods and research tools for innovative heavy equipment approach. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). 2015; № 125. P. 390–396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.096
15. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. 2020; Vol. 1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_3
16. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
17. Kromsky E.I., Tilloev K.Z., Muhiddinzoda K.J. New Mechanism for Composite Materials Compaction. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) 2021*. Vol. 1. P. 173–180.
18. Koshel S., Koshel G. Structural analysis of the mechanism with a third-class structure group of the fourth order. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing company, 2019; p. 29-33.
19. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A. Prospects for the development of technology for the construction of highways with a solid cement-concrete coating. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»*. 2018; Vol.18, №3. P. 30-38.
20. Tilloev K.Z., Kondakov S.V., Sharifov D.A. Report on the effectiveness of a crawler excavator with a new technology skim equipment. *Tru NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2023; No.: 1, pp. 125–132. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_1_125
21. Ponomarenko Y.E., Baranov N.B. The device of packed piles using a screw working body. *Problems of soil mechanics and foundation construction in difficult ground conditions: Collection of works*. Ufa: Publishing House of the Tower, 2006. P. 115–118.
22. Heins E., Seitz K.F., Chmelnizkijetal A. Advances in numerical modelling of different ground improvement techniques. *Geotechnical Engineering*. 2017; №. 48 (3). P. 87–94.
23. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z., Kadyrova H.I. New replaceable equipment of a hydraulic excavator. *Polytechnic Bulletin. The series «Engineering Research»*. 2018; № 3 (43). P. 50-54.
24. Tilloev K.Z. Mathematical model of the cone rolling machine operation process. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»*. 2019; Vol. 19, № 3: P. 60–67. DOI:10.14529/engin190307
25. Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A., Gundarev K.A. Mathematical modeling of a device for deep soil compaction. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»*. 2021; Vol. 21. № 2. P. 52–59.
26. Tilloev K.Z., Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A. Theoretical and experimental study of the process of deep soil compaction by a cone roller. *Izvestiya vuzov. Mining magazine*. 2021; № 3. P. 60–70. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70
27. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
28. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A. Mathematical Model of Mechanism for Sealing Hardly Deformable Materials. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Vol. 1. P. 11-20.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Гундарев К.А. Обзор и анализ используемой литературы, вывод математических моделей, оформление текста, математических моделей и схем научной статьи, написание выводов, изготовление и сборка экспериментального образца нового устройства для глубокого уплотнения арунтов, 31%.

Кондаков С.В. Руководство написанием научной статьи, проверка текста и схем, 15%.

Подзерко А.В. Проверка математических моделей научной статьи на достоверность рабочего процесса, 9%.

Асфандияров М.А. Разработка кинематических схем, вывод математических моделей по схемам, 30%.

Левшин И.Е. Обзор и анализ используемой литературы, введение, вывод математических моделей, оформление текста, математических моделей и схем научной статьи, написание выводов, 15%.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Gundarev K.A. Literature review and analysis, building mathematical models, preparing schemes, drawing conclusions, manufacture and assembly of the experimental sample of the new device for deep soil compaction, writing the manuscript.

Kondakov S.V. General guidance on the research design and writing the manuscript, approving the text and schemes.

Podzerko A.I.V. Verification of mathematical models, confirming the reliability of the workflow.

Asfandiyarov M.A. Development of kinematic schemes, derivation of mathematical models from the schemes.

Levshin I.E. Literature review and analysis, building mathematical models, writing the manuscript, drawing conclusions.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гундарев Кирилл Александрович – инженер кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8358-1329>,

SPIN-код: 1238-1158,

e-mail: gundarevka@susu.ru

Кондаков Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф., проф. Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6818-1694>,

SPIN-код: 3410-2300,

Author ID: 509941,

Scopus ID: 56556574700,

e-mail: kondakovsv@susu.ru

Подзерко Александр Викторович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>,

SPIN-код: 1796-0253,

Author ID: 410625,

Scopus ID: 57197827508,

Researcher ID: AAL-5472-2021,

e-mail: podzerkoav@susu.ru

Асфандияров Марат Андреевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1868-0232>,

SPIN-код: 3101-7174,

e-mail: asfandiyarovma@susu.ru

Левшин Игорь Евгеньевич – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильный сервис», инженер кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0532-1751>,

e-mail: igor_levshin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gundarev Kirill A. – engineer at the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8358-1329>,

SPIN-code: 1238-1158,

e-mail: gundarevka@susu.ru

Kondakov Sergey V. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Advanced Engineering School of Engine Building and Heart of the Urals Equipment, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6818-1694>,

SPIN-code: 3410-2300,

Author ID: 509941,

Scopus ID: 56556574700,

e-mail: kondakovsv@susu.ru

Podzerko Alexander V. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>,

SPIN-code: 1796-0253,

Author ID: 410625,

Scopus ID: 57197827508,

Researcher ID: AAL-5472-2021,

e-mail: podzerkoav@susu.ru

Asfandiyarov Marat A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1868-0232>,

SPIN-code: 3101-7174,

e-mail: asfandiyarovma@susu.ru

Levshin Igor E. – postgraduate student of the Department of Automobile Engineering and Car Service, engineer at the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0532-1751>,

e-mail: igor_levshin@mail.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.138, 368.212
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-210-223>
EDN: FTJOFG



АЛГОРИТМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАНЦИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И СТРАХОВЩИКА ПРИ РЕМОНТЕ АВТОМОБИЛЕЙ

С.А. Бурага ✉, И.Е. Агуреев
Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия
✉ ответственный автор
buraga.sergey@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В сфере автострахования существенная проблема – длительные сроки простоя автомобилей в ремонте из-за затянутого согласования объема и стоимости восстановительного ремонта между СТОА и страховщиком. Оптимизация алгоритма их взаимодействия позволит сократить временные издержки и повысить эффективность процесса. Целью данной работы является разработка и обоснование улучшенного алгоритма взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобилей, поврежденных в результате ДТП, с целью минимизации сроков простоя транспортных средств.

Материалы и методы. В работе проанализирован существующий алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика в рамках автострахования. Установлены временные затраты на непроизводительные операции (рассмотрение и согласование стоимости ремонта). Проведен сравнительный анализ текущего и предлагаемого алгоритма согласования объема и стоимости восстановительного ремонта. Дается описание объекта и предмета исследования – ремонта автомобиля, поврежденного в результате ДТП по автострахованию, и алгоритмов взаимодействия СТОА и страховщика.

Результаты. Детально описан действующий алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика, выявлены причины, связанные с длительными сроками согласования. Разработан и представлен альтернативный алгоритм, направленный на сокращение сроков простоя автомобилей в ремонте. Доказана принципиальная возможность практической реализации предложенного алгоритма. Количественно оценены временные затраты на ключевые этапы согласования в рамках обоих алгоритмов.

Обсуждение и заключение. Предложенный алгоритм позволяет существенно сократить сроки простоя автомобилей в ремонте за счет оптимизации процессов согласования между СТОА и страховщиком. Сформулированы практические рекомендации по внедрению нового алгоритма в работу страховых компаний и сервисных центров. Перспективным направлением дальнейшего исследования является проверка алгоритма на практике и оценка экономической эффективности его применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алгоритм взаимодействия, центры сервисного обслуживания автомобилей, страховщик, ремонт автомобилей, сокращение сроков простоя транспортных средств

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность анонимным рецензентам и редакции журнала за обработку статьи и возможность её опубликования.

Статья поступила в редакцию 21.11.2025; одобрена после рецензирования 24.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Бурага С.А., Агуреев И.Е. Алгоритмы взаимодействия станций технического обслуживания и страховщика при ремонте автомобилей // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 210-223. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-210-223>

© Бурага С.А., Агуреев И.Е., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-210-223>
EDN: FTJOFG

INTERACTION ALGORITHMS BETWEEN AUTOMOBILE SERVICE CENTERS AND THE INSURANCE COMPANIES DURING CAR REPAIR

Sergey A. Buraga ✉, Igor E. Agureev
Tula State University,
Tula, Russia
✉ corresponding author
buraga.sergey@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In the field of auto insurance, there is a significant problem such as the long downtime of cars undergoing repairs because of the delays while approving the volume and cost of repairs between the automobile service centers and the insurance company. Optimizing the algorithm of their interaction will reduce time wastes and increase the efficiency of the process. The purpose of this work is to develop and substantiate an improved algorithm for the interaction of the service station and the insurance company during the repair of cars damaged as a result of an accident, in order to minimize vehicle downtime.

Methods and materials. The paper analyzes the existing algorithm of interaction between the automobile service centers and the insurance company in the framework of auto insurance regulation. The time wastes for unproductive operations (review and approval of repair costs) have been established. A comparative analysis of the current and proposed algorithm for concluding an agreement about volume and cost of repair has been carried out. The description of the object and subject of the study is given – the repair of a vehicle damaged as a result of an accident on car insurance contract, and the algorithms of interaction between the automobile service centers and the Insurer.

Results. The current algorithm of interaction between the automobile service centers and the Insurer has been described in details, and the reasons related to long approval periods have been identified. An alternative algorithm has been developed and presented, aimed at reducing the downtime of vehicles in repair. The fundamental possibility of practical implementation of the proposed algorithm has been proved. A quantitative assessment of the time spent on key approval stages within both algorithms has been conducted.

Discussion and conclusion. The proposed algorithm allows to reduce significantly the downtime of cars in repair by optimizing the coordination processes between the automobile service centers and the insurance company. Practical recommendations on the implementation of the new algorithm in the work of the insurance companies and service centers have been formulated. A promising direction for further research is to test the algorithm in practice and evaluate the economic effectiveness of its application.

KEYWORDS: the algorithm of interaction, the automobile service centers, the Insurer, car repairs, reducing vehicle downtime

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the anonymous reviewers and the Editorial Board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal for editing the article and providing an ability to publish it.

The article was submitted: November 21, 2025; approved after reviewing: February 24, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Buraga S.A., Agureev I.E. Interaction algorithms between automobile service centers and the insurance companies during car repair. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 210-223. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-210-223>

© Buraga Sergey A., Agureev Igor E., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью статьи является анализ существующего алгоритма взаимодействия СТОА (станция технического обслуживания автомобилей) и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП, и формулировка предложений по изменениям данного алгоритма. Эти предложения будут касаться достижения наиболее коротких путей взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП, в частности за счёт снижения сроков диагностики, экспертиз, составления и согласования всех необходимых при этих действиях документов и собственно ремонтных работ.

Отдельные работы посвящены моделированию страховой компании как системы массового обслуживания [1]. При этом входящие потоки событий – это заявки на выплату страховых сумм. Разработанные здесь модели содержат характеристики потоков событий – моментов поступления страховых премий и страховых выплат, которые в целом определяют динамику финансового состояния страховой компании. При таком подходе необходимо, конечно же, иметь хотя бы оценочные данные об интенсивностях этих потоков событий. Для наших задач важно, что рассматриваемая в целом система имеет вероятностный характер функционирования, но, что еще более важно, она создает поток заявок на ремонт с определенными правилами заполнения свободных мест в сервисных организациях. Если рассмотреть предельный случай – равновесие в такой системе, то поиск равновесного состояния представляет собой важный с практической и теоретической стороны вопрос.

Часть работ [2, 3] касается проблем управления деятельностью станций технического обслуживания автомобилей. Нами были выбраны и рассмотрены те публикации, которые так или иначе связаны с процессами принятия решений при ремонте, снабжении запасными частями, новыми технологиями, ускоряющими деятельность таких компаний в целом. Это важно с точки зрения того, каким образом следует разрабатывать методики, сокращающие длительность пребывания заявок в ремонте. Данные методики должны ориентироваться как на стохастичность потоков заявок, так и на

инновационные технологии, снижающие возникающие от этого риски. Другая часть работ [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] посвящена вопросам проектирования и оптимизации СТОА с помощью современных информационных технологий, что приводит к росту привлекательности конкретных СТОА, например, в работе [4] рассматривается проектирование клиентской зоны, а в статье [5] используются BIM-технологии при проектировании СТОА. В целом работы авторов [4, 5] направлены на повышение эффективности использования помещений СТОА и общей привлекательности предприятия. Процессы имитационного моделирования являются важной компонентой при проектировании технического обслуживания, на что указывает и ряд зарубежных исследований [7, 8, 9, 10].

Другой частью рассматриваемой в настоящей работе системы является страховая компания, которая взаимодействует как с клиентом, так и со СТОА. Следует указать, что процессы, происходящие в страховом бизнесе, напрямую влияют на восстановление автотранспортных средств после ДТП. Поэтому было важно рассмотреть некоторые особенности динамики страховых компаний, особенно действующих в области автострахования. В целом результаты демонстрируют [11], что работа страховщиков происходит в достаточно сложной системе, которая требует учета самых различных факторов, порой трудно формализуемых и имеющих чаще всего экспертное решение. Тем не менее основной вывод, который мы могли бы сделать уже сейчас, заключается в том, что процессы возникновения заявок на ремонт и процессы обслуживания заявок – основные источники стохастичности, которые должны учитываться в достаточной степени, чтобы сокращать потери времени в ремонте автомобилей для транспортных систем.

Эксплуатация автомобильного транспорта является комплексной областью науки и техники, в которой можно выделить процессы ремонта автомобилей, а также организацию данных процессов в отдельное направление исследований, в частности, связанное с автострахованием¹.

Автострахование интересует нас как частный случай указанных выше процессов, по-

¹ Паспорт специальности ВАК 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»//Рекомендация Президиума ВАК Минобрнауки России от 10.12.2021 № 32/1-НС «О сопряжении научных специальностей номенклатуры, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, научных специальностей номенклатуры, утвержденной приказом Минобрнауки России от 23 октября 2017 г. № 1027». 2022г. стр12.

сколькo он отличается важной спецификой, имеющей серьёзную юридическую сторону, затрагивающую сразу несколько сторон, связанных между собой множеством связей и отношений. В Российской Федерации наиболее популярными видами автострахования являются ОСАГО (обязательное страхование автогражданской ответственности) и КАСКО (комплексное автомобильное страхование кроме ответственности). ОСАГО имеет большее распространение, хотя КАСКО со временем приобретает всё большую популярность [12]. Система обязательного страхования автомобилей была впервые введена в Великобритании в соответствии с законом о дорожном движении 1930 г. Это гарантировало, что все владельцы автомобилей и водители должны были быть застрахованы от своей ответственности за травмы или смерть третьим лицам, когда их автомобиль использовался на дороге общего пользования².

Процессы организации ремонта и его выполнения в случае, связанном с автострахованием и взаимодействием СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП, кажутся более сложными, приводят к определенным задержкам и сказываются на общей эффективности эксплуатации автомобильного транспорта.

Таким образом, необходимо для достижения цели настоящей статьи выполнить следующие задачи:

- 1) проанализировать существующий алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП, в части организации и проведения восстановительного ремонта неисправного автомобиля;
- 2) определить временные затраты на все операции в существующем алгоритме;
- 3) на основе анализа существующего алгоритма разработать новый алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте

автомобиля, поврежденного в результате ДТП, направленный на уменьшение временных затрат на согласование объема и стоимости восстановительного ремонта поврежденного автомобиля;

- 4) определить перспективы и пути внедрения предлагаемого алгоритма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Существующий алгоритм урегулирования убытков в области автострахования

В марте 2017 г. вступили в силу поправки в закон об ОСАГО, предусматривающие страховое возмещение вреда, причиненного легковому автомобилю, находящемуся в собственности гражданина РФ и зарегистрированному в РФ, которое осуществляется, как правило, путём организации и (или) оплаты восстановительного ремонта^{3, 4, 5}. В связи с этим все автомобили, пострадавшие в ДТП, должны быть направлены на восстановительный ремонт на СТОА.

Существующий порядок действий при урегулировании убытков в области автострахования условно можно разделить на три основные стадии:

- 1) приём заявления о событии, имеющем признаки страхового случая, сбор всех необходимых документов; признание/непризнание случая страховым;
- 2) выдача направления на ремонт в страховом случае, подготовка к проведению ремонта и ремонт поврежденного автомобиля;
- 3) закрытие выплатного дела и организация его хранения.

На первой стадии осуществляется приём заявления о страховом событии и сбор всех необходимых документов, включая документы из компетентных органов (Госавтоинспекция) при их наличии. Далее идёт анализ представленных документов и выясняется: что произошло, когда произошло и с каким именно автомобилем. Как правило, проводится первичный осмотр поврежденного автомобиля.

² Road Traffic Act 1930 (англ.). www.legislation.gov.uk. (дата обращения: 10.08.2025).

³ Интернет-портал «Страхование сегодня» <http://www.insur-info.ru> <Письмо> Банка России от 26.04.2017 № ИН-015-53/18 «О порядке возмещения причиненного вреда в натуре в связи с вступлением в силу Федерального закона от 28.03.2017

№ 49-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельцев транспортных средств» // Вестник банка России, 4 мая 2017 г.

⁴ Федеральный закон от 25.04.2002 № 40-ФЗ (ред. от 08.12.2020) «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельцев транспортных средств» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2021).

⁵ Положение Банка России от 1 апреля 2024 г. № 837-П «О правилах обязательного страхования гражданской ответственности владельцев транспортных средств» // Портал ГАРАНТ.РУ URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409468139/> (дата обращения: 22.03.2026).

Если страховое событие произошло в период действия договора страхования, с автомобилем, указанным в договоре страхования, а также по риску, на случай наступления которого проводится страхование – страховое событие признается страховым случаем. Временной интервал первой стадии формально может достигать 1–20 дней^{6, 7}. При непризнании случая страховым страховщик официально уведомляет об этом собственника автомобиля (законного представителя) путём направления мотивированного отказа в страховой выплате. В рамках целей данной статьи повлиять на первый этап не представляется возможным, следовательно, он остаётся неизменным.

Стадия вторая – случай признан страховым, составляется акт осмотра/направления на ремонт с указанием перечня повреждённых элементов и ремонтных воздействий. Вторая стадия – это и есть алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП. После прибытия автомобиля на СТОА открывается заказ-наряд и проводится дефектовка повреждённого автомобиля. Затем составляется калькуляция стоимости восстановительного ремонта и направляется страховщику на согласование. Страховщик проверяет объем и стоимость необходимых ремонтных работ и запасных частей (если есть необходимость в их замене) и даёт своё согласие на проведение восстановительного ремонта или составляет акт разногласий. После направления страховщиком акта разногласий СТОА его рассматривает и либо соглашается с ним и пересчитывает калькуляцию стоимости восстановительного ремонта, либо при существенных разногласиях направляет страховщику уведомление о невозможности проведения ремонтных работ. При проведении ремонтных работ могут быть обнаружены скрытые дефекты, в этом случае СТОА прекращает все ремонтные воздействия, документирует обнаружение скрытых дефектов актом обнаружения скрытых дефектов, уведомляет об этом страховщика. В таком случае составляется новая

калькуляция стоимости восстановительного ремонта с учётом обнаруженных скрытых дефектов и работ, материалов, запасных частей, требующихся для их устранения. Затем процедура согласования стоимости ремонта со страховщиком повторяется. После проведения всех ремонтных работ автомобиль возвращается владельцу (законному представителю). Во время второй стадии возможен вариант, при котором страховщик не соглашается с перечнем работ, запасных частей и их стоимости, указанных в заказ-наряде. Если СТОА и страховщик не могут ликвидировать возникшие разногласия по поводу стоимости ремонта, указанного в заказ-наряде, то такой ремонт не проводится. В этом случае страховщик выдаёт направление на ремонт в другую авторемонтную организацию либо заменяет вариант урегулирования убытка по согласованию с владельцем автомобиля/его законным представителем, на выплату деньгами.

На второй стадии процесса урегулирования убытков в области автострахования имеет место существенная потеря времени (простоя автомобиля в ремонте), т.к. на каждый процесс в отдельности между СТОА и страховщиком, связанный с документальным оформлением и согласованием, может уходить от 1 до 5 рабочих дней. Как правило, все подобные сроки чётко определены договорами, заключёнными между СТОА и страховщиком, и их сотрудники делают все возможное для минимизации этих сроков, но по ряду причин они не всегда выдерживаются. Одной из таких причин является загруженность сотрудников – при большом объёме поступающей информации её просто не успевают обработать в оговорённые сроки.

Вторую стадию процесса урегулирования убытков в области автострахования можно представить в виде алгоритма взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП. Существующий алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП, представлен на рисунке 1.

⁶ Тулинов В.В., Горин В.С., Страхование автомобильное // Страхование и управление риском: Терминологический словарь. М.: Наука, 2000. С. 10. 565 с.

⁷ Закон РФ № 2300-1 «О защите прав потребителей» от 07.02.1992 (гл. III Защита прав потребителей при выполнении работ/оказании услуг).

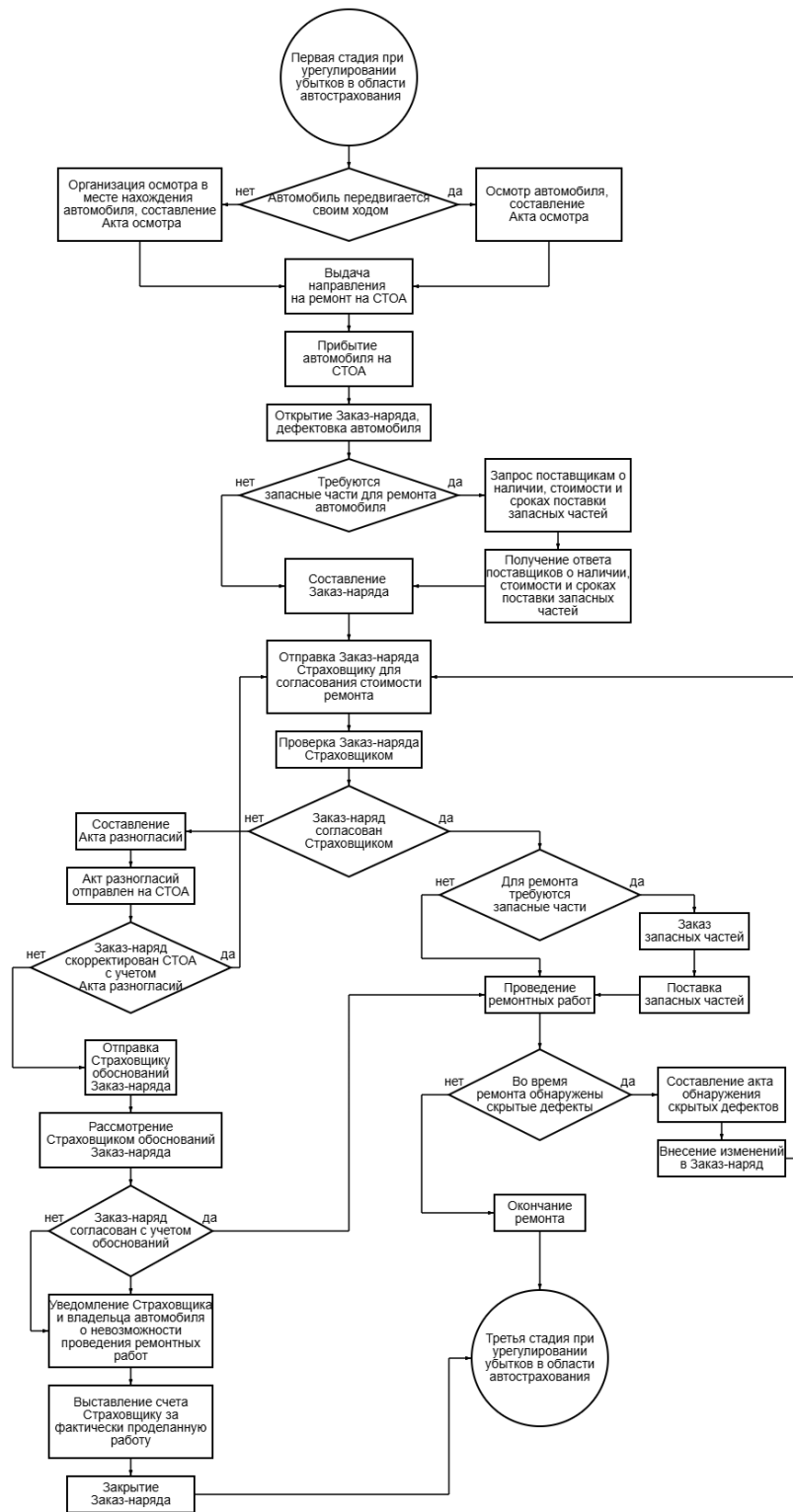


Рисунок 1 – Существующий алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The existing algorithm of interaction between the service center and the Insurer when repairing a car damaged as a result of an accident
 Source: compiled by the authors.

Третья стадия является заключительным этапом и подразумевает оплату страховщиком произведённого ремонта и организацию хранения выплатного дела. Как правило, на данной стадии автомобиль уже отремонтирован, передан владельцу или его законному представителю.

Для минимизации сроков нахождения автомобилей в ремонте наиболее целесообразно сократить сроки согласования стоимости ремонта, обнаружения скрытых дефектов и т.д.

Предлагаемый алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобилей, поврежденных в результате ДТП

На первую стадию существующей схемы действий при урегулировании убытков в области автострахования повлиять маловероятно, а на третью нецелесообразно, поэтому предлагается внести корректировки во вторую стадию, а именно существенно сократить сроки всевозможных согласований между СТОА и страховщиком, тем самым уменьшить время простоя автомобилей в ремонте. По нашим подсчётам это время можно сократить на 19 дней [15]. Между тем первая и третья стадии останутся без изменений. Если автомобильный сервис или СТОА затягивают ремонт автомобиля, важно понимать, что имеет место серьёзное нарушение: для каждого конкретного случая (гарантийный, после ДТП по ОСАГО, в рамках добровольного страхования и т.п.) существуют нормативные сроки ремонтных работ и предусмотрены штрафные санкции⁸.

Так как отношения страховщика и СТОА, выполняющего ремонт автомобилей, как правило, являются договорными, то временные интервалы согласования заказ-нарядов, актов обнаружения скрытых дефектов, актов разногласий и т.д. регламентированы договорами и данный процесс является сложным и бюрократизированным [13]. Требования страховщиков к временным интервалам, указанным в договорах, рассмотрения и согласования заказ-нарядов, различных актов и т.д. разнятся, но в среднем временные интервалы рассмотрения и согласования можно представить следующим образом:

- запрос СТОА поставщикам о наличии и стоимости запасных частей (в зависимости от времени отправки поставщику запроса) от 1 до 3 рабочих дней;

- рассмотрение страховщиком заказ-наряда СТОА от 1 до 5 рабочих дней (при согласовании заказ-наряда страховщиком СТОА необходимо подтвердить поставщику запасных частей заказ, что может занять от 1 до 3 рабочих дней, в зависимости от графика поставки);

- составление акта разногласий (при необходимости) от 1 до 3 рабочих дней;

- повторное согласование заказ-наряда занимает так же, как и первичного, от 1 до 5 рабочих дней;

- оплата услуг СТОА по восстановительному ремонту автомобилей занимает от 1 до 30 рабочих дней после предоставления документов, подтверждающих произведённый ремонт.

На данный момент практическая реализации предлагаемого алгоритма маловероятна, так как предполагает полное доверие страховщика авторемонтным организациям в плане достоверности сведений, указанных в заказ-наряде по объёму необходимых ремонтных работ и запасных частей для восстановительного ремонта повреждённого автомобиля, как следствие, по объёму денежных средств, необходимых для оплаты услуг СТОА. Вторая стадия предлагаемого алгоритма урегулирования убытков (алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП) представлена на рисунке 2.

Одним из путей решения данной проблемы является создание страховщиками аффилированных организаций (дочерних предприятий) – авторемонтных организаций, или аутсорсингов. Аутсорсинг – это организационное решение, означающее передачу выполнения некоторых функций предприятия (непрофильных или малоэффективных для него) внешнему подрядчику (аутсорсеру), способному обеспечить их реализацию на более высоком и качественном уровне⁹. Полный аутсорсинг урегулирования убытков в области автострахования на текущем уровне развития страхования в России маловероятен.

⁸ Автоматизированные информационные технологии в экономике: учебник / под ред. проф. Г.А. Титоренко. М.: Юнити, 2005.

⁹ Через пять лет страхование станет прозрачным [электронный ресурс]; Николай Сидоров — РБК ЗАО Медиа-Информационная Группа «Страхование сегодня» (МИГ) режим доступа: <https://www.insur-info.ru/press/165756/> (дата обращения: 22.03.2026).

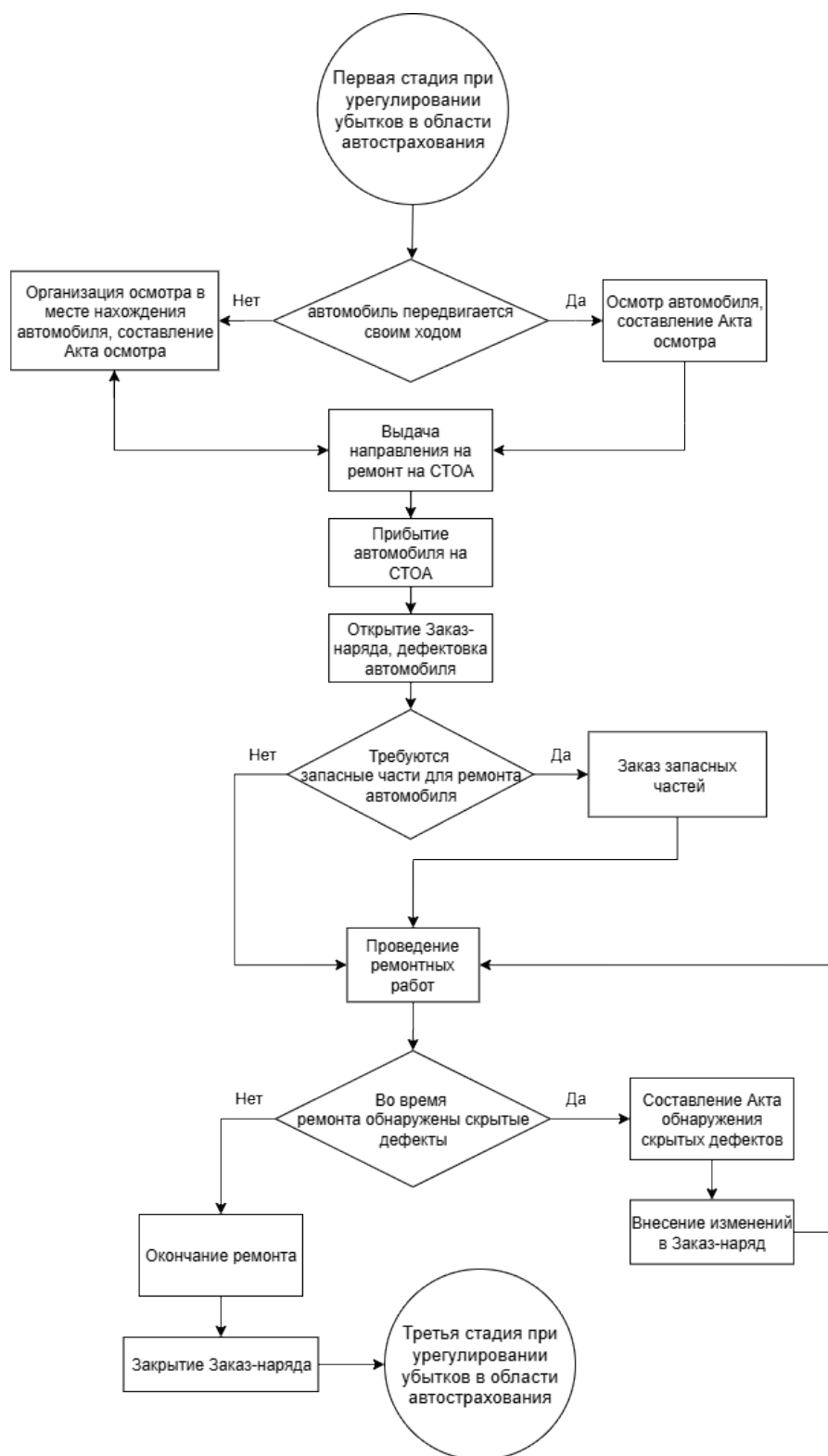


Рисунок 2 – Предлагаемый алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобиля, поврежденного в результате ДТП
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The proposed algorithm of interaction between the service center and the Insurer during the repair of a car damaged as a result of an accident
Source: compiled by the authors.

Аффилированные организации – это взаимосвязанные компании, ведущие общую хозяйственную деятельность¹⁰. Данный приём позволит повысить эффективность совершенствования деятельности организации [12, 14].

Договоренность между подобными предприятиями в сфере политики ценообразования может способствовать устранению конкурентных организаций. Подобные действия расцениваются как противозаконные, поскольку способствуют образованию монополии в определённой сфере предпринимательской деятельности. Монополия может стать причиной парализации отдельной ниши товарного рынка на территории Российской Федерации^{11, 12, 13, 14}. Для начала функционирования таких предприятий следует обратить внимание на совершенствование законодательной базы предоставления подобных услуг дочерней компанией страховщика и ее ответственность за ремонт низкого качества. Другой проблемой станет перестройка и синхронизация информационной системы страховщика и дочерней авторемонтной организации для внесения всех этапов ремонта в информационную систему в режиме реального времени, как следствие, встанет вопрос о переносе подразделения страховщика, занимающегося урегулированием убытков в области автострахования, на базу дочерней авторемонтной организации^{15, 16} [15]. И главный вопрос заключается в готовности страховых организаций вкладывать во все это свои средства. При решении всех указанных проблем данный алгоритм будет вполне жизнеспособным.

По своей сути предлагаемый алгоритм не имеет отличий от работы СТОА с обычными клиентами – физическими или юридическими лицами, обратившимися для ремонта авто-

мобиля (не по автострахованию). После получения направления на ремонт и прибытия автомобиля на СТОА начинается процесс ремонта: открытие заказ-наряда, дефектовка, заказ запасных частей при необходимости, ремонт, окончание ремонта и выдача автомобиля владельцу. Однако стоит учитывать, что информационная система аффилированной СТОА интегрирована в информационную систему страховщика, следовательно, страховщик имеет возможность отслеживать и контролировать весь процесс ремонта в режиме реального времени. Также СТОА доступна вся «страховая» история конкретного автомобиля: повреждения, выявленные при приеме на страхование (в большей степени относится к страхованию автокаско), был ли автомобиль участником ДТП, какие элементы подвергались ремонтным воздействиям и так далее. Также СТОА обязана вносить соответствующую информацию по объему и стоимости ремонта, включая номенклатуру и стоимость запасных частей и расходных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оба алгоритма описывают процесс ремонта автомобиля в рамках страхового случая, начиная с первичного осмотра и заканчивая закрытием заказ-наряда. Ключевое различие – в подходе к согласованию стоимости ремонта. Для минимизации сроков ремонта автомобилей, повреждённых вследствие дорожно-транспортных происшествий, оплата по которым происходит страховыми компаниями, предложен алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобилей, поврежденных в результате ДТП, сокращающий это время.

¹⁰ Аутсорсинг в страховании – сложившиеся практики, нестандартные возможности и альтернативный подход [электронный ресурс]; Давыдов Иван Иванович ЗАО Медиа-Информационная Группа «Страхование сегодня» (МИГ) режим доступа: <https://www.insur-info.ru/analysis/977/> (дата обращения: 22.03.2026).

¹¹ Закон РСФСР от 22.03.1991 № 948-1 «О конкуренции и ограничении монополистической деятельности на товарных рынках». // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51/ (дата обращения: 22.03.2026).

¹² Федеральный закон «О защите конкуренции» от 26.07.2006 N 135-ФЗ (последняя редакция) // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61763/ (дата обращения: 22.03.2026).

¹³ Федеральный закон от 26.12.1995 № 208-ФЗ (ред. от 31.07.2025, с изм. от 25.09.2025) «Об акционерных обществах» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2025) // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8743/ (дата обращения: 22.03.2026).

¹⁴ Федеральный закон от 08.02.1998 № 14-ФЗ (ред. от 28.12.2025) «Об обществах с ограниченной ответственностью» // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_17819/ (дата обращения: 22.03.2026).

¹⁵ Передай другому: российский рынок аутсорсинга [электронный ресурс]; Сергей Вирыскин; интернет-портал ИА «Клерк.РУ» режим доступа: <https://www.klerk.ru/buh/articles/432610/> (дата обращения: 22.03.2026).

¹⁶ Ясенев В.Н. Информационные системы и технологии в экономике // Юнити-Дана, 2008. 560 с.

Таблица
Временные затраты на операции по документообороту и согласованию объёма и стоимости восстановительного ремонта
Источник: составлено авторами.

Table
Time wastes for document management operations and approval of the volume and cost of restoration repairs
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Название операции	Временные затраты в существующем алгоритме, дней	Временные затраты в предлагаемом алгоритме, дней
1	Запрос/получение ответа о наличии, стоимости и сроков поставки запасных частей	1–3	1–3
2	Проверка/согласование заказ-наряда страховщиком	1–5	0
3	Составление страховщиком акта разногласий и отправка его на СТОА	1–3	0
4	Рассмотрение страховщиком обоснований СТОА об объёме и стоимости восстановительного ремонта	1–3	0
5	Составление СТОА акта обнаружения скрытых дефектов/рассмотрение страховщиком акта обнаружения скрытых дефектов	1–3	0
6	Проверка/согласование окончательного заказ-наряда страховщиком	1–5	0

Данный алгоритм отличается от существующего меньшим количеством согласований, проводимых СТОА и страховщиком и, соответственно, сокращенным документооборотом. Риски задержек ремонта автомобиля в этом случае сводятся к минимуму. В таблице показано, за счёт сокращения каких операций достигается данный эффект.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ показал возможность исследований с применением методов теории транспортных макросистем для решения задач поиска равновесия в системах массового обслуживания [28]. Практически полное отсутствие научных работ по рассматриваемой теме, а именно рассмотрение системы взаимодействия, которую можно представить как «треугольник» со сторонами: Клиент, Страховщик, СТОА, функционирование которой направлено на организацию и проведение восстановительного ремонта транспортных средств. Чаще можно найти работы, посвященные отдельно тематике СТОА и страховых компаний, работающих в сфере автострахования. Так, наиболее актуальными являются вопросы, связанные с ценовой политикой автострахования [16], использование телематических технологий [17, 18], прогнозных моделей премиальных выплат [19]. Телемати-

ка как технология в автостраховании известна и среди российских исследователей [20] как инновационная форма ведения бизнес-процессов. Все перечисленное ставит вопрос по поводу применения используемых в настоящей статье результатов. Они имеют большое значение при математическом моделировании всей системы

«Клиент-Страховщик-СТОА» на макроуровне, что соответствует региональным системам. При этом существенным является именно объединенный подход, в котором процессы страховщика становятся необходимым элементом, влияющим на работу всей совокупности СТОА. Таким образом, модели организации работ по послеаварийному ремонту автомобилей на уровне математических моделей, обеспечивающих поиск равновесных распределений клиентов по СТОА, должны учитывать особенности функционирования страховщиков.

Итак, данные результаты могут быть применены при разработке новой модели взаимодействия СТОА и страховщика в области организации и проведения ремонта поврежденных автомобилей.

Заметим, что вопросы повышения безопасности поведения водителей становятся, как ни странно, частью бизнеса страховщика. Так, многие зарубежные работы посвящены теме

риск-менеджмента, опирающегося на данные о поведении водителя, полученные напрямую от телематических систем и исследуемые машинным интеллектом [21, 22, 23, 24, 25]. Это означает, что цепочка связей в системе «Клиент-Страховщик-СТОА» замыкается не только в направлении

«Клиент-Страховщик», но и в направлении «Страховщик-Клиент», где у страховщика появляются новые данные о поведении водителей и возможность влиять на безопасность транспортного процесса практически в режиме реального времени. В этом процессе, имеющем явный системный характер, не последнее значение имеет проблема удержания клиентов [26], а также технологий мониторинга вождения [27]. Все это указывает на то, что в исследуемой системе вопросы ее устойчивости выходят на новый уровень, когда безопасность вождения становится управляющим параметром со стороны именно страховщика, а не только участников дорожного движения. Сокращающаяся за счет этого аварийность приводит к более стабильной работе страховых компаний, а следовательно, и к более полному покрытию убытков, с одной стороны, и к более качественному и быстрому восстановлению (ремонту) автомобилей, с другой.

Работа СТОА теперь имеет все возможности к более точному и тонкому планированию загрузки со стороны клиентов.

Следовательно, при более полном сотрудничестве СТОА и страховщика кардинальных изменений в целях СТОА не будет. Однако с большой долей вероятности будет смещение приоритетов к более высокой скорости ремонта (оказываемых услуг) и повышение качества ремонта.

На сегодняшний день проблемы взаимодействия СТОА и страховщика сводятся к оперативности согласования объема и стоимости восстановительного ремонта поврежденного автомобиля. Также страховщик не гарантирует конкретной СТОА постоянный поток в ремонт поврежденных автомобилей, а выбирает из списка СТОА-партнеров.

При более «тесном сотрудничестве» поток поврежденных автомобилей в ремонт будет выше, соответственно, загрузка СТОА увеличится. Одновременно уменьшится время ремонта за счет сокращения простоя автомобилей в ремонте на время, необходимое на согласование объема и стоимости ремонтных работ и требуемых запасных частей, а также увеличится объем денежных средств, поступающих за выполненный ремонт автомобилей.

Подтверждение этому получено путем проведения корреляционного анализа взаимосвязи переменных (выплаты, количество автомобилей, поступающих в ремонт, дней в ремонте) между собой при помощи сервиса

<https://math.semestr.ru/corel/corel.php>. Возможны и разные варианты взаимодействия: например, на основании договора страховщик организует работу своего собственного СТОА как обособленного подразделения компании. Следовательно, возможные эффекты от применения теории и моделей выглядят так:

- сокращение простоя автомобилей в ремонте;
- повышение качества оказываемых услуг;
- уменьшение затрат страховщика на оплату ремонта поврежденных автомобилей;
- снижение стоимости автострахования за счет сниженных затрат страховщика на выплату страхового возмещения (оплату стоимости восстановительного ремонта).

Уменьшение затрат страховщика на оплату ремонта поврежденных автомобилей достигается за счет:

- Сокращение стоимости запасных частей и расходных материалов. Например, при открытии страховщиком аффилированной СТОА как своего обособленного подразделения заказывать и оплачивать поставку запасных частей и расходных материалов будет страховщик (через СТОА). С учетом страхового портфеля и статистики самого страховщика этот объем заказов с большой долей вероятности будет считаться крупным оптом, следовательно, договора на поставку будут заключены с крупными поставщиками запасных частей и расходных материалов. Страховщик в этом случае получает минимальные цены, а поставщик стабильно крупные продажи.

- Снижение трудозатрат на документооборот.

Предлагаемый алгоритм подразумевает минимальный документооборот между СТОА и страховщиком при ремонте автомобилей по автострахованию, что освобождает персонал как страховщика, так и СТОА для профильных задач.

Уменьшение количества конфликтных ситуаций

За счёт устранения итераций при согласовании стоимости ремонта. Отдельно стоит выделить косвенные положительные эффекты:

- Улучшение репутации страховщика за счёт прозрачности и скорости ремонта. При хорошей репутации страховщик получит

увеличение страхового портфеля – большее количество заключенных договоров, более высокие показатели поступающих страховых премий.

- Снижение числа жалоб клиентов из-за задержек или неожиданных доплат. Меньшее число жалоб – меньше судебные издержки.

В данной статье проанализирован существующий алгоритм взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобилей, поврежденных в результате ДТП, и сформулированы предложения по изменениям алгоритма для достижения кратчайших сроков взаимодействия СТОА и страховщика при ремонте автомобилей и, как следствие, минимального простоя автомобилей в ремонте. Обоснована принципиальная возможность практической реализации предлагаемого алгоритма.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Даммер Д.Д. Математическая модель страховой компании в виде системы массового обслуживания с неограниченным количеством приборов с учетом одновременных страховых выплат // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2016). 2016. С. 18–23.
2. Николайчева А.М. Тренды цифровизации и автоматизации процессов станций технического обслуживания // Управленческий учет. 2021. № 7-2. С. 462–468.
3. Мамедов Э.Н. Теоретико-игровая оптимизация методов страхования в сфере автотранспорта // SCIENCE AND WORLD. 2013. С. 145.
4. Нестеренко И.С., Нестеренко Г.А., Буграков В.С. Проектирование клиентской зоны, позволяющей повысить спрос на услуги станций технического обслуживания автомобилей // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1(115). С. 55–58. DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.112
5. Нестеренко Г.А., Нестеренко И.С., Залознов И.П. Использование BIM-технологий для повышения эффективности разработки и эксплуатации предприятий по обслуживанию и продажам автомобилей // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 11 (137) С.1–6. DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.14
6. Захаров Н.С., Козин Е.С. Технологическое проектирование станций технического обслуживания автомобилей с использованием генетических алгоритмов // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies, Vol. 14, No 2, 2024. С.104–119. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-2-296
7. Phi-Hung Nguyen. Automotive Service Quality Investigation Using a Grey-DEMATEL Model // Computers, Materials & Continua. 2022, vol.73, No.3. P. 4779-4800. DOI: 10.32604/cmс.2022.030745
8. Revina I.V. Trifonova E.N. Car Service Optimization Based on Simulation // Journal of Physics: Conference Series. 1791 (2021) 012084. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012084
9. Bugrimov V., Sarbaev V. Optimization of the system of management of stores of the car service with the help of imitation simulation // MATEC Web of Conferences 334, 01022; 2021. DOI:10.1051/mateconf/202133401022
10. Krynke M., Mazur M. Innovative Work Order Planning with Process Optimization Using Computer Simulation in the Automotive Industry, in the Case of Repair Workshops // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. 2024. DOI: 10.3311/pptr.23546
11. Будникова И.К., Марданова А.М. Моделирование финансовой деятельности страховой компании // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2020. № 1. С. 24–27.
12. Буркальцева Д.Д., Идрисова Э.Р. Преимущества и недостатки автострахования в России // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2015. № 4 (33).
13. Качалов В.А. Что же это такое: «аутсорсинг»? // Методы менеджмента качества. 2008. № 4-5.
14. Ермилина Д.А. Моделирование бизнес-процессов как фактор повышения эффективности деятельности организации // Экономические системы. 2025. Том 18, № 1. С. 107–114. DOI: 10.29030/2309-2076-2025-18-1-107-114
15. Самигуллина А.Ф., Смирнова А.И. Анализ российского рынка автоматизированных информационных систем в области страховой деятельности: материалы VII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015009941>(дата обращения: 10.08.2025).
16. Hosein P. A Data-Driven Pricing Strategy for Automobile Insurance Policies // 2022 5th Asia Conference on Machine Learning and Computing (ACMLC). DOI: 10.1109/ACMLC58173.2022.00009
17. Xie Sh. Analyzing the Influence of Telematics-Based Pricing Strategies on Traditional Rating Factors in Auto Insurance Rate Regulation // Mathematics, 2024.12, 19, (3150), DOI:10.3390/math12193150
18. Henckaerts R., Antonio K. The added value of dynamically updating motor insurance prices with telematics collected driving behavior data // Insurance: Mathematics and Economics, 10.1016/j.insmatheco.2022.03.011, 105, (79-95), (2022). DOI:10.1016/j.insmatheco.2022.03.011
19. Masello L., Sheehan B., Castignani G., Guillen M., Murphy F. Predictive Modeling for Driver Insurance Premium Calculation Using Advanced Driver Assistance Systems and Contextual Information // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 10.1109/TITS.2024.3518572, 26, 2, (2202-2211), (2025) DOI: 10.1109/TITS.2024.3518572
20. Кушелев И.Ю. Внедрение инновационных информационных технологий на страховом рынке в России: телематика в автостраховании // Путеводитель предпринимателя – 2023. Т. 16, № 2. С. 110–119. DOI: 10.24182/2073-9885-2023-16-2-110-119

21. Lang F., Riegel L. Acceptance of online customer channels for damage claims in Germany // *Information Technology and Management*. 10.1007/s10799-023-00404-z26:1(101-116) Online publication date: 1-Mar-2025. DOI: 10.1007/s10799-023-00404-z

22. McDonnell K., Murphy F., Sheehan B., Masello L., Castignani G. Deep learning in insurance // *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 10.1016/j.eswa.2023.119543217:C. Online publication date: 1-May-2023 - DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119543.

23. Li H., Luo X., Zhang Z., Jiang W., Huang S. Driving risk prevention in usage-based insurance services based on interpretable machine learning and telematics data // *Decision Support Systems*. 10.1016/j.dss.2023.113985172:C. Online publication date: 1-Sep-2023 DOI: 10.1016/j.dss.2023.113985.

24. Brühwiler L., Fu Ch., Huang H., Longhi L., Weibel R. Predicting individuals' car accident risk by trajectory, driving events, and geographical context // *Computers, Environment and Urban Systems*. Volume 93, April 2022. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2022.101760

25. Cunha L., Bravo J. M. Automobile Usage-Based-Insurance: Improving Risk Management using Telematics Data // 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 10.23919/CISTI54924.2022.9820146, (1-6), (2022) DOI: 10.23919/CISTI54924.2022.9820146

26. Ortega M., Quintanilla J., Ong E. R., Ramos M. R., Trinidad C. J. Asfalit: A Web-based System for Customer Retention Strategies Optimization of a Car Insurance Company Using Cohort and Churn Analysis // 2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). DOI: 10.1109/ICICT57646.2023.10134149

27. Manko B. A. Erie Insurance: Monitoring technology in the car insurance market and the issue of data privacy

28. // *Journal of Information Technology Teaching Cases*, 13, 2, (193-198), (2022) DOI: 10.1177/20438869221117571.

29. Агуреев И.Е., Бурара С.А. Методы теории транспортных макросистем для решения задач динамики массового обслуживания для автострахования // *Вестник СибАДИ*. 2025; 22(5): 760–771. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-5-760-771. EDN: PBYTVD

REFERENCES

1. Dammer D. D. [Mathematical model of an insurance company in the form of a mass service system with an unlimited number of devices taking into account one-time insurance payments] *Information technology and mathematical modeling (ITMM-2016)*. 2016. (In Russ.)

2. Nikolaycheva A. M. [Trends in digitalization and automation of service station processes] *Management accounting*. 2021. No. 7-2. (In Russ.)

3. Mamedov E.N. [Game-theoretic optimization of insurance methods in the field of motor transport] *SCIENCE AND WORLD*. 2013. (In Russ.)

4. Nesterenko I.S. [Design of a customer zone that allows increasing demand for the services of car

service stations] *International Research Journal*. 2022. No. 1 (115). DOI: 10.23670 / IRJ.2022.115.1.112. (In Russ.)

5. Nesterenko G.A., Nesterenko I.S., Zaloznov I.P. [Using BIM technologies to improve the efficiency of development and operation of enterprises for car maintenance and sales] *International Research Journal*. 2023. No. 11 (137). (In Russ.)] DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.14

6. Zakharov N.S., Kozin E.S. [Technological design of vehicle service stations using genetic algorithms] *International Journal of Advanced Studies : Transport and Information Technologies*, Vol. 14, No. 2, 2024; DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-2-296. (In Russ.)

7. Phi-Hung Nguyen. [Automotive Service Quality Investigation Using a Grey-DEMATEL Model] *Computers, Materials & Continua*. 2022, vol.73, No.3. DOI: 10.32604/cmc.2022.030745

8. Revina I. V. Trifonova E. N. [Car Service Optimization Based on Simulation] *Journal of Physics: Conference Series*. 1791 (2021) 012084. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012084

9. Bugrimov V., Sarbaev V. [Optimization of the system of management of stores of the car service with the help of imitation simulation] *MATEC Web of Conferences* 334, 01022 (2021). DOI: 10.1051/mateconf/202133401022. (In Russ.)

10. Krynke M., Mazur M. [Innovative Work Order Planning with Process Optimization Using Computer Simulation in the Automotive Industry, in the Case of Repair Workshops] *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2024. DOI: 10.3311/pptr.23546

11. Budnikova I.K., Mardanova A.M. [Modeling of financial activities of an insurance company] *Information technologies in construction, social and economic systems*. 2020. No. 1. (In Russ.)

12. Burkaltseva D.D., Idrisova E.R. [ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF CAR INSURANCE IN

13. RUSSIA] *Scientific Bulletin Finance, Banks, Investments*. 2015. № 4 (33). (in Russ.)

14. Kachalov V.A. Chto zhe eto takoe «outsourcing»? [What is «outsourcing»?]. *Zhurnal «Metodi menedzhmenta kachestva»*, 2008, № 4-5 [The journal «Methods of quality Management»], 2008, No. 4-5 (in Russ.)

15. Ermilina D.A. Business process modeling as a factor in improving the efficiency of an organization. *Economic Systems*. 2025; 18(1):107-114. (in Russ.) DOI: 10.29030/2309-2076-2025-18-1-107-114

16. Samigullina A.F., Smirnova A.I. Analiz Rossiiskogo rinka avtomatizirovannikh informatsionnikh sistem v oblasti strakhovoi deyatel'nosti [analysis of the Russian market of automated information systems in the field of insurance activities]. *Materiali VII Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii «Studentcheskii nauchnii forum»* [Proceedings of the VII International Student Scientific Conference «Student Scientific Forum»] Available at: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015009941>><https://scienceforum.ru/2015/article/2015009941> (Accessed 10 august 2025) (in Russ.)

17. Hosein P.A. [Data-Driven Pricing Strategy for Automobile Insurance Policies] 2022 5th Asia Conference on Machine Learning and Computing (ACMLC). DOI: 10.1109/ACMLC58173.2022.00009
18. Xie Sh. [Analyzing the Influence of Telematics-Based Pricing Strategies on Traditional Rating Factors in Auto Insurance Rate Regulation] Mathematics, 10.3390/math12193150, 12, 19, (3150). (2024) DOI: 10.3390/math12193150
19. Henckaerts R., Antonio K. [The added value of dynamically updating motor insurance prices with telematics collected driving behavior data] Insurance: Mathematics and Economics, 105, (79-95), (2022) DOI:10.1016/j.insmatheco.2022.03.011
20. Masello L., Sheehan B., Castignani G., Guillen M., Murphy F. [Predictive Modeling for Driver Insurance Premium Calculation Using Advanced Driver Assistance Systems and Contextual Information] IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 26, 2, (2202-2211), (2025) DOI: 10.1109/TITS.2024.3518572
21. Kushelev I.Yu. [Implementation of innovative information technologies in the insurance market in Russia: telematics in car insurance] Entrepreneur's Guide. 2023. Vol. 16. No. 2. (In Russ.) DOI: 10.24182/2073-9885-2023-16-2-110-119
22. Lang F., Riegel L. [Acceptance of online customer channels for damage claims in Germany] Information Technology and Management. 10.1007/s10799-023-00404-z26:1(101-116) Online publication date: 1-Mar-2025. DOI: 10.1007/s10799-023-00404-z
23. McDonnell K., Murphy F., Sheehan B., Masello L., Castignani G. [Deep learning in insurance] Expert Systems with Applications: An International Journal. 10.1016/j.eswa.2023.119543217:C. Online publication date: 1-May-2023. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119543
24. Li H., Luo X., Zhang Z., Jiang W., Huang S. [Driving risk prevention in usage-based insurance services based on interpretable machine learning and telematics data] Decision Support Systems. 10.1016/j.dss.2023.113985172:C. Online publication date: 1-Sep-2023 - DOI: 10.1016/j.dss.2023.113985.
25. Brühwiler L., Fu Ch., Huang H., Longhi L., Weibel R. [Predicting individuals' car accident risk by trajectory, driving events, and geographical context] Computers, Environment and Urban Systems. Volume 93, April 2022 –DOI:10.1016/j.compenvurb-sys.2022.101760
26. Cunha L., Bravo J. M. [Automobile Usage-Based-Insurance: Improving Risk Management using Telematics Data] 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 10.23919/CISTI54924.2022.9820146, (1-6), (2022) DOI: 10.23919/CISTI54924.2022.9820146.
27. Ortega M., Quintanilla J., Ong E.R., Ramos M.R., Trinidad C.J. [Asfalís: A Web-based System for Customer Retention Strategies Optimization of a Car Insurance Company Using Cohort and Churn Analysis] 2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). DOI: 10.1109/ICICT57646.2023.10134149
28. Manko B.A. [Erie Insurance: Monitoring technology in the car insurance market and the issue of data privacy] Journal of Information Technology Teaching Cases, 10.1177/20438869221117571, 13, 2, (193-198), (2022) DOI:10.1177/20438869221117571
29. Agureev I.E., Buraga S.A. Methods of the theory of transport macrosystems for mass service dynamics and auto insurance. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2025;22(5):760-771. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-5-760-771. EDN: PBYTVD

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Агуреев И.Е. *Формулировка задач исследования, научные положения.*

Бурага С.А. *Анализ процессов функционирования системы, разработка предложений по оптимизации функционирования системы.*

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Agureev I.E. *Formulating research objectives, setting out scientific provisions.*

Buraga S.A. *Analysis of the system operation processes, development of solutions for the system functioning optimization.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агуреев Игорь Евгеньевич – д-р техн. наук, доц., директор научно-образовательного центра Тульского государственного университета (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>,

SPIN-код: 1910-6751,

e-mail: agureev-igor@yandex.ru

Бурага Сергей Александрович – аспирант Тульского государственного университета (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9889-7578>,

e-mail: buraga.sergey@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Agureev Igor E. – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center, Tula State University (92, Lenin Prospect, Tula, 300012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>,

SPIN-code: 1910-6751,

e-mail: agureev-igor@yandex.ru

Buraga Sergey A. – postgraduate student, Tula State University (92, Lenin Prospect, Tula, 300012).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9889-7578>,

e-mail: buraga.sergey@yandex.ru

Научная статья
УДК 656.07
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-224-239>
EDN: GFWNRM



АНАЛИЗ ПОТЕРЬ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ МЕХАНИКАМИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

М.В. Банкет, Р.Е. Шипицына, И.А. Эйхлер ✉, **И.В. Погуляева**
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
✉ ответственный автор
vaniaeichler@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматриваются актуальные вопросы повышения эффективности функционирования автосервисных предприятий в современных условиях. Приведен статистический анализ факторов, влияющих на организацию технического обслуживания автомобилей с выполнением дополнительных работ. Целью исследования является установление зависимости времени ожидания механиками или диагностами запасных частей для выполнения дополнительных работ при техническом обслуживании автомобилей в технической службе дилерского центра от общего количества машинозаездов, количества машинозаездов на проведение технического обслуживания и количества машинозаездов на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы.

Материалы и методы. В работе использованы результаты замеров потерь времени в процессе работы технической службы действующего дилерского предприятия при выполнении технического обслуживания. Исследования проведены с использованием методов описательной статистики, корреляционного анализа и линейной регрессии.

Результаты. В результате исследования получены количественные характеристики работы технической службы дилерского центра. Установлена статистически значимая связь между загрузкой сервисной зоны и потерями времени. Наиболее сильная и статистически значимая зависимость установлена между количеством ТО, сопровождающихся дополнительными работами, и потерями времени механиками при ожидании запасных частей. Уточнена функциональная зависимость времени ожидания запасных частей.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации планирования работы и повышения эффективности производственных процессов на предприятиях автосервиса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автосервисное предприятие, сервисное обслуживание, техническое обслуживание, автомобильный сервис, техническая служба, статистический анализ, потери времени механиком, дополнительные работы

Статья поступила в редакцию 25.12.2025; одобрена после рецензирования 03.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Банкет М.В., Шипицына Р.Е., Эйхлер И.А., Погуляева И.В. Анализ потерь рабочего времени механиками при выполнении технического обслуживания автомобилей // *Вестник СибАДИ*. 2026. Т. 23, № 2. С. 224-239. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-224-239>

© Банкет М.В., Шипицына Р.Е., Эйхлер И.А., Погуляева И.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-224-239>
EDN: GFWNRM

ANALYSIS OF THE WORKING TIME LOSS BY MECHANICS PERFORMING CAR MAINTENANCE

Mikhail V. Banket, Roksana Ye. Shipitsyna, Ivan A. Eychler ✉, **Irina V. Pogulyaeva**
The Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russia
✉ corresponding author
vaniaeichler@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. The article examines current issues of improving the efficiency of automobile service stations in modern conditions. The article provides a statistical analysis of the factors influencing the organization of car maintenance with additional work. The purpose of the study is to establish the dependence of the mechanics or diagnosticians' waiting time for spare parts to perform additional work during car maintenance at the dealership technical service center on the total number of vehicle visits, the number of vehicle visits for maintenance, and the number of vehicle visits for maintenance when additional work has been carried out.

Materials and Methods. The results of time-loss measurements taken during maintenance work at an existing dealership technical service center have been used in the study. The research has been conducted with the application of descriptive statistics, correlation analysis, and linear regression methods.

Results. The study results demonstrate quantitative characteristics of dealership technical service center operations. A statistically significant relationship was established between the facility's workload and time losses. The strongest and most statistically significant relationship was established between the number of maintenance visits required additional work and mechanics' time lost waiting for spare parts. The functional relationship between waiting time for spare parts and the number of maintenance visits was clarified.

Discussion and conclusion. The obtained results can be used to optimize work planning and improve the efficiency of operation processes at technical service centers.

KEYWORDS: automobile service center, technical service, maintenance, automobile service, technical support, statistical analysis, time loss by mechanic, additional works

The article was submitted: December 25, 2025; approved after reviewing: February 03, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Banket M.V., Shipitsyna R.Ye., Eychler I.A., Pogulyaeva I.V. Analysis of the loss of working time by mechanics during car maintenance. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2026; 23 (2): 224-239. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-224-239>

© Banket Mikhail V., Shipitsyna Roksana Ye., Eychler Ivan A., Pogulyaeva Irina V., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики эффективность функционирования автосервисных предприятий в значительной степени определяется уровнем использования их производственной мощности.

Одним из важных конкурентных преимуществ дилерских центров, осуществляющих продажу новых автомобилей, является организация их послепродажного обслуживания. Качественная организация данного процесса на предприятии позволяет не только получить дополнительный доход, но и повысить лояльность клиентов к конкретной марке автомобиля, что в свою очередь увеличивает вероятность приобретения новых автомобилей данной марки в конкретном дилерском центре.

Сфера автомобильного сервиса характеризуется высокой степенью конкуренции, вероятностным и неравномерным характером потоков заявок на техническое обслуживание (ТО) и ремонт (Р) автомобилей, а также существенной вариацией продолжительности выполнения работ. Указанные особенности приводят к нестабильной загрузке технических служб, образованию очередей, росту времени ожидания клиентов и, как следствие, к потере части потенциального дохода предприятий.

Традиционные методы анализа, основанные на длительных натурных наблюдениях и статистической обработке данных, отличаются высокой трудоемкостью и не всегда обеспечивают получение репрезентативной информации во всем диапазоне возможных режимов работы предприятий. В связи с этим актуальной является задача применения математических методов, в частности аппарата теории массового обслуживания и статистического анализа, позволяющих формализовать процессы функционирования автосервисных предприятий и получить количественные оценки уровня загрузки мощности при различных исходных условиях.

Вопросы эффективности функционирования автосервисных предприятий формировались на стыке теории массового обслуживания, организации производства, экономики транспорта и технической эксплуатации автомобилей¹. К фундаментальным работам от-

носятся исследования в области прикладных задач теории массового обслуживания, широко применяемых при анализе сервисных и транспортных предприятий². В исследованиях³ представлены фундаментальные основы организации и эффективности автосервисных предприятий.

Дальнейшее развитие вопросов эффективности автосервисных предприятий происходило в области оптимизации мощности и управления производственными процессами автосервиса, что является актуальной задачей и на сегодняшний день в условиях постоянно возрастающей конкурентной среды на рынке данного вида услуг. В исследованиях [1, 2, 3, 4, 5, 6] представлены методики оценки и оптимизации загрузки мощности автосервисных предприятий с учетом неравномерности потоков заявок, форм организации труда и экономических критериев эффективности.

В исследованиях [1, 2, 3, 4] рассматриваются вопросы моделирования процессов управления производственной мощностью технических служб автосервисных предприятий, функционирующих в условиях свободной конкуренции и стохастического характера потоков заявок на обслуживание. С использованием аппарата теории массового обслуживания установлены количественные зависимости между средней длиной очереди автомобилей, уровнем загрузки производственных постов и вероятностью отказа в обслуживании (ухода клиентов). В указанных исследованиях проанализировано также влияние различных форм организации труда исполнителей (индивидуальной и бригадной с взаимопомощью) на эффективность использования мощности предприятия. На основе критерия минимизации совокупных издержек, включающих потери от ухода клиентов и затраты на содержание резервной мощности, определены оптимальные уровни загрузки технических служб. Результаты моделирования представлены в виде номограмм, позволяющих прогнозировать показатели работы автосервисных предприятий и обосновывать управленческие решения в сфере оперативного и стратегического управления производственной мощностью.

¹ Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Советское радио, 1971. 519 с.

² Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание: теория и приложения / пер. с франц. М.: МИР, 1977. 432 с.

³ Кузнецов А.С., Белов Н.В. Малое предприятие автосервиса: организация, оснащение, эксплуатация. М.: Машиностроение, 1995. 146 с.

В работах [5, 6, 7] исследуются закономерности формирования потоков заявок на техническое обслуживание и ремонт автомобилей в системе специализированных автосервисных предприятий с целью обеспечения рациональной загрузки их производственной мощности. Авторы анализируют влияние неравномерности и нестационарности спроса, вариации продолжительности обслуживания и конкурентной среды на эффективность функционирования технических служб автосервиса.

На основе результатов натурных наблюдений и статистических данных показано, что потоки заявок обладают вероятностным характером и выраженной суточной, недельной и сезонной неравномерностью. При этом обоснована возможность применения аппарата теории массового обслуживания для описания работы автосервисных предприятий, несмотря на формальное отклонение входящих потоков, и времени обслуживания от классических простейших распределений. Установлено, что решающим фактором точности расчетов является коэффициент вариации, а не конкретный вид закона распределения.

В работе [5] выявлены средние уровни загрузки мощности по различным видам специализации автосервисных предприятий, определены характерные значения длины очередей автомобилей и показано их значение для проектирования зон ожидания и выбора профиля специализации. Сделан вывод о том, что использование математических моделей теории массового обслуживания позволяет существенно сократить объем натурных наблюдений и получить обоснованные оценки загрузки мощности, необходимых как при проектировании новых, так и при реконструкции действующих предприятий автосервиса.

В работах [8, 9, 10, 11] создана и исследована модель системы контроля производственных процессов на предприятиях технического сервиса автомобилей, основанная на представлении предприятия как сложной организационно-кибернетической системы. Основное внимание уделено формализации параметров контроля – количеству точек контроля, величине и задержке управляющих воздействий – и их влиянию на показатели эффективности функционирования зоны ТО и Р. В исследованиях [8, 9, 10, 11] использование имитационного моделирования и методов корреляционно-регрессионного анализа установлены количественные закономерности влияния интенсивности поступления автомобилей и параметров системы контроля

на относительную пропускную способность и среднее время обслуживания. В работе [10] показано, что увеличение частоты и своевременности контроля повышает эффективность производственного процесса, однако имеет экономически целесообразные пределы. Полученные модели позволяют обосновывать оптимальные параметры системы контроля в зависимости от производственной программы предприятия и могут быть использованы при оперативном управлении технологическими процессами автосервиса.

Исследования [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19] посвящены вопросам разработки методики реализации систем поддержки принятия решений, в частности, в работе [12] приведен пример управления станцией технического обслуживания автомобилей. На основе текущих технических и финансовых показателей методика позволяет пользователю системы оценить потенциальные параметры предприятия при изменении одного или нескольких целевых показателей. В результате применения методики поддержки принятия управленческих решений возможно достижение установленной пользователем цели, связанной с достижением экономической выгоды или снижением издержек на функционирование предприятия [12].

Проведя анализ научных исследований по совершенствованию рабочих процессов при проведении ТО на станциях технического обслуживания автомобилей и дилерских центров установлено, что авторы рассматривали потери времени при ожидании механиками/диагностами запасных частей косвенно, решая другие задачи.

Многообразие исследований в области обеспечения эффективности функционирования автосервисных предприятий подтверждает актуальность данной проблематики и необходимость анализа ключевых показателей работы автосервиса с целью выявления закономерностей, определения наиболее значимых факторов и проработке рекомендаций по возможности повышения эффективности работы.

Гипотеза исследований – время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО, зависит от общего количества машинозаявок, количества машинозаявок на проведение технического обслуживания и количества машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс организации послепродажного обслуживания автомобилей на дилерском предприятии регламентирован нормативно-правовыми актами и внутренними стандартами дистрибьютора (для конкретной марки автомобиля). Процесс включает в себя следующие ключевые стадии:

1. Отслеживание и напоминание клиенту о приближении даты ТО или запись на ТО по запросу клиента.
2. Напоминание клиенту о записи на ТО за день до визита.
3. Прием автомобиля клиента для проведения ТО.
4. Проведение ТО.
5. Согласование и проведение дополнительных работ, выявленных при ТО (в случае необходимости).
6. Выдача автомобиля клиенту.
7. Сбор обратной связи от клиента о проведенном ТО.

Представленный процесс составлен для технической службы дилерского предприятия при проведении ТО.

Рассматривая данный процесс, отмечаем, что при планировании работы технической службы дилерского предприятия необходимо учитывать не только специфику работы ди-

лерского центра, но и особенности самого потребителя сервисной услуги. Существует вероятность срыва записи на ТО, опоздание на назначенное время, уход потребителя к другим поставщикам услуг. Для повышения вероятности обращения потребителя в дилерский центр необходимо особое внимание уделять качеству предоставляемой услуги, точности оценки временных затрат клиента на ожидание автомобиля и стоимости самой услуги. Отмечаем, что затраты времени при выполнении работ механиком по ТО можно описать следующей функцией:

$$T_{ТО} = f(t_{раб}; t_{пр}), \tag{1}$$

где $T_{ТО}$ – общее время на проведение ТО, ч; $t_{раб}$ – время выполнения работ согласно регламенту ТО, технологических инструкций и технологических карт процесса ТО, ч; $t_{пр}$ – время простоя (время отсутствия должностных лиц на рабочем месте или невыполнение работы по различным причинам), ч.

Процесс работы технической службы дилерского предприятия при выполнении ТО представлен на рисунке 1.

Рассматривая процесс работы технической службы дилерского предприятия при выполнении ТО, время простоя можно представить в виде формулы (2).

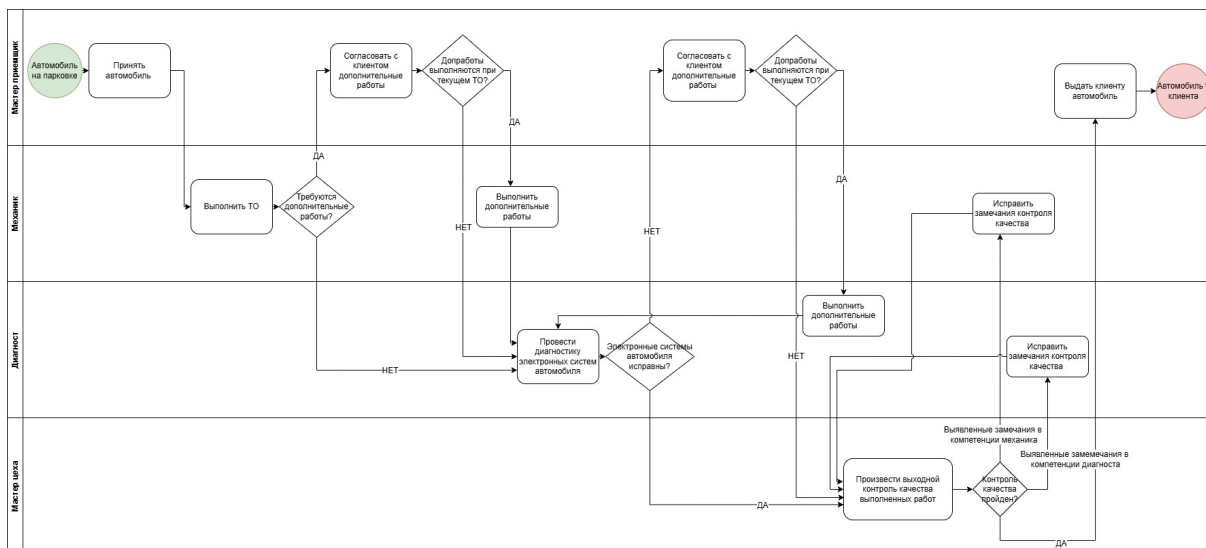


Рисунок 1 – Процесс работы технической службы дилерского предприятия при выполнении ТО
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The dealership technical service process during maintenance
Source: compiled by the authors.

$$t_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n t_i^{\text{МП}} + \sum_{i=1}^n t_i^{\text{М}} + \sum_{i=1}^n t_i^{\text{Мех}} + \sum_{i=1}^n t_i^{\text{Д}} + \sum_{i=1}^n t_i^{\text{МЦ}}, \quad (2)$$

где $t_i^{\text{МП}}$ – i -е виды потерь мастера-приемщика, возникающие в процессе выполнения ТО, ч; $t_i^{\text{М}}$ – i -е виды потерь мойщика, возникающие в процессе выполнения ТО, ч; $t_i^{\text{Мех}}$ – i -е виды потерь механика, возникающие в процессе выполнения ТО, ч; $t_i^{\text{Д}}$ – i -е виды потерь диагноста, возникающие в процессе выполнения ТО, ч.; $t_i^{\text{МЦ}}$ – i -е виды потерь мастера цеха, возникающие в процессе выполнения ТО, ч.

В настоящем исследовании рассматривались потери времени механика и диагноста при выполнении ТО. По мнению авторов, наибольшее количество времени для данной группы работников уходит на следующие процессы:

1. Согласование с клиентом нового перечня работ, их стоимости и времени выполнения.
2. Создание заявки на получение запасных частей на складе для проведения дополнительных работ.
3. Ожидание получения запасных частей механиком или диагностом.
4. Отсутствие механика или диагноста на рабочем месте по объективным или субъективным причинам.

Перечисленные выше потери времени носят либо постоянный (создание заявки на получение запасных частей на складе для проведения дополнительных работ; ожидание получения запасных частей механиком или диагностом), либо случайный (согласование с клиентом нового перечня работ, их стоимости и времени выполнения; отсутствие механика или диагноста на рабочем месте по объективным или субъективным причинам) характер.

Отмечаем, что ключевой задачей при оптимизации процесса является минимизация постоянных потерь. При этом дать действенные инструменты минимизации потерь можно только при условии, что они зависят от организации работы на предприятии, поэтому объектом изучения настоящих исследований являются потери времени, возникающие в ходе выполнения дополнительных работ с автомобилем при взаимодействии механика/диагноста со складом при получении новых запасных частей.

С точки зрения авторов, время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО, можно представить функцией

$$t_{\text{ож}}^{3ч} = f(N_{\text{мз}}; N_{\text{мз}}^{\text{ТО}}; N_{\text{др}}^{\text{ТО}}), \quad (3)$$

где $t_{\text{ож}}^{3ч}$ – время ожидания механиками/диагностами запасных частей для выполнения дополнительных работ за смену, мин; $N_{\text{мз}}$ – количество машинозаявок в день (общее), ед.; $N_{\text{мз}}^{\text{ТО}}$ – количество машинозаявок в день на выполнение ТО, ед.; $N_{\text{др}}^{\text{ТО}}$ – количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы, ед.

В настоящих научных исследованиях авторы проверяют выдвинутую гипотезу.

Для изучения объекта исследований был проанализирован процесс взаимодействия работников склада с механиками/диагностами. Количество машинозаявок было определено по заказ-нарядам на каждый день. Методом хронометрирования произведены замеры времени ожидания механиками/диагностами запасных частей для выполнения дополнительных работ при ТО. Для этого на каждый пост ремонтно-механической мастерской технической службы дилерского предприятия были установлены штамп-часы.

В настоящих исследованиях время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО, определялось следующим образом. Начало измерения осуществлялось с момента ухода механика/диагноста с поста ТО на склад для получения запасных частей для выполнения дополнительных работ. Измерение прекращалось в момент возобновления работ по ТО и/или согласованным дополнительным работам.

В процессах определения наличия запасных частей на складе, загрузки сервисной зоны и согласования дополнительных работ с клиентом, механики/диагносты не участвуют. Поэтому во время данных процессов механики/диагносты продолжают выполнение работ по ТО.

Результаты натурных наблюдений представлены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты натурных наблюдений
 Источник: составлено авторами.

Table 1
Results of the field observations
 Source: compiled by the authors.

Дата	Количество машинозеездов в день (общее), ед.	Количество машинозеездов в день на выполнение технического обслуживания, ед.	Количество машинозеездов на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы, ед.	Время ожидания механиками/диагнoстами запасных частей для выполнения дополнительных работ за смену, мин
01.03.2025	43	21	17	204
02.03.2025	22	11	4	24
03.03.2025	26	20	8	64
04.03.2025	31	15	0	0
05.03.2025	30	21	0	0
06.03.2025	30	15	10	80
07.03.2025	33	24	20	300
08.03.2025	41	22	17	153
09.03.2025	24	14	9	126
10.03.2025	20	9	3	30
11.03.2025	37	21	3	24
12.03.2025	33	20	7	49
13.03.2025	33	23	16	176
14.03.2025	35	20	9	54
15.03.2025	46	29	1	3
16.03.2025	29	15	7	21
17.03.2025	20	12	9	54
18.03.2025	32	21	17	119
19.03.2025	37	26	13	182
20.03.2025	38	21	14	42
21.03.2025	36	27	5	25
22.03.2025	49	29	11	132
23.03.2025	20	10	2	22
24.03.2025	21	14	0	0
25.03.2025	36	28	5	60
26.03.2025	36	16	10	90
27.03.2025	34	24	8	96
28.03.2025	42	31	5	50
29.03.2025	48	21	18	216
30.03.2025	20	12	5	75

Исследование влияния выделенных факторов производилось на примере дилерского центра, обладающего следующими характеристиками, которые оставались неизменными на всем протяжении исследования:

1. Количество постов ТО и Р – 10 ед.
2. Количество постов диагностики – 2 ед.
3. Количество диагностов – 2 чел.
4. Количество механиков – 10 чел.
5. Количество складских рабочих – 2 чел.
6. Время проведение исследования – 01.03.2025 – 30.03.2025 (30 дней).

Отмечаем, что исследование потерь времени и выполнение мероприятий по их минимизации позволят предприятиям точнее планировать загрузку ремонтно-механической мастерской технической службы дилерского центра, что, в свою очередь, повышает лояльность клиентов к конкретному дилерскому предприятию, а предприятию позволит повысить доход и конкурентоспособность.

Статистический анализ проводился с использованием программы StatTech. 4.10.3 (разработчик – ООО «Статтех», Россия).

Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро-Уилка.

Количественные показатели, выборочное распределение которых соответствовало нормальному, описывались с помощью средних арифметических величин (M) и стандартных отклонений (SD). В качестве меры репрезентативности для средних значений указывались границы 95% доверительного интервала (95% ДИ).

В случае отсутствия нормального распределения количественные данные описывались с помощью медианы (Me) и нижнего и верхнего квартилей ($Q_1 - Q_3$).

Направление и теснота корреляционной связи между двумя количественными показателями оценивались с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена (ρ) (при распределении показателей, отличном от нормального).

Прогностическая модель, характеризующая зависимость количественной переменной от факторов, разрабатывалась с помощью метода линейной регрессии.

Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$. Описательная статистика количественных переменных представлена в таблице 2.

Таблица 2

Описательная статистика количественных переменных

Источник: составлено авторами.

Table 2

Descriptive statistics of quantitative variables

Source: compiled by the authors.

Показатели	$M \pm SD / Me$	95% ДИ / $Q_1 - Q_3$	min	max
Количество машинозаездов в день (общее), $M \pm SD$, ед.	32,73 \pm 8,49	29,56–35,90	20,00	49,00
Количество машинозаездов на проведение технического обслуживания в день, $M \pm SD$, ед.	20 \pm 6	17–22	9	31
Количество машинозаездов на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы в день, $M \pm SD$, ед.	8,43 \pm 5,89	6,23–10,63	0,00	20,00
Время ожидания механиками/ диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО, Me , мин	57,00	24,25–124,25	0,00	300,00

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа взаимосвязи факторов «Количество машинозаяздов в день (общее)» и «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО»
Источник: составлено авторами.

Table 3

Results of the correlation analysis of the relationship between the factors «The total number of vehicle visits per day» and «Mechanics or diagnosticians' waiting time for spare parts to perform additional work during car maintenance»
Source: compiled by the authors.

Показатель	Характеристика корреляционной связи		
	ρ	теснота связи по шкале Чеддока	ρ
Количество машинозаяздов в день (общее) – время ожидания механиками/ диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО	0,362	умеренная	0,050*

* – различия показателей статистически значимы (ρ < 0,05).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Был проведен корреляционный анализ взаимосвязи количества машинозаяздов в день (общее) и времени ожидания механиками/ диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО (таблица 3).

При оценке связи «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» и «Количество машинозаяздов в день (общее)» была установлена умеренной тесноты прямая связь.

Наблюдаемая зависимость «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» от «Количество машинозаяздов в день (общее)» описывается уравнением парной линейной регрессии

$$t_{ож}^{3ч} = 3,291 \cdot N_{мз} - 25,368. \quad (4)$$

При увеличении количества машинозаяздов в день (общее) на 1 ед. следует ожидать увеличение времени ожидания механиками/ диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО на 3,291 мин. Полученная модель объясняет 13,9% наблюдаемой дисперсии времени ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО. Графически полученная авторами зависимость представлена на рис.2.

Количество машинозаяздов в день включает в себя количество машинозаяздов на

проведение технического обслуживания и текущего ремонта. В силу чего может не наблюдаться прямая взаимосвязь между факторами «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» и «Количество машинозаяздов в день», поскольку количество машинозаяздов на ТО и текущий ремонт всегда варьируется и зависит от большого количества факторов. Поэтому данный фактор из гипотезы исследований и формулы (3) можно исключить.

Далее был выполнен корреляционный анализ взаимосвязи «Количество машинозаяздов на проведение технического обслуживания» и «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО». Результаты анализа представлены в таблице 4.

При оценке связи «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» и «Количество машинозаяздов на проведение технического обслуживания» была установлена умеренной тесноты прямая связь.

Наблюдаемая зависимость «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» от «Количество машинозаяздов на проведение технического обслуживания» описывается уравнением парной линейной регрессии:

$$t_{ож}^{3ч} = 3,515 \cdot N_{др}^{ТО} + 12,999. \quad (5)$$

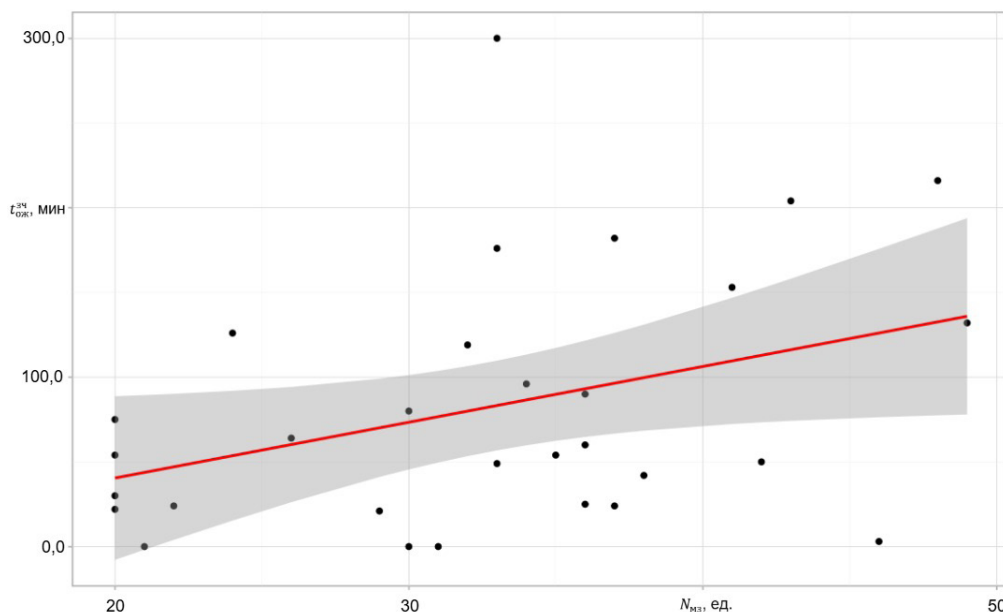


Рисунок 2 – График регрессионной функции, характеризующий зависимость «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» от «Количество машинозавездов в день (общее)»
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – A graph of the regression function characterizing the dependence of «Mechanics or diagnosticians' waiting time for spare parts to perform additional work during car maintenance» on «The total number of vehicle visits per day»
 Source: compiled by the authors.

Таблица 4
Результаты корреляционного анализа взаимосвязи «Количество машинозавездов на проведение технического обслуживания» и «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО»
 Источник: составлено авторами.

Table 4
Results of the correlation analysis of the relationship between «Number of vehicle visits for maintenance» and «Mechanics or diagnosticians' waiting time for spare parts to perform additional work during car maintenance»
 Source: compiled by the authors.

Показатель	Характеристика корреляционной связи		
	ρ	теснота связи по шкале Чеддока	ρ
Количество машинозавездов на проведение технического обслуживания – время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО	0,327	умеренная	0,078*

* – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

При увеличении «Количество машинозавездов на проведение технического обслуживания» на 1 следует ожидать увеличение «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» на 3,515 мин.

Полученная модель объясняет 8,1% наблюдаемой дисперсии «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО». Графически полученная авторами зависимость представлена на рис.3.

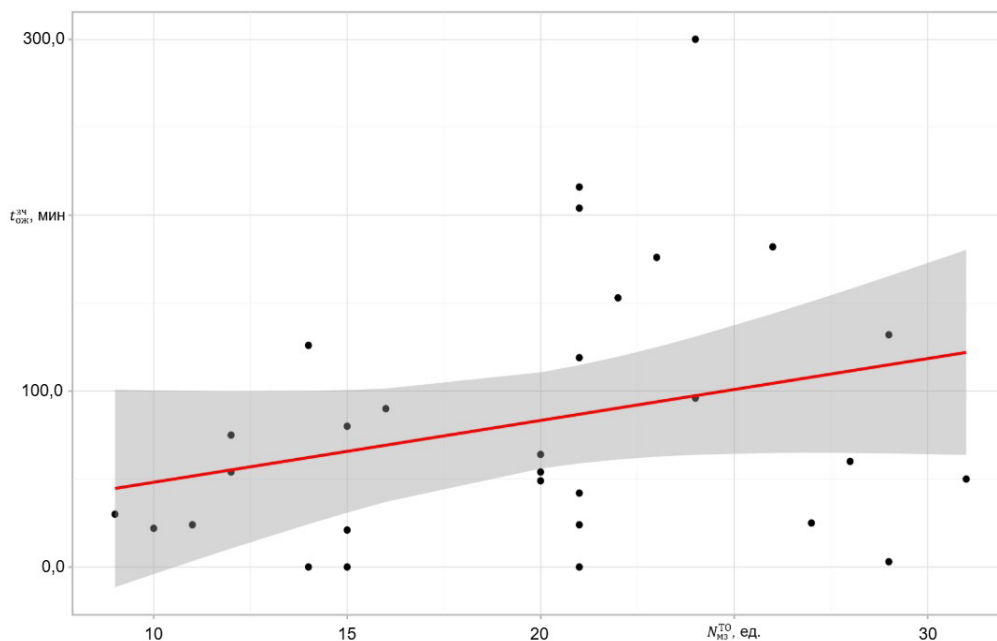


Рисунок 3 – График регрессионной функции, характеризующий зависимость «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» от «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания»
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Regression function graph characterizing the relationship between «Mechanics or diagnosticians' waiting time for spare parts to perform additional work during car maintenance» and «Number of vehicle visits for maintenance»
 Source: compiled by the authors.

Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания включает в себя количество машинозаявок на проведение технического обслуживания с проведением дополнительных работ и без проведения таких работ. При проведении ТО не всегда выявляется неисправность, требующая проведения дополнительных работ, а в случае если эти неисправности выявлены, то не всегда есть возможность их устранения в рамках ТО. Это может быть связано с загрузкой ремонтно-механической мастерской технической службы предприятия, с отсутствием запасных частей или отказом клиента от выполнения дополнительных работ. С учетом вышесказанного прямая связь отсутствует, и данный фактор исключается из гипотезы исследований и формулы (3).

Далее был выполнен корреляционный анализ взаимосвязи «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы в день» и «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО». Результаты анализа представлены в таблице 5.

При оценке связи «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» и «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы в день» была установлена высокой тесноты прямая связь.

Зависимость «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» от «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы в день» описывается уравнением парной линейной регрессии:

$$t_{ож}^{ЗЧ} = 11,212 \times N_{ав}^{ТО} - 12,185. \quad (6)$$

При увеличении «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы» на 1 следует ожидать увеличение «Время ожидания механиками/ диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» на 11,212 мин.

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа взаимосвязи «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы в день» и «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО»

Источник: составлено авторами.

Table 5

Correlation analysis results of the relationship between «Number of vehicle visits for maintenance with additional work performed per day» and «Mechanics or diagnosticians' waiting time for spare parts required to carry out additional work during car maintenance»

Source: compiled by the authors.

Показатель	Характеристика корреляционной связи		
	ρ	теснота связи по шкале Чеддока	p
Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы в день – время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО	0,891	высокая	< 0,001*

* – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

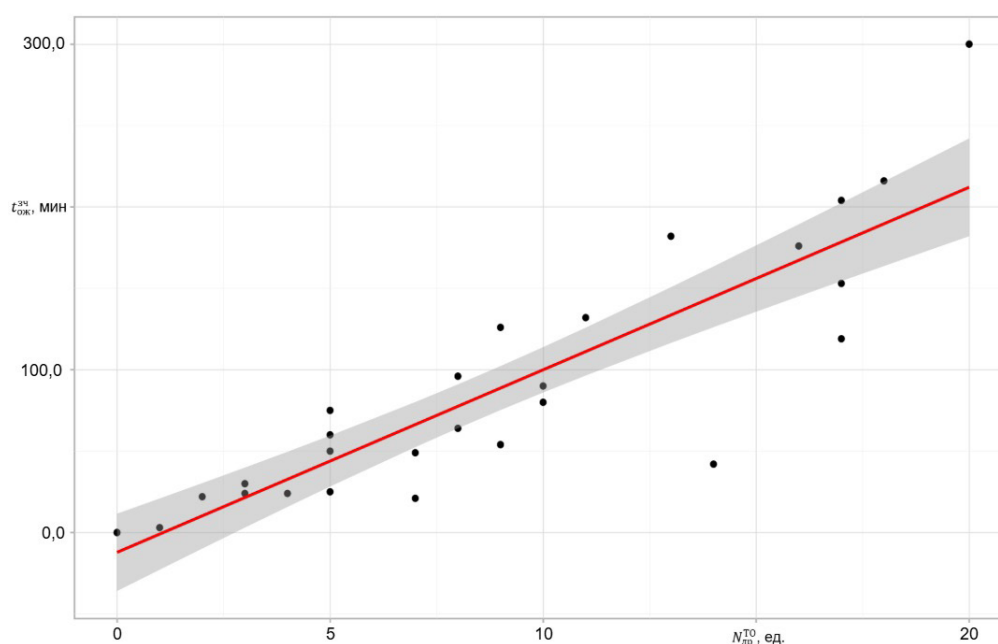


Рисунок 4 – График регрессионной функции, характеризующий зависимость «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» от «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы в день»

Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Regression function graph characterizing the relationship between «Mechanics or diagnosticians' waiting time for spare parts required to perform additional maintenance work» and «Number of vehicle visits for maintenance with additional work executed per day»

Source: compiled by the authors.

Полученная модель объясняет 77,8% наблюдаемой дисперсии «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО».

Графически полученная авторами зависимость представлена на рис.4.

Установленная теснота связи между факторами «Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО» и «Количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы» говорит о возможности использования формулы (6) для расчетов времени ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО, однако установленные расчетные коэффициенты будут характерны только для предприятий со схожими характеристиками работы технической службы. При этом ключевым условием применимости полученных значений является соответствие технологического процесса работы технической службы дилерского предприятия при выполнении ТО. Данный процесс характерен для большинства сервисных программ заводов-изготовителей различных марок автомобилей. В случае изменения технологического процесса и/или характеристик технической службы дилерского предприятия могут быть получены другие значения коэффициентов формулы (6) при сохранении той же тесноты связи.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования влияния количества машинозаявок, количества машинозаявок на проведение технического обслуживания и количества машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы на время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО за смену установлено, что наибольшее влияние оказывает количество машинозаявок на проведение технического обслуживания, на которых проводились дополнительные работы. Это позволяет трансформировать функцию, приведенную в формуле (3), в функцию формулы (7), с учетом дополнительных параметров, установленных в процессе исследований.

Время ожидания механиками/диагностами запасных частей, требуемых для выполнения дополнительных работ при ТО, является функцией

$$t_{ож}^{зч} = 11,212 \times N_{др}^{ТО} - 12,185. \quad (7)$$

где $t_{скл}$ – время выполнения складских операций по комплектованию заказа и оформлению документации на одну согласованную до-

полнительную работу, мин; $N_{скл}$ – количество складских рабочих, чел.; $N_{кз}$ – количество переданных на склад заявок в единицу времени, ед./ч.

Необходимо отметить, что такие параметры, как время выполнения складских операций по комплектованию заказа и оформлению документации на одну согласованную дополнительную работу; количество складских рабочих; количество переданных на склад заявок в единицу времени оказывали влияние на время ожидания механиком/диагностом запасных частей для выполнения дополнительных работ, но не фиксировались при натурных наблюдениях. В дальнейших исследованиях планируется произвести оценку влияния выявленных параметров на результирующий показатель.

Авторами исследован процесс работы технической службы дилерского предприятия при выполнении ТО. Представлены и описаны функции общего времени проведения ТО, а также времени ожидания механиками и диагностами запасных частей для выполнения дополнительных работ при ТО.

В ходе исследований выявлен ряд зависимостей, которые позволяют сделать вывод, что основным источником потерь рабочего времени механиками и диагностами при ожидании запасных частей в случае выполнения дополнительных работ при ТО является количество ТО в день, на которых проводились дополнительные работы, а не общий поток машинозаявок или общее количество ТО.

Складская логистика и процессы взаимодействия технической службы со складом оказывают решающее влияние на эффективность работы технической службы дилерского центра, особенно в условиях выполнения дополнительных работ при ТО. Рост числа ТО с дополнительными работами без соответствующей адаптации складских процессов приводит к непропорциональному увеличению простоев механиков и диагностов, что в итоге приводит к снижению фактической пропускной способности технической службы дилерского центра.

Применение методов корреляционно-регрессионного анализа доказало свою практическую применимость для выявления проблемных мест в производственных процессах технической службы дилерского предприятия и может быть использовано в системе оперативного управления.

Результаты исследования могут быть использованы для более точного планирования

загрузки постов ТО; для обоснования численности складского персонала; при разработке мероприятий по снижению потерь времени и повышению лояльности клиентов дилерского центра. Перспективы дальнейших исследований связаны с количественной оценкой влияния параметров складских операций (время комплектования, интенсивность заявок, численность персонала) и интеграцией полученных моделей в системы поддержки принятия управленческих решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белов С.А., Тахтамышев Х.М., Гукетлев Ю.Х. Моделирование процессов управления мощностью технических служб автосервисных предприятий // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 5. EDN: SSADIX.
2. Тахтамышев Х.М., Гукетлев Э.Ю., Белов С.А. Моделирование процессов управления мощностью технических служб малых автосервисных предприятий в условиях вероятностного спроса // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 2. EDN: KRNUTB.
3. Тахтамышев Х.М., Тахтамышева З.Ш., Гукетлев Э.Ю. Оптимизация периодичности технического обслуживания автомобилей с помощью статистического моделирования // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 6. EDN: CHEVOI.
4. Тахтамышев Х.М., Гукетлев Э.Ю. Алгоритмы и блок-схемы расчетов необходимого запаса элементов для заданного уровня обеспеченности запчастями парков автомобилей автотранспортных предприятий // Научный вестник Государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт». 2025. № 2. С. 24–29. EDN: APNUZR.
5. Тахтамышев Х.М., Гукетлев Ю.Х. Закономерности формирования потоков заявок для обеспечения загрузки мощности специализированных предприятий сети автосервиса // Научный вестник Государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт». 2023. № 1. С. 5–13. EDN: UNCRGN.
6. Гришин А.С., Сарбаев В.И., Джованис С. Выбор рационального количества альтернатив запасных частей для автосервиса с использованием методов нечетких множеств // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 4. 3(87). С. 55–61. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-3(87)-55-61. EDN: WFZLEA.
7. Гришин А.С., Сарбаев В.И., Джованис С. Имитационная модель производственного процесса дилерского автотехцентра // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 3-2(90). С. 135–143. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-135-143. EDN: QVPIGY.
8. Панюков Д.И., Никишов О.В. Модель системы оценки качества процесса сервисного обслуживания автомобилей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 273–278. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-273-274. EDN: UFXJFW.
9. Никишов О.В., Панюков Д.И., Козловский В.Н. Сквозное нормирование времени выполнения работ в автосервисе: методика управления качеством и эффективностью процессов // СТИН. 2025. № 10. С. 17–23. EDN: TSHYLM.
10. Козин Е.С. Модель реализации системы контроля производственного процесса на предприятии технического сервиса автомобилей // International Journal of Advanced Studies. 2025. Т. 15, № 2. С. 229–251. DOI: 10.12731/2227-930X-2025-15-2-362. EDN: QSOJPJ.
11. Zakharov N.S., Kozin E.S. Monitoring implementation of technological processes for vehicle maintenance and repair using neural networks. Bulletin of the Ural State University of Railway Transport. 2023; 4: 43–51. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-4-43-51. EDN: NAQINB.
12. Козин Е.С. Система поддержки принятия решений по управлению станцией технического обслуживания автомобилей // Транспорт Урала. 2022. № 3(74). С. 73–77. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-73-77. EDN: MWZBJW.
13. Rassudov L., Tolstikh O., Tiapkin M. [et al.]. Digital Twin Implementation for Accelerating the Development of Flexible Transportation System Control Software. Proceedings of 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2021). 2021. DOI: 10.1109/RTUCON 53541.2021.9711704
14. Никишов О.В., Панюков Д.И., Козловский В.Н. Интегральная оценка качества процесса сервисного обслуживания автомобилей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 3(125). С. 83–91. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-83-91. EDN: OXOTOA.
15. Панюков Д.И., Никишов О.В., Васин С.А., Пантюхин О.В. Статистическое моделирование процесса сервисного обслуживания автомобилей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 10. С. 142–146. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-142-143. EDN: BRXJJH.
16. Мосин В.Г., Брагина К.А., Козловский В.Н., Гусев А.В. Парето-анализ качества работы сервисных центров автопроизводителей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 3(125). С. 92–98. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-92-98. EDN: OZPLPU.
17. Нестеренко И.С., Нестеренко Г.А., Бугров В.С. Проектирование клиентской зоны, позволяющей повысить спрос на услуги станций технического обслуживания автомобилей // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1(115). С. 55–58. DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.112
18. Нестеренко Г.А., Нестеренко И.С., Залознов И.П. Использование BIM-технологий для

повышения эффективности разработки и эксплуатации предприятий по обслуживанию и продажам автомобилей // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 11 (137). С.1–6. DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.14

19. Захаров Н.С., Козин Е.С. Технологическое проектирование станций технического обслуживания автомобилей с использованием генетических алгоритмов // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2024. 14 (2). С.104–119. DOI: 10.12731/2227-930X2024-14-2-296

REFERENCES

1. Belov S.A., Takhtamyshev Kh.M., Guketlev Yu.Kh. Modeling of power management processes of technical services of auto service enterprises. *Bulletin of Eurasian Science*. 2022; Vol. 14, № 5. EDN: SSA-DIX. (In Russ.)

2. Takhtamyshev Kh.M., Guketlev E. U., Belov S.A. Modeling of capacity management processes of technical services of small auto service enterprises under conditions of probabilistic demand. *Bulletin of Eurasian Science*. 2024; Vol. 16, № 2. EDN: KRNUTB. (In Russ.)

3. Takhtamyshev Kh.M., Takhtamysheva Z.Sh., Guketlev E.Yu. Optimization of the frequency of vehicle maintenance using statistical modeling. *Bulletin of Eurasian Science*. 2024; Vol. 16, № 6. EDN: CHEVOI. (In Russ.)

4. Takhtamyshev Kh.M., Guketlev E. Yu. Algorithms and flow charts for calculating the required stock of elements for a given level of spare parts provision for vehicle fleets of motor transport enterprises. *Scientific Bulletin of the State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Nevinnomyssk State Humanitarian and Technical Institute»*. 2025; № 2. P. 24-29. EDN: APNUZR. (In Russ.)

5. Takhtamyshev H.M., Guketlev Yu.H. Patterns of formation of application flows to ensure capacity loading of specialized enterprises in the car service network. *Scientific Bulletin of the State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Nevinnomyssk State Humanitarian and Technical Institute»*. 2023; № 1. P. 5-13. EDN: UNCRGN. (In Russ.)

6. Grishin A.S., Sarbaev V.I., Giovanis S. Selection of a rational number of alternatives of spare parts for a car service using fuzzy set methods. *World of transport and technological machines*. 2024; № 4, 3(87). P. 55-61. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-3(87)-55-61. EDN: WFZLEA. (In Russ.)

7. Grishin A.S., Sarbaev V.I., Giovanis S. Simulation model of the production process of a dealership auto service center. *World of Transport and Technological Machines*. 2025; № 3-2(90). P. 135-143. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-135-143. EDN: QVPIGY. (In Russ.)

8. Panyukov D.I., Nikishov O.V. Model of the system for assessing the quality of the car service process. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2024; № 1. P. 273-278. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-273-274. EDN: UFXJFW. (In Russ.)

9. Nikishov O.V., Panyukov D.I., Kozlovsky V.N. End-to-end standardization of work execution time in a car service: a methodology for managing the quality and efficiency of processes. *STIN*. 2025; № 10. P. 17-23. EDN: TSHYLM. (In Russ.)

10. Kozin E.S. Model for the implementation of a production process control system at an automobile technical service enterprise. *International Journal of Advanced Studies*. 2025; Vol. 15, № 2: Pp. 229-251. DOI: 10.12731/2227-930X-2025-15-2-362. EDN QSO-JPJ. (In Russ.)

11. Zakharov N.S., Kozin E.S. Monitoring implementation of technological processes for vehicle maintenance and repair using neural networks. *Bulletin of the Ural State University of Railway Transport*. 2023; 4: 43–51. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-4-43-51. EDN: NAQINB.

12. Kozin E.S. Decision support system for managing a vehicle service station. *Transport of the Urals*. 2022; № 3 (74). P. 73-77. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-73-77. EDN: MWZBJW. (In Russ.)

13. Rassudov L., Tolstikh O., Tiapkin M. [et al.]. Digital Twin Implementation for Accelerating the Development of Flexible Transportation System Control Software. Proceedings of 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2021). 2021. DOI: 10.1109/RTUCON 53541.2021.9711704

14. Nikishov O.V., Panyukov D.I., Kozlovsky V.N. Integral assessment of the quality of the car service process. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2025; Vol. 27, № 3(125): P. 83-91. (In Russ.) DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-83-91. EDN: OXOTOA.

15. Panyukov D.I., Nikishov O.V., Vasin S.A., Pantyukhin O.V. Statistical modeling of the car service process. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2024; № 10: pp. 142-146. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-142-143. EDN: BRXJJH. (In Russ.)

16. Mosin V.G., Bragina K.A., Kozlovsky V.N., Gusev A.V. Pareto analysis of the quality of work of service centers of car manufacturers. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2025; Vol. 27, № 3(125): P. 92-98. (In Russ.) DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-92-98. EDN: OZPLPU.

17. Nesterenko I.S. Design of a customer zonethat allows increasing demand for the services of car service stations. *International Research Journal*. 2022; 1 (115). pp. 55-58 (In Russ.) DOI: 10.23670 / IRJ.2022.115.1.112

18. Nesterenko G.A., Nesterenko I.S., Zaloznov I.P. Using BIM technologies to improve the efficiency of development and operation of enterprises for car maintenance and sales. *International Research Journal*. 2023; 11 (137). pp. 1-6 (In Russ.) DOI: 10.23670 / IRJ.2023.137.14

19. Zakharov N.S., Kozin E.S. Technological design of vehicle service stations using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*. 2024; 14 (2). pp. 104-119 (In Russ.) DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-2-296

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Банкет М.В. Вклад в общую работу заключается в концептуализации и валидации.

Шипицына Р.Е. Вклад в общую работу заключается в описании методологии, проведении натурных исследований, подготовке ресурсов, подготовке первоначального проекта, обзоре и редактировании.

Эйхлер И.А. Вклад в общую работу заключается в описании методологии, проведении исследования, курировании данных, подготовке первоначального проекта, обзоре и редактировании.

Погуляева И.В. Вклад в общую работу заключается в подготовке ресурсов и курировании данных.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Banket M.V. Conceptualization and validation of the research work.

Shipitsyna R.Ye. Methodology description, conducting field research, preparing resources, developing the initial draft, article reviewing and editing.

Eychler I.A.: Methodology description, conducting the research, data supervising, developing the initial draft, article reviewing and editing.

Pogulyaeva I.V. Preparing resources and data monitoring.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Банкет Михаил Викторович – канд. техн. наук, доц., директор института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1901-8150>,

SPIN-код: 3698-4459,

Scopus Author ID: 57212171363,

Researcher ID: AAV-5959-2021,

e-mail: mikhail_banket@mail.ru

Шипицына Роксана Енокровна – старший преподаватель кафедры «Автомобильный транспорт» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0730-6569>,

SPIN-код: 5017-9619,

Author ID: 1096373,

e-mail: shipitsina.roxana@yandex.ru

Эйхлер Иван Андреевич – канд. экон. наук, доц. кафедры «Экономика, логистика и управление качеством» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4681-8468>,

SPIN-код: 7562-4729,

Scopus Author ID: 57728886700,

e-mail: vaniaeichler@gmail.com

Погуляева Ирина Владимировна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Экономика, логистика и управление качеством» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1109-5327>,

SPIN-код: 4007-8472,

Scopus Author ID: 57190002090,

e-mail: pogulyaeva_iv@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Banket Mikhail V. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Director, “Automobile transport, oil and gas, and construction equipment” Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1901-8150>,

SPIN-code: 3698-4459,

Scopus Author ID: 57212171363,

Researcher ID: AAV-5959-2021,

e-mail: mikhail_banket@mail.ru

Shipitsyna Roxana Ye. – Senior Lecturer, «Automobile Transport» Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0730-6569>,

SPIN-code: 5017-9619,

Author ID: 1096373,

e-mail: shipitsina.roxana@yandex.ru

Eychler Ivan A. – Cand. of Econ. Sci., Associate Professor, “Economics, Logistics and Quality Management” Department, “Information Systems, Economics and Management” Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4681-8468>,

SPIN-code: 7562-4729,

Scopus Author ID: 57728886700,

e-mail: vaniaeichler@gmail.com

Pogulyaeva Irina V. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, “Economics, Logistics and Quality Management” Department, “Information Systems, Economics and Management” Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1109-5327>,

SPIN-code: 4007-8472,

Scopus Author ID: 57190002090,

e-mail: pogulyaeva_iv@mail.ru

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-240-253>
EDN: HZPUWK



МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ АВАРИЙНО-ОПАСНЫХ ЗОН НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ О ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ

Р.М. Хамитов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
hamitov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение безопасности дорожного движения требует разработки методов проактивного выявления участков с повышенной концентрацией дорожно-транспортных происшествий. Существующие подходы недостаточно используют потенциал анализа исторических пространственно-временных данных для прогнозирования зон повышенного риска.

Материалы и методы. В работе использованы данные о 16 247 ДТП за период 2015–2024 гг. по г. Казани, предоставленные ГИБДД. Применен метод пространственной кластеризации по фиксированному радиусу (100 м) с порогом плотности 20 ДТП на зону. Для обработки данных использованы библиотеки Python (*pandas*, *haversine*), для визуализации – *folium* и *GeoJSON*.

Результаты. Разработаны методика и алгоритм выявления аварийно-опасных зон, включающая этапы предварительной обработки геоданных, кластеризации по радиусу, оценки плотности аварий и характеристики зон по доминирующим типам ДТП. Выявлено 127 аварийно-опасных зон, из которых 50 наиболее значимых характеризуются концентрацией от 21 до 87 ДТП. Установлено, что 78% зон локализованы на перекрестках и участках с интенсивным движением. Временной анализ выявил пик аварийности в вечерние часы (17:00–20:00) и увеличение количества ДТП на 23% в осенне-зимний период.

Обсуждение и заключение. Предложенная методика позволяет объективно идентифицировать аварийно-опасные зоны, выявленные алгоритмом кластеризации с учетом пространственной концентрации происшествий. Результаты могут быть интегрированы в навигационные системы для формирования контекстно-зависимых предупреждений водителям. Практическая значимость подтверждена разработкой прототипа мобильного приложения на платформе Android с использованием Yandex MapKit SDK.

Практическое значение: методика обеспечивает снижение трудозатрат на выявление проблемных участков дороги и повышает эффективность распределения ресурсов дорожно-эксплуатационных служб.

Разработан прототип мобильного приложения на платформе Android с использованием Yandex MapKit SDK, обеспечивающий визуальное и звуковое предупреждение водителей при приближении к аварийно-опасным зонам.

Оригинальность/ценность: комплексный подход, объединяющий пространственный анализ данных ГИБДД с возможностью оперативной визуализации и интеграции в мобильные навигационные сервисы для проактивного предупреждения водителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безопасность дорожного движения, аварийно-опасные зоны, пространственная кластеризация, дорожно-транспортные происшествия, геоинформационные системы, навигационные сервисы, анализ данных, интеллектуальные транспортные системы, предупреждение ДТП, мобильные приложения

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает свою благодарность студенту Ч.Р. Гиниятову за его помощь в сборе и предварительной обработке данных о несчастных случаях.

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; одобрена после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Хамитов Р.М., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Хамитов Р.М. Методика выявления аварийно-опасных зон на основе пространственной кластеризации данных // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 240-253. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-240-253>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-240-253>

EDN: HZPUWK

METHODOLOGY FOR IDENTIFYING ACCIDENT-PRONE ZONES BASED ON SPATIAL CLUSTERING OF ROAD ACCIDENT DATA

Renat M. Khamitov

Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia

hamitov@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Improving road safety requires the development of methods for proactive identification of areas with an increased concentration of road accidents. Existing approaches do not sufficiently use the potential of analyzing historical spatiotemporal data to predict accident-prone zones.

Materials and methods. The work uses data on 16,247 road accidents for the period from 2015 to 2024 in Kazan, provided by the State Traffic Safety Inspectorate. The method of spatial clustering over a fixed radius (100 m) with a density threshold of 20 accidents per zone has been applied. Python libraries (pandas, haversine) have been used for data processing, folium and GeoJSON for visualization.

Results. Methodology and algorithm for identifying accident-prone zones have been developed, including the stages of preprocessing geodata, clustering by radius, accident density estimation and zone characteristics by dominant types of accidents. 127 accident-prone zones have been identified, 50 most significant are characterized by concentrations from 21 to 87 accidents. 78% of these zones were found to be located at intersections and areas with heavy traffic. A temporal analysis revealed a peak accident rate in the evening (5:00 p.m. – 8:00 p.m.) and an increase in the number of accidents by 23% in the autumn-winter period.

Discussion and conclusion. The proposed methodology makes it possible to identify objectively accident-prone zones found by the clustering algorithm, taking into account the spatial concentration of incidents. The results can be integrated into navigation systems to generate context-sensitive warnings to drivers. The practical significance is confirmed by the development of a prototype mobile application on the Android platform with the use of Yandex MapKit SDK.

Practical value: The technique gives an ability to reduce labor costs for identifying problem sections of the road and increases the efficiency of resource allocation for road maintenance services. A prototype of an Android-based mobile application has been developed with the use of Yandex MapKit SDK, which provides visual and audible warnings to drivers approaching accident-prone zones.

Originality/value: An integrated approach combining spatial analysis of State Traffic Safety Inspectorate data with the ability to visualize quickly and integrate into mobile navigation services for proactive driver warnings.

KEYWORDS: road safety, accident-prone zones, spatial clustering, road accidents, geoinformation systems, navigation services, data analysis, intelligent transport systems, accident prevention, mobile applications

ACKNOWLEDGEMENTS. The author expresses his gratitude to student Giniyatov Ch.R. for his help in collecting and pre-processing data on accidents.

The article was submitted: January 28, 2026; approved after reviewing: February 26, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Khamitov R.M. Methodology for identifying accident-prone zones based on spatial clustering of road accident data. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 240-253. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-240-253>

© Khamitov Renat M., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Современные вызовы в области безопасности дорожного движения (БДД) требуют перехода от реактивных мер к проактивным методам прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций [1]. По данным статистики, в Российской Федерации ежегодно регистрируется свыше 140 тыс. дорожно-транспортных происшествий, в которых погибает более 15 тыс. чел¹. Несмотря на принимаемые меры, уровень аварийности остается высоким, что обусловлено комплексом факторов: человеческим поведением, состоянием дорожной инфраструктуры, погодными условиями и интенсивностью движения.

Исследования показывают, что до 93% ДТП связано с ошибками водителей, что подчеркивает доминирующую роль человеческого фактора в обеспечении безопасности [2]. Однако традиционные подходы к анализу аварийности, основанные на изучении отдельных происшествий и локальном устранении причин, демонстрируют ограниченную эффективность при решении системных проблем безопасности дорожного движения.

Традиционные подходы к обеспечению БДД, основанные на анализе отдельных происшествий и локальном устранении причин, демонстрируют ограниченную эффективность. Зарубежные ученые активно развивают подходы к пространственному анализу аварийности. Reason J. в рамках концепции «системного подхода к человеческой ошибке» обосновал необходимость учета взаимодействия компонентов системы «человек – транспортное средство – дорога – среда» при анализе ДТП [3]. Vaa T. показал влияние когнитивных и эмоциональных факторов на поведение водителя в опасных ситуациях, что важно для понимания причин концентрации аварий на определенных участках [4].

В работах Ergağın A. продемонстрирована эффективность применения геостатистических методов для выявления зон концентрации ДТП в городской среде с учетом пространственной автокорреляции [5]. Szakonyi P. и соавт. исследовали взаимосвязь между структурой городской застройки и распределением аварийности, выявив значимые корреляции между плотностью застройки и частотой ДТП [6].

В отечественных исследованиях значительное внимание уделяется разработке интегральных показателей оценки БДД. И.Е. Ильина и Е.Е. Витвицкий предложили систему индексов, учитывающих влияние человеческого фактора на уровень безопасности с применением методов взвешивания параметров [7]. Н.Н. Якунин и соавт. разработали методику прогнозирования транспортной потребности в городах с высоким туристическим потенциалом, что актуально для оценки сезонной аварийности [8]. Однако недостаточно исследованы методы автоматизированного выявления АОУ на основе кластеризации пространственных данных.

А.В. Акчурин и Ю.Н. Кондратова применили методы кластеризации для определения областей повышенной дорожно-транспортной опасности на карте города, однако их подход не учитывал динамические характеристики движения и временные паттерны аварийности [9]. А.А. Алексеева и И.В. Волчатова использовали ГИС-технологии для анализа пространственного распределения ДТП, но не предложили механизма интеграции результатов в навигационные системы [10, 11].

Современные навигационные системы (Google Maps, Яндекс.Навигатор) предоставляют пользователям информацию о текущих ДТП, но редко используют исторические данные для прогнозирования зон повышенного риска². Системы помощи водителю (ADAS) фокусируются на обнаружении непосредственной угрозы, но не учитывают статистическую вероятность ДТП на конкретном участке дороги [12].

Анализ существующих решений выявил следующие «белые пятна» [21, 22, 23]:

1. Отсутствие стандартизированной методики выявления аварийно-опасных зон на основе пространственной кластеризации с количественными критериями (радиус, порог плотности).
2. Недостаточная интеграция результатов анализа исторических данных в мобильные навигационные приложения для проактивного предупреждения водителей.
3. Ограниченное использование контекстной информации (тип ДТП, время суток, погодные условия) при формировании персонализированных предупреждений.

¹ Показатели состояния безопасности дорожного движения в Российской Федерации в 2023 году [Электронный ресурс]. URL: <http://stat.gibdd.ru> (дата обращения: 15.01.2026).

² Макаренко П.А. Автомобильная навигация – история появления, принцип работы, виды. Перспективное развитие науки, техники и технологий. 2021:193–196.

Таким образом, в работе вводится термин «аварийно-опасная зона» для обозначения результата алгоритма пространственной кластеризации – географической области радиусом 100 м с концентрацией не менее 20 ДТП за десятилетний период. Этот термин используется исключительно в аналитическом и прикладном контексте разработки системы проактивного предупреждения водителей и не заменяет юридически закреплённое понятие «аварийно-опасный участок дороги», определённое в Федеральном законе № 196-ФЗ, которое применяется для планирования дорожных работ и установки предупреждающих знаков.

Целью исследования является разработка методики выявления аварийно-опасных зон на основе пространственной кластеризации данных о ДТП с последующей интеграцией результатов в мобильные навигационные сервисы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести предварительную обработку и очистку массива данных о ДТП за 2015–2024 гг. по г. Казани.

2. Разработать алгоритм пространственной кластеризации по фиксированному радиусу с количественными критериями формирования зон.

3. Выявить и охарактеризовать аварийно-опасные зоны по пространственному распределению, типам ДТП и временным паттернам.

4. Реализовать прототип мобильного приложения для визуализации зон и генерации предупреждений водителям.

5. Оценить точность работы алгоритма и экономическую эффективность предлагаемого решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использован массив данных о 16 247 ДТП, зарегистрированных на территории г. Казани в период с 2015 по 2024 г. Данные предоставлены в электронном виде и включают следующие атрибуты: геокоординаты места происшествия (широта, долгота), дата и время, категория ДТП (столкновение, опрокидывание, наезд на пешехода и др.), погодные условия, состояние дорожного покрытия, количество пострадавших.

Структура набора данных включает множество характеристик для каждого зафиксированного ДТП, предоставляя комплексную картину каждого инцидента. Среди ключевых атрибутов можно выделить:

- geopoint – географические координаты места происшествия (широта и долгота);

- id – уникальный идентификатор происшествия;

- tags – теги, содержащие дополнительную информацию об обстоятельствах ДТП (например, ДТП и пострадавшие дети в возрасте до 16 лет);

- light – освещённость на момент происшествия (светло, темно, искусственное освещение);

- point – информация о точке происшествия;

- nearby – объекты, находящиеся рядом с местом ДТП (школы, перекрёстки, остановки);

- region – указывает на муниципальное образование, в котором произошло ДТП (в данном случае – г. Казань);

- scheme – схема ДТП, тип конфигурации (например, лобовое столкновение, наезд на пешехода);

- address – адрес места происшествия;

- weather – погодные условия в момент ДТП (дождь, снег, ясно);

- category – категория происшествия (например, столкновение, наезд, опрокидывание);

- datetime – дата и время происшествия;

- severity – тяжесть последствий ДТП (например, с пострадавшими, с погибшими, без пострадавших);

- vehicles – количество транспортных средств, участвовавших в ДТП;

- dead_count – количество погибших;

- participants – информация об участниках ДТП (водители, пешеходы);

- injured_count – количество раненых;

- parent_region – обозначает субъект Российской Федерации;

- road_conditions – состояние дорожного покрытия (скользкая дорога, сухое покрытие);

- participants_count – общее количество участников ДТП;

- participant_categories – категории участников (водитель, пешеход, пассажир).

После описания исходного набора данных и его ключевых особенностей, а также выполнения первичной обработки, включая извлечение и генерацию производных временных признаков, следующим важным этапом был предварительный анализ данных. Цель анализа – получить первичное представление о данных, выявить основные закономерности, распределения признаков, потенциальные аномалии и взаимосвязи между различными факторами, влияющими на аварийность. Этот

этап критически важен для формирования гипотез и выбора адекватных методов для последующего, более глубокого анализа, включая выявление аварийно-опасных зон [13, 17, 18]. Для проведения разведочного анализа и визуализации результатов использовались возможности языка программирования Python совместно с библиотеками pandas для манипуляции данными, а также matplotlib и seaborn для построения графиков [19, 20].

Краткий анализ распределения ДТП в г. Казани.

Проведенный комплексный анализ дорожно-транспортных происшествий за период 2015–2024 гг. выявил устойчивые пространственно-временные паттерны аварийности, имеющие практическое значение для разработки систем проактивного предупреждения водителей.

Ключевые выводы по факторам риска:

1. *Погодные условия.* Абсолютное большинство ДТП фиксируется в ясную и пасмурную погоду, однако данный показатель отражает не опасность условий, а их преобладание в течение года. Критически значимыми факторами риска являются дождь, снегопады, гололед и туман, которые при меньшей продолжительности воздействия демонстрируют повышенную удельную аварийность из-за снижения сцепления шин с покрытием и ухудшения видимости.

2. *Состояние дорожной инфраструктуры.* Помимо мокрого и заснеженного покрытия, значимыми триггерами ДТП выступают дефекты обустройства дорог: отсутствие или плохая различимость горизонтальной разметки (особенно в темное время суток и при осадках), недостаточное количество дорожных знаков в зонах повышенной сложности движения.

3. *Типы и тяжесть происшествий.* Доминируют столкновения ТС (68%) и наезды на пешеходов (19%). Большинство инцидентов имеют легкую степень тяжести, что объясняется городскими скоростными ограничениями. Однако наезды на пешеходов требуют особого внимания из-за высокой социальной значимости последствий.

4. *Временные паттерны аварийности:*

- *Сезонность:* пик аварийности приходится на осенне-зимний период (октябрь–февраль) с увеличением ДТП на 23% относительно весенне-летнего периода, что напрямую коррелирует с ухудшением погодных условий и сокращением светового дня.

- *Суточная динамика:* выраженные пики в утренний (08:00–10:00) и вечерний (17:00–20:00) часы пик, совпадающие с максимальной интенсивностью движения.

- *Недельная цикличность:* 78% ДТП происходит в будние дни с максимумом в четверг–пятницу (накопленная усталость водителей, предвыходная активность).

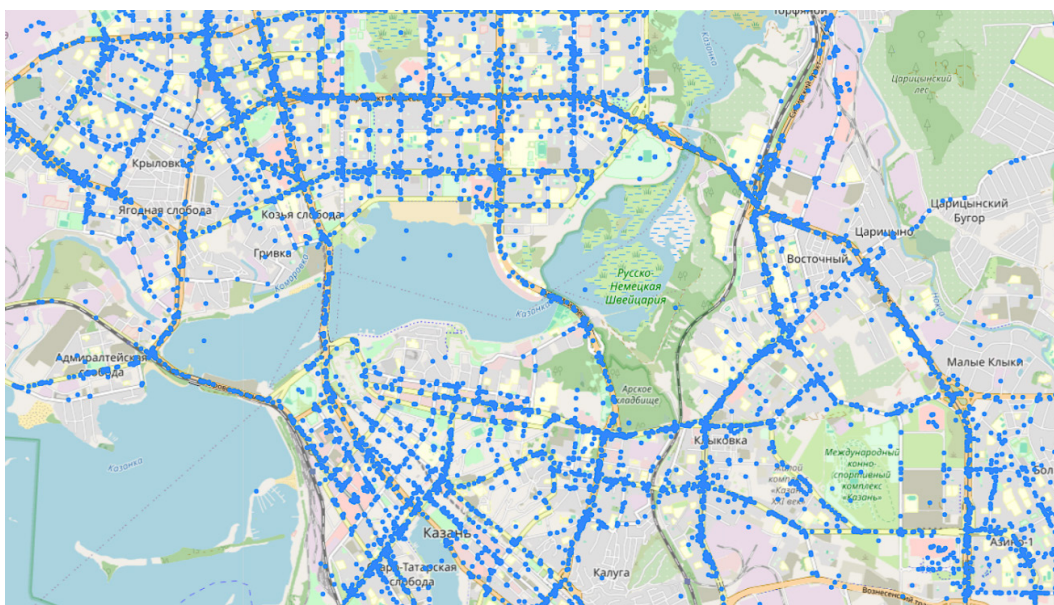


Рисунок 1 – Карта общего пространственного распределения ДТП в г. Казани
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Map of the general spatial distribution of road accidents in Kazan
Source: compiled by the author.

5. *Пространственное распределение.* Аварийность распределена неравномерно: 78% концентрируется на перекрестках и примыканиях, 15% – на участках с интенсивным движением вблизи объектов притяжения трафика (ТЦ, вокзалы), 7% – на пешеходных переходах в жилых массивах. Наибольшая плотность ДТП визуально прослеживается вдоль ключевых городских магистралей и проспектов, таких как проспект Ямашева, улица Пушкина, улица Ершова, Оренбургский тракт, что ожидаемо ввиду высокой интенсивности движения на этих участках.

Практическая значимость. Выявленные паттерны формируют основу для разработки контекстно-зависимых предупреждений в навигационных системах. Система должна учитывать не только географическую локализацию аварийно-опасных зон, но и временные окна повышенного риска (вечерние часы, осенне-зимний сезон), а также доминирующие типы ДТП в конкретной зоне (столкновения на перекрестках, наезды на пешеходов у ТЦ) для формирования персонализированных рекомендаций водителю.

Работа с данным набором выявляет ряд особенностей, требующих внимания на этапе предварительной обработки, что является стандартной практикой при анализе реальных данных. В первую очередь строковое представление геокоординат в столбце `geopoint` было преобразовано в числовые значения широты и долготы для обеспечения их корректного использования в последующих геопространственных вычислениях и визуализации. Также было установлено, что такие поля, как `weather` и `road_conditions`, содержат множественные характеристики, записанные в виде списков или текстовых перечислений. Для детального анализа каждого отдельного фактора была применена процедура их парсинга и «разворачивания», что позволило учесть каждое условие погоды или состояние дороги индивидуально.

Неизбежным аспектом работы с реальными данными стало наличие пропущенных значений и аномалий в некоторых полях. Для обеспечения высокого качества анализа были реализованы стратегии их выявления и обработки. В частности, записи с отсутствующими или невалидными геокоординатами были исключены из набора данных, так как они не могут быть использованы в пространственном анализе. Подходы к обработке пропусков в других полях варьировались в зависимости от доли отсутствующих значений и природы конкретного признака, включая удаление строк с

критически важными пропущенными данными или заполнение пропусков наиболее частым значением для категориальных признаков.

Тщательное изучение структуры, особенностей и потенциальных проблем исходных данных является основополагающим этапом, предваряющим разработку корректной методологии их анализа и обработки с целью выявления аварийно-опасных зон.

Предварительная обработка данных. На первом этапе выполнена очистка данных по следующим критериям:

1. Удалены записи с отсутствующими или некорректными геокоординатами (широта/долгота = 0 или за пределами географических границ г. Казани: 55,4°–56,0° с.ш., 48,8°–49,4° в.д.).

2. Обработаны пропущенные значения категориальных признаков путем замены на модальное значение.

3. Строковое представление геокоординат преобразовано в числовые значения с использованием безопасного парсера `ast.literal_eval()` для корректной обработки формата «[широта, долгота]». Применение `ast.literal_eval()` вместо `eval()` исключает риски инъекционных атак при обработке внешних данных и соответствует стандартам безопасной разработки программного обеспечения.

4. Для анализа погодных условий и состояния дорожного покрытия проведена нормализация значений с разворачиванием составных признаков (например, «дождь, туман» → отдельные категории).

В результате обработки из исходного массива исключено 1 243 записи (7,7%), что позволило получить рабочий набор из 15 004 валидных записей с корректными геопространственными данными.

Взвешивание данных по времени. Для повышения актуальности выявленных зон введена процедура взвешивания исторических данных по принципу временного затухания (Time Decay). Каждому ДТП присваивается весовой коэффициент w_i , рассчитываемый по экспоненциальной формуле (1):

$$w_i = e^{-\lambda \cdot (t_{current} - t_i)}, \quad (1)$$

где t_i – год совершения ДТП, $t_{current}$ – текущий год, а λ – коэффициент затухания.

Значение λ определяется через период полураспада $T_{1/2}$ – временной интервал, за который вес происшествия снижается вдвое. Международная практика анализа дорожной безопасности (в том числе реко-

мендации PIARC, OECD и методики Highway Safety Manual) предполагает использование 5–10-летних периодов для оценки риска и выявления опасных участков [18, 23]. Такой подход позволяет увеличить статистическую выборку, сгладить влияние единичных тяжёлых ДТП и учесть долгосрочные тенденции аварийности.

В настоящей работе выбран период полураспада $T_{1/2}=7$ лет как компромисс между достаточной репрезентативностью данных и их актуальностью. Коэффициент затухания рассчитывается по формуле (2):

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \approx \frac{0,693}{7} \approx 0,099. \quad (2)$$

С учётом этого значения:

- ДТП 2025 года имеет вес $w=1,00$;
- ДТП 2020 года (5 лет назад) – $w \approx 0,61$;
- ДТП 2018 года (7 лет назад) – $w \approx 0,50$;
- ДТП 2016 года (9 лет назад) – $w \approx 0,41$.

Таким образом, алгоритм кластеризации уделяет большее внимание недавним происшествиям, адекватно отражая современное состояние дорожной сети, при этом сохраняя вклад более ранних данных, что соответствует общепринятой практике формирования устойчивых оценок аварийности.

Важно отметить, что $T_{1/2}$ является регулируемым параметром, который может быть адаптирован в зависимости от целей анализа.

Метод пространственной кластеризации. Для выявления аварийно-опасных зон применен метод пространственной кластеризации по фиксированному радиусу поиска. Радиус поиска $r = 100$ м представляет собой максимальное расстояние от центра кластера, в пределах которого точки ДТП считаются принадлежащими одной зоне концентрации. Порог плотности $k = 20$ определяет минимальное количество ДТП, необходимое для формирования аварийно-опасной зоны. Алгоритм метода включает следующие шаги:

1. Каждая точка ДТП последовательно рассматривается как потенциальный центр кластера.

2. Для каждой точки определяются все другие точки, находящиеся в пределах радиуса поиска $r = 100$ м (расстояние рассчитывается по формуле гаверсинуса).

3. Если количество точек в радиусе превышает пороговое значение $k = 20$, формируется аварийно-опасная зона.

4. Точки, вошедшие в состав зоны, исключаются из дальнейшего рассмотрения для предотвращения дублирования.

Выбор метода кластеризации по фиксированному радиусу обусловлен спецификой задачи проактивного предупреждения водителей. В отличие от алгоритмов, ориентированных на выявление линейных очагов аварийности (например, DBSCAN или KDE), данный подход оптимально подходит для идентификации точечных очагов, которые составляют основную массу аварийно-опасных локаций в городской среде – перекрестков, примыканий, пешеходных переходов и участков вблизи объектов притяжения трафика. Анализ исходных данных показал, что 78% ДТП концентрируется именно на таких точечных объектах, что делает выбранный метод наиболее релевантным для поставленной цели. Алгоритмы, ориентированные на линейные структуры, в данном случае были бы избыточны и могли бы привести к формированию протяженных зон, не соответствующих реальной природе городской аварийности.

Выбор порогового значения $k = 20$ ДТП за десятилетний период (2015–2024 гг.) обусловлен следующими соображениями. Во-первых, при средней годовой интенсивности ДТП в г. Казани (~1 850 происшествий) и площади города (~425 км²), ожидаемое количество ДТП в круге радиусом 100 м (площадь $\approx 0,0314$ км²) за 10 лет составляет около 4–5 событий. Порог в 20 ДТП превышает это ожидаемое значение более чем в 4 раза, что свидетельствует о статистически значимой концентрации аварийности. Во-вторых, данный критерий позволяет выявить зоны, которые воспринимаются водителями как реально опасные (перекрёстки, примыкания, участки у торговых центров), избегая при этом избыточного дробления карты на тысячи малозначимых скоплений. В-третьих, параметры кластеризации (радиус и порог плотности) являются настраиваемыми: для магистралей радиус может быть увеличен до 200 м, для жилых зон – уменьшен до 50 м, а порог плотности скорректирован пропорционально.

Математически условие (3) формирования зоны выражается как

$$C_i = p_j \in P \mid d(p_i, p_j) \leq r \wedge |C_i| \geq k, \quad (3)$$

где C_j – кластер (аварийно-опасная зона) с центром в точке p_j ; P – множество всех точек ДТП; d – функция расстояния по гаверсинусу; r – радиус кластеризации (100 м); k – минимальное количество ДТП в зоне (21, включая центральную точку).

Формула гаверсинуса (4) для расчета расстояния между двумя точками на сфере:

$$d = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) + \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right), \quad (4)$$

где R – радиус Земли (6371 км), φ – широта, λ – долгота, $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ – разница широт и долгот соответственно.

Характеристика выявленных зон. Для каждой зоны рассчитаны следующие параметры:

- координаты центра зоны (средневзвешенные по количеству ДТП);
- радиус зоны (фиксированный 100 м);
- количество ДТП в зоне;
- доминирующая категория ДТП (определяется как мода по признаку «категория»).

Результаты кластеризации экспортированы в формате GeoJSON для последующей интеграции в мобильное приложение. Визуализация выполнена с использованием библиотеки *folium* с наложением зон на интерактивную карту города в виде кругов радиусом 100.

Для первоначального выявления зон использовался равный вес, однако для приоритизации в приложение внедрен следующий алгоритм. Признавая важность дифференциации по тяжести последствий, в целях повышения точности и социальной значимости выявляемых зон, в методику возможна интеграция весового коэффициента тяжести последствий (*Severity Index*), который будет повышать вклад ДТП с погибшими и ранеными в формирование кластера. Это позволит системе генерировать более приоритетные предупреждения для зон с высоким социальным риском, а не только с высокой частотой мелких происшествий.

Каждому ДТП присваивается вес s_i , рассчитываемый по следующей формуле (5):

$$s_i = 1 + 3 \cdot d_i + 0,5 \cdot w_i, \quad (5)$$

где d_i – количество погибших в i -м ДТП; w_i – количество раненых. Такая шкала отражает общепринятую практику, согласно которой гибель человека эквивалентна трем серьезным травмам, а мелкие происшествия без пострадавших имеют базовый вес 1. При кластеризации вместо простого подсчета количества ДТП используется суммарный взвешенный балл зоны $S_{zone} = \sum s_i$. Пороговое значение для формирования аварийно-опасной зоны может быть принято на уровне $S_{zone} \geq 25$, что соответствует, например, 20 мелким ДТП или 8 ДТП с одним раненым, или одному ДТП с тремя

погибшими. Это позволит системе приоритизировать зоны с высоким социальным риском, а не только с высокой частотой мелких происшествий.

Разработка прототипа мобильного приложения

Для демонстрации практической применимости методики разработан прототип приложения для платформы Android с использованием:

- среда разработки: Android Studio;
- картографический фреймворк: Yandex MapKit SDK;
- язык программирования: Kotlin;
- формат данных об аварийно-опасных зонах: GeoJSON.

Функционал приложения включает:

1. Отображение аварийно-опасных зон на карте в виде цветowych кругов радиусом 100 м.
2. Построение маршрута с учетом опасных зон (альтернативный маршрут при наличии).
3. Генерация визуальных предупреждений при приближении к зоне на расстояние 200 м.
4. Звуковое оповещение при вхождении в зону повышенной опасности.
5. Отображение характеристик зоны (количество ДТП, доминирующий тип происшествия) при нажатии на маркер.

Алгоритм определения вхождения в зону реализован через расчет геодезического расстояния между текущими координатами устройства и центром каждой зоны с использованием формулы гаверсина в реальном времени. Для минимизации ложных срабатываний на параллельных улицах и двухуровневых развязках система предупреждений использует не только географическое попадание в зону (*Geo-fencing*), но и привязку к графу дорог (*Map Matching*), предоставляемую Yandex MapKit SDK. Текущие координаты пользователя сначала привязываются к ближайшему сегменту дорожной сети и только затем проверяется пересечение этого сегмента с аварийно-опасной зоной. Такой подход значительно повышает точность определения фактического маршрута движения и снижает количество ложных предупреждений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки массива данных выявлено 127 аварийно-опасных зон на территории г. Казани. Из них 50 зон с наибольшей плотностью ДТП (от 21 до 87 происшествий в радиусе 100 м) отобраны для детального анализа.

Анализ пространственного распределения показал, что 78% выявленных зон локализованы на перекрестках и примыканиях (рисунок 2), 15% – на участках с интенсивным движением вблизи торговых центров и вокзалов, 7% – на пешеходных переходах в жилых массивах.

Временной анализ выявил пик аварийности в вечерние часы (17:00–20:00), на которые приходится 34% всех ДТП в выявленных зонах. Утренний пик (08:00–10:00) составляет 28%, дневной период (10:00–17:00) – 25%, ночной период (20:00–08:00) – 13%.

Сезонная динамика показала увеличение количества ДТП на 23% в осенне-зимний период (октябрь–февраль) по сравнению с весенне-летним. Наибольшее количество происшествий зафиксировано в ноябре (12,3% от годового объема) и декабре (11,8%), что связано с ухудшением погодных условий, снижением светового дня и обледенением дорожного покрытия.

Процесс визуализации аварийно-опасных зон и исходных данных о ДТП был реализован с использованием библиотеки folium и включал несколько последовательных шагов. Вначале инициализировалась базовая интерактивная карта (см. рисунок 2). Затем, для обеспечения контекста и возможности оценки общей плотности аварийности, на карту были нанесены все происшествия из очищенного набора данных; каждое ДТП отображалось в виде небольшого полупрозрачного синего кругового маркера со всплывающей подсказкой, указывающей категорию инцидента. Поверх этого слоя отображались 50 выявленных аварийно-опасных зон. Каждая зона представлялась красным кругом, центр которого соответствовал координатам центра зоны, а радиус – параметру кластеризации, наглядно демонстрируя ее географический охват. Для обеспечения интерактивности и информативности, каждая зона была снабжена всплывающей подсказкой с ее порядковым номером и детализированным всплывающим окном, отображающим при клике номер зоны, общее количество ДТП в ней и наиболее частую категорию происшествий (рисунок 3).

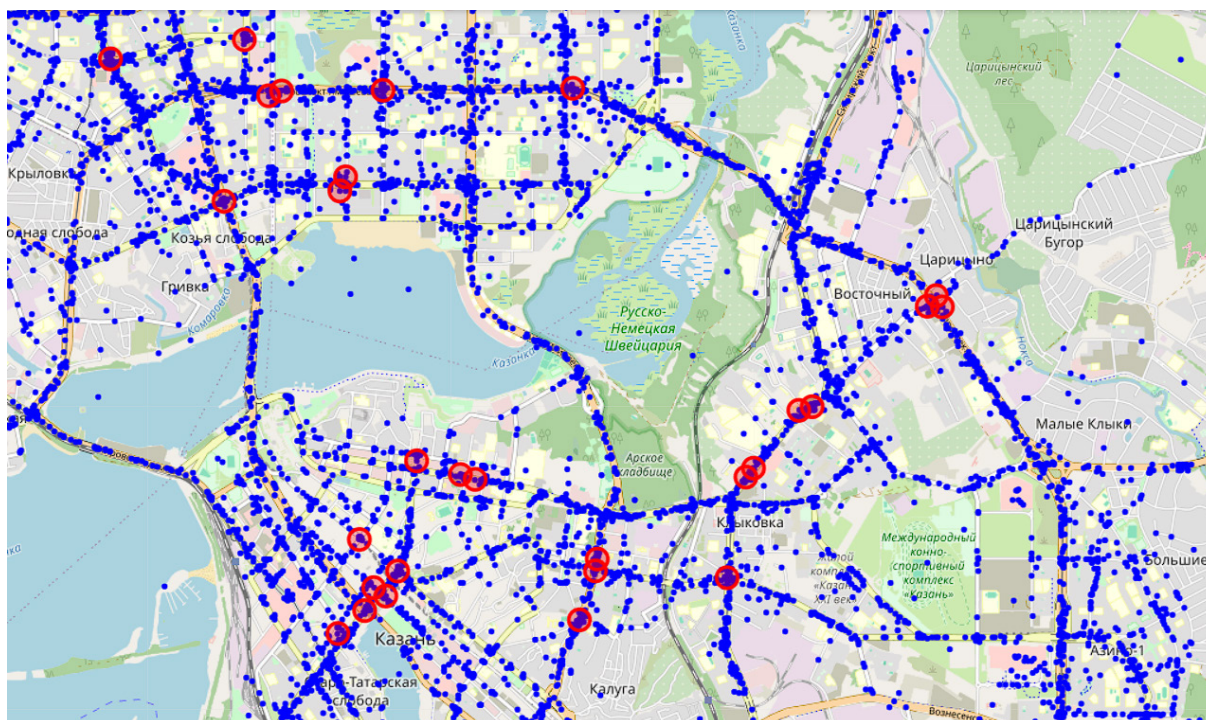


Рисунок 2 – Пространственное распределение аварийно-опасных зон в г. Казани
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Spatial distribution of accident-prone zones in Kazan
Source: compiled by the author.

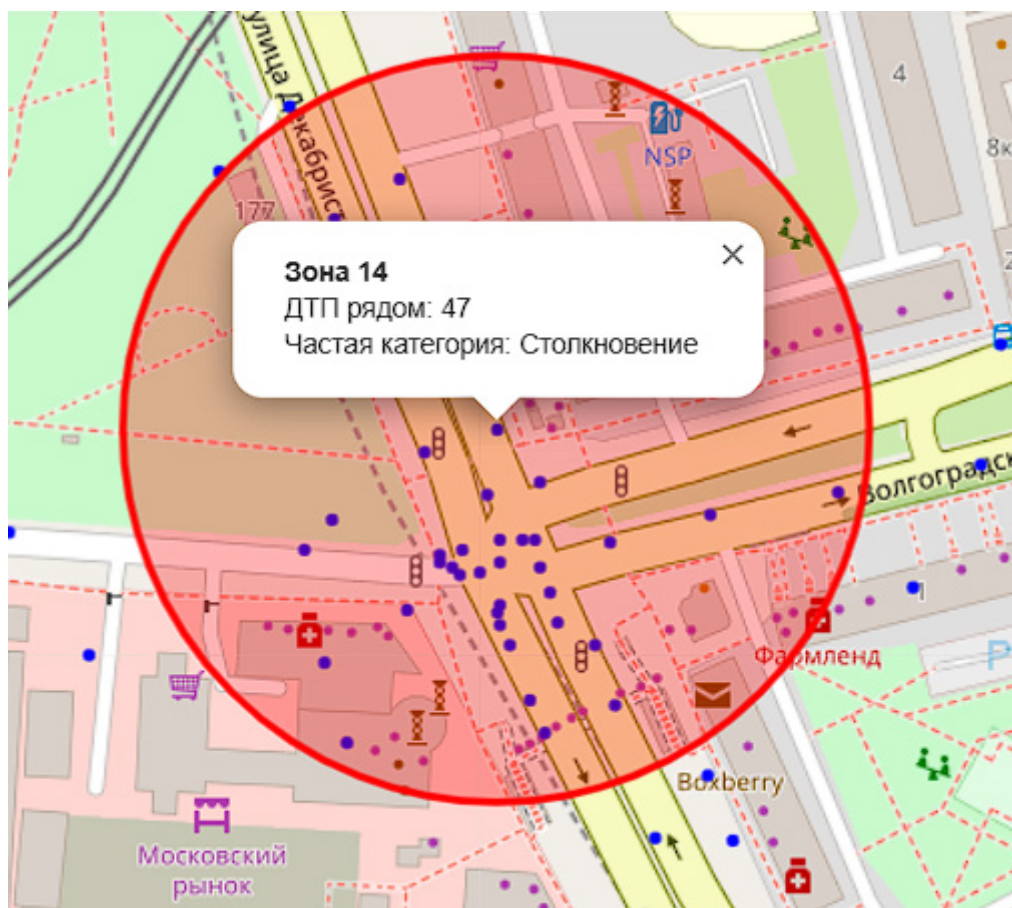


Рисунок 3 – Пример одной зоны и ее свойства
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Example of one zone and its properties
Source: compiled by the author.

Ключевой особенностью разработанного прототипа мобильного приложения является интеграция проактивного анализа аварийно-опасных зон (АОУ) непосредственно в навигационный процесс. После построения маршрута система автоматически проверяет его геометрию на пересечение с заранее выявленными зонами повышенной аварийности. При обнаружении пересечения (расстояние ≤ 100 м) маршрут визуально выделяется желтым цветом, а водителю немедленно направляется текстовое и звуковое предупреждение о потенциальной опасности на пути следования. При входе в опасную зону активируется многоуровневый механизм оповещений (визуальный и аудио), а при выходе из неё – автоматическая деактивация, что минимизирует информационную нагрузку на водителя. Тести-

рование подтвердило точность определения вхождения в зону (98,7%) и своевременность предупреждений с опережением 150–200 м до границы АОУ.

Прототип мобильного приложения успешно прошел тестирование в трех режимах:

1. Статический – отображение аварийно-опасных зон на карте при планировании маршрута.

2. Динамический – генерация предупреждений при приближении к зоне во время движения.

3. Проактивный – изменение цвета маршрута на желтый при пересечении с аварийно-опасной зоной.

Тестирование подтвердило корректность работы алгоритма определения вхождения в аварийно-опасную зону (точность 98,7%) и

своевременность генерации предупреждений (с опережением 150–200 м до границы зоны). Время отклика системы при обработке геоданных в реальном времени составило в среднем 45 мс, что обеспечивает плавную работу приложения без заметных задержек.

Расчет экономического эффекта от внедрения системы предупреждения выполнен на основе методики оценки ущерба от ДТП³. Исходя из данных о снижении аварийности на 3–5% при использовании систем проактивного предупреждения [14], для г. Казани (среднегодовое количество ДТП – 1 850) прогнозируется предотвращение 55–92 происшествий ежегодно.

Средний ущерб от одного ДТП в РФ оценивается в 420 тыс. руб. [15], что позволяет оценить годовой экономический эффект от внедрения системы в 23,1–38,6 млн руб. при капитальных затратах на разработку прототипа в 1,2 млн руб. Экономический эффект от внедрения системы оценивается как потенциальный и составляет 23,1–38,6 млн руб. в год за счет предотвращения 55–92 ДТП. Реализация данного эффекта возможна при интеграции системы в популярные навигационные платформы и достижении значимого охвата пользователей. Конкретные сроки окупаемости зависят от выбранной бизнес-модели (B2G, B2B или B2C) и требуют отдельного маркетингового анализа.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика выявления аварийно-опасных зон на основе пространственной кластеризации демонстрирует высокую эффективность при анализе исторических данных о ДТП. Преимущества подхода:

1. Объективность оценки. Метод устраняет субъективность экспертных оценок за счет использования количественных критериев (радиус, порог плотности).

2. Адаптивность. Параметры кластеризации (радиус, порог) могут настраиваться в зависимости от типа дороги и плотности застройки.

3. Интегрируемость. Формат выходных данных (GeoJSON) обеспечивает совместимость с современными навигационными платформами.

Сравнительный анализ с существующими методами показал, что предложенный подход превосходит традиционные методы «горячих

точек» (kernel density estimation) по интерпретируемости результатов и вычислительной эффективности при обработке больших массивов данных [16, 24, 25, 26, 27].

Практическая значимость работы подтверждена успешной интеграцией результатов в прототип мобильного приложения. Система предупреждений позволяет:

- повысить ситуационную осведомленность водителей о потенциальных рисках на маршруте;
- способствовать выбору более безопасного стиля вождения при приближении к АОУ;
- обеспечить проактивное информирование за счет учета исторической аварийности.

Ограничения исследования связаны с использованием статичного набора данных без учета динамических факторов (текущая загруженность дороги, погодные условия в реальном времени). Перспективы развития включают:

1. Интеграцию данных в реальном времени для динамической корректировки границ АОУ.

2. Применение методов машинного обучения для прогнозирования аварийности с учетом множества факторов.

3. Расширение функционала предупреждений за счет персонализации (учет стиля вождения конкретного водителя).

Таким образом, разработанная методика представляет собой эффективный инструмент для повышения безопасности дорожного движения за счет проактивного выявления и информирования об аварийно-опасных зонах. Результаты исследования могут быть использованы дорожно-эксплуатационными службами для оптимизации распределения ресурсов и разработчиками навигационных сервисов для создания интеллектуальных систем предупреждения водителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Курбатов Д.С., Старостенко А.В. Инновационные подходы к организации дорожного движения на основе цифровых двойников автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2025; 22(5): 772–785. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785
2. Трофименко Ю.В., Шашина Е.В. Влияние человеческого фактора на обеспечение безопасно-

³ Методика оценки и расчета ущерба от дорожно-транспортных происшествий: методические рекомендации. Утверждены Распоряжением Министерства транспорта РФ от 12.12.2020 № АП-196-р. М.: ОАО «НИИАТ», 2020. 35 с.

- сти дорожного движения // Безопасность жизнедеятельности. 2016;1(181):24–27. EDN VIUSCP.
3. Reason J. Human error: models and management. *BMJ*. 2000; 320(7237):768–770. DOI: 10.1136/bmj.320.7237.768
4. Vaa T. Cognition and emotion in driver behaviour models: some critical viewpoints. Institute of Transport Economics. Oslo; 2007. p. 48–59.
5. Ermagun A. Transit access and urban space-time structure of American cities. *Journal of Transport Geography*. 2021;93:103066. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103066
6. Szakonyi P., Makó E. Defining Correlation between the Modal Split of Inhabitants and Students and the Location of Housing Areas and Schools with the Analysis of Travel Plans. *Transportation Research Procedia*. 2014;4:271–285. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.10.007
7. Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е. Индексы для оценки уровня безопасности дорожного движения в регионах России // Вестник СибАДИ. 2025; 22(1): 68–77. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77
8. Якунин Н.Н., Якунина Н.В., Фаттахова А.Ф., Постникова А.А., Янучков М.Р. Методика прогнозирования транспортной потребности населения городов с высоким туристическим потенциалом в пиковые сезоны // Вестник СибАДИ. 2024; 21(2): 256–269. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-2-256-269
9. Акчурин А.В., Кондратова Ю.Н. Определение областей повышенной дорожно-транспортной опасности на карте города с помощью кластеризации данных // Математическое моделирование, компьютерный и натуральный эксперимент в естественных науках. 2023; (4): 45–52.
10. Алексеева А.А., Волчатова И.В. Анализ пространственного распределения ДТП с использованием ГИС-технологий. *Безопасность-2025 // Проблемы техносферной безопасности*. 2025:79.
11. Загидуллин Р.Р. Повышение эффективности дорожного движения динамическим управлением скоростью движения транспортных средств на примере г. Казани // Вестник СибАДИ. 2025; 22(6): 940–951. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-6-940-951
12. Mishra M., Kumar A. ADAS Technology. In: *Advanced Driver Intention Anticipation and Ecodriving Assistance Systems*. CRC Press; 2022. p. 415–435. DOI: 10.1201/9781003048381-21
13. Лазарев Д.А. Многокритериальный метод оценки уровня безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети // Вестник СибАДИ. 2025; 22(6): 952–965. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-6-952-965
14. Aleksa M., Schaub A., Erdelean I. et al. Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials. *European Transport Research Review*. 2024; 16:39. DOI: 10.1186/s12544-024-00654-0
15. Рыбин А.Л., Кретов В.А. Результаты оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности дорожного движения методом выгод и затрат // *Дороги и мосты*. 2020; (1): 46–62.
16. Lin J.L. Generalizing local density for density-based clustering. *Symmetry*. 2021; 13(2): 185. DOI: 10.3390/sym13020185
17. Богданович С.В., Капский Д.В. Анализ возможностей применения методов машинного обучения и анализа больших данных для выявления факторов риска в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры // *Современные технологии в транспортной отрасли*. 2024:114–117. EDN UJTJHC.
18. Неволин Д.Г., Цариков А.А., Сорогин И.Г. Сезонная неравномерность дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Свердловской области // *Автомобилестроение и автомобильный транспорт*. 2023;2:4–10. EDN SBFNTB.
19. Zervou M. *Python Data Cleaning and Preparation Best Practices*. Birmingham: Packt Publishing; 2024. 456 p.
20. Suma K.G., Sunitha G., Avaniya J., Galey M.G., Varna C.P. *Geospatial Data Visualization With Folium*. In: *Geospatial Application Development Using Python Programming*. IGI Global; 2024. p. 187–208.
21. Гиниятов Ч.Р. Как машинное обучение и анализ данных меняют подход к безопасности дорожного движения // *Образование, наука и инновации: современные вызовы*. 2025: 115–117. EDN WJIQK.
22. Симакова А.Е., Сыркин И.С. Использование API Яндекс.Карт // *Россия молодая*. 2022:3291–3295.
23. Adnan M., Tayyab M., Ahmad H.M.W., Imran M., Anjum M.N. The impact of road safety education on young drivers' behavior and attitudes: A systematic review and meta-analysis. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2025;109:94–112. DOI: 10.1016/j.trf.2024.11.025
24. Evtuykov S.S., Brylev I.S., Blinder M.M. Assessment of the impact of the cycling infrastructure of the city on the road safety of cyclists. *World of Transport and Technological Machines*. 2022; 3-2(78): 76–84. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-2(78)-3-76-84
25. Novikov A.N., Eremin S.V., Lomakin D.O. Assessment of road safety at the regional level. *World of Transport and Technological Machines*. 2020; 3(70): 72–79. DOI: 10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79
26. Сильянов В.В., Капитанов В.Т., Моница О.Ю., Чубуков А.Б. Прогноз числа погибших в ДТП на основе социально-экономических показателей // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2017. (4): 4-6.
27. Сурова Л.В. Роль человеческого фактора в обеспечении безопасности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2012; 2(13):64-71. – EDN QZOXZB.

REFERENCES

1. Kurbatov D.S., Starostenko A.V. Innovationnye podhody k organizacii dorozhnogo dvizheniya na osnove cifrovyyh dvojnikov avtomobil'nyh dorog. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*.

- 2025;22(5):772–785. (in Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785
2. Trofimenko Yu.V., Shashina E.V. Vliyanie chelovecheskogo faktora na obespechenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2016;1(181):24–27. EDN VIUSCP. (in Russ.)
3. Reason J. Human error: models and management. *BMJ*. 2000; 320(7237): 768–770. DOI: 10.1136/bmj.320.7237.768
4. Vaa T. Cognition and emotion in driver behaviour models: some critical viewpoints. *Institute of Transport Economics. Oslo*; 2007. p. 48–59.
5. Ermagun A. Transit access and urban space-time structure of American cities. *Journal of Transport Geography*. 2021;93:103066. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103066
6. Szakonyi P., Makó E. Defining Correlation between the Modal Split of Inhabitants and Students and the Location of Housing Areas and Schools with the Analysis of Travel Plans. *Transportation Research Procedia*. 2014;4:271–285. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.10.007
7. Il'ina I.E., Vitvickij E.E. Indeksy dlya ocenki urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v regionah Rossii. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025;22(1):68–77. (in Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77
8. Yakunin N.N., Yakunina N.V., Fattahova A.F., Postnikova A.A., Yanuchkov M.R. Metodika prognozirovaniya transportnoj potrebnosti naseleniya gorodov s vysokim turisticheskim potencialom v pikovyye sezony. *Vestnik SibADI*. 2024;21(2):256–269. (in Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-2-256-269
9. Akchurin A.V., Kondratova Yu.N. Opreделение oblastey povyshennoj dorozhno-transportnoj opasnosti na karte goroda s pomoshch'yu klasterizatsii dannyh. *Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternyj i natural'nyj eksperiment v estestvennyh naukah*. 2023;(4):45–52. (in Russ.)
10. Alekseeva A.A., Volchatova I.V. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya DTP s ispol'zovaniem GIS-tehnologij. *Bezopasnost'–2025. Problemy tekhnosfernoj bezopasnosti*. 2025:79. (in Russ.)
11. Zagidullin R.R. Povysheniye effektivnosti dorozhnogo dvizheniya dinamicheskim upravleniyem skorosti dvizheniya transportnyh sredstv na primere g. Kazani. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025;22(6):940–951. (in Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-6-940-951
12. Mishra M., Kumar A. ADAS Technology. In: *Advanced Driver Intention Anticipation and Ecodriving Assistance Systems*. CRC Press; 2022. p. 415–435. DOI: 10.1201/9781003048381-21
13. Lazarev D.A. Mnogokriterial'nyj metod ocenki urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na uchastke ulichno-dorozhnoj seti. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(6): 952–965. (in Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-6-952-965
14. Aleksa M., Schaub A., Erdelean I. et al. Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials. *European Transport Research Review*. 2024; 16:39. DOI: 10.1186/s12544-024-00654-0
15. Rybin A.L., Kretov V.A. Rezul'taty ocenki effektivnosti meropriyatij po povysheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya metodom vygod i zatrat. *Dorogi i mosty*. 2020; (1): 46–62. (in Russ.)
16. Lin J.L. Generalizing local density for density-based clustering. *Symmetry*. 2021; 13(2): 185. DOI: 10.3390/sym13020185
17. Bogdanovich S.V., Kapskij D.V. Analiz vozmozhnostej primeneniya metodov mashinnogo obucheniya i analiza bol'shikh dannyh dlya vyyavleniya faktorov riska v upravlenii bezopasnost'yu dorozhnoj infrastruktury. *Sovremennyye tehnologii v transportnoj otrasi*. 2024:114–117. EDN UJTJHC. (in Russ.)
18. Nevolin D.G., Carikov A.A., Sorogin I.G. Sezonnaya neravnomernost' dorozhno-transportnyh proisshestvij na avtomobil'nyh dorogah Sverdlovskoj oblasti. *Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyj transport*. 2023;2:4–10. EDN SBFNTB. (in Russ.)
19. Zervou M. Python Data Cleaning and Preparation Best Practices. Birmingham: Packt Publishing; 2024. 456 p.
20. Suma K.G., Sunitha G., Avaniya J., Galeaty M.G., Varna C.P. Geospatial Data Visualization With Folium. In: *Geospatial Application Development Using Python Programming*. IGI Global; 2024. p. 187–208.
21. Giniyatov Ch.R. Kak mashinnoye obucheniye i analiz dannyh menyayut podhod k bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. *Obrazovaniye, nauka i innovacii: sovremennyye vyzovy*. 2025:115–117. EDN WJIQ GK. (in Russ.)
22. Simakova A.E., Syrkin I.S. Ispol'zovaniye API Yandex.Kart. *Rossiya molodaya*. 2022:3291–3295. (in Russ.)
23. Adnan M., Tayyab M., Ahmad H.M.W., Imran M., Anjum M.N. The impact of road safety education on young drivers' behavior and attitudes: A systematic review and meta-analysis. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2025; 109: 94–112. DOI: 10.1016/j.trf.2024.11.025
24. Evtyukov S.S., Brylev I.S., Blinder M.M. Assessment of the impact of the cycling infrastructure of the city on the road safety of cyclists. *World of Transport and Technological Machines*. 2022; 3-2(78): 76–84. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-2(78)-3-76-84
25. Novikov A.N., Eremin S.V., Lomakin D.O. Assessment of road safety at the regional level. *World of Transport and Technological Machines*. 2020; 3(70): 72–79. DOI: 10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79
26. Sil'yanov V.V., Kapitanov V.T., Monina O.Yu., Chubukov A.B. Prognoz chisla pogibshih v DTP na osnove social'no-ekonomicheskikh pokazatelej. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasi*. 2017; (4): 4–6. (in Russ.)
27. Surova L.V. Rol' chelovecheskogo faktora v obespechenii bezopasnosti [The role of the human factor in safety assurance]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2012; 2(13): 64–71. EDN QZXOZB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хамитов Ренат Минзашарифович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Информационные технологии и интеллектуальные системы» Казанского государственного энергетического университета (420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9949-4404>,
SPIN-код: 7401-9166, **AuthorID:** 464622,
Scopus Author ID: 57222149321,
Researcher ID: ADQ-3954-2022,
e-mail: hamitov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Khamitov Renat M. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Information Technologies and Intelligent Systems Department, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9949-4404>,
SPIN-code: 7401-9166,
Author ID: 464622,
Scopus Author ID: 57222149321,
Researcher ID: ADQ-3954-2022,
e-mail: hamitov@gmail.com

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>
EDN: KHGPFE



ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАКРОСКОПИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

И.И. Тараховский¹, А.Ю. Михайлов² ✉

¹ООО «КВАНТ ИНЖИНИРИНГ»,
г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

✉ ответственный автор
89148701840@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Действующие в Российской Федерации методические рекомендации по выполнению мониторинга дорожного движения не содержат детальные рекомендации по использованию детекторов транспорта, хотя предусматривают их применение. Эффективному применению детекторов транспорта препятствует недостаток знаний о возможностях эмпирической оценки параметров макроскопических моделей транспортного потока. В статье рассматриваются методы определения моделей макроскопической фундаментальной диаграммы и значений ее параметров на основе данных, поступающих от стационарных радиолокационных детекторов.

Цель исследования. Автоматизация оценки уровня обслуживания транспортных потоков в режиме реального времени и разработка практических рекомендаций по обработке данных, поступающих от радиолокационных детекторов.

Объект исследования. Процесс мониторинга дорожного движения.

Предмет исследования. Модели макроскопической диаграммы и их параметры, определяемые на основе данных, поступающих от радиолокационных детекторов.

Методика исследования. Исследованы режимы непрерывного движения на автомобильных дорогах II технической категории – подходах к г. Иркутску. Мониторинг выполнялся с применением стационарных радиолокационных детекторов. Интенсивность движения и средняя временная скорость определялись с периодом агрегации 5 мин. Плотность транспортного потока оценивалась как отношение интенсивности к скорости.

Результаты. Экспериментально установлена необходимость применения макроскопических моделей первого и второго порядков при обработке данных, поступающих от детекторов, что является важнейшим результатом начального этапа исследований. Получены данные, характеризующие зависимости скорость-плотность и интенсивность-плотность для полос движения, размещенных на горизонтальных участках, для полос движения на спуск, полос движения на подъем. Сформулированы задачи дальнейших исследований по разработке методики обработки данных радиолокационных детекторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стационарные радиолокационные детекторы, макроскопическая диаграмма транспортного потока, зависимость скорость-плотность, одно- и многорежимные модели

Статья поступила в редакцию 20.01.2026; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Тараховский И.И., Михайлов А.Ю. Обоснование выбора макроскопических моделей транспортного потока для мониторинга дорожного движения // *Вестник СибАДИ*. 2026. Т. 23, № 2. С. 254-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>

© Тараховский И.И., Михайлов А.Ю., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>
EDN: KHGPF

ON THE CHOICE OF MACROSCOPIC TRAFFIC FLOW MODELS FOR TRAFFIC MONITORING

Igor I. Tarakhovsky¹, Alexander Yu. Mikhailov² ✉

¹Kvantex LLC,
Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

✉ corresponding author
89148701840@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Current guidelines for road traffic monitoring in the Russian Federation do not contain detailed recommendations for the use of traffic detectors, although the rules do stipulate their use. Effective application of traffic detectors is hampered by a lack of knowledge about the empirical evaluation of macroscopic traffic flow model parameters. This article discusses methods for determining macroscopic fundamental diagram models and their parameter values based on data from stationary radar detectors.

The aim of the study. Is related to automation of real-time traffic flow service level assessment and development of practical recommendations for processing data from radar detectors. The research has been focused on road traffic monitoring, in particular, macroscopic diagram models and their parameters determined from the data of radar detectors.

Research Methodology. Uninterrupted traffic conditions on roads of category II approaching Irkutsk have been studied. Stationary radar detectors have been used during monitoring. Traffic volumes and average time speed were determined with a 5-minute aggregation period. Traffic density was estimated as the ratio of traffic volume to speed.

Results. The need for first- and second-order macroscopic models in processing data from detectors has been experimentally proved, which is a key result of the initial research stage. Data characterizing the speed-density and intensity-density relationships for traffic lanes located on horizontal sections, for downhill traffic lanes, and for uphill traffic lanes have been obtained. Objectives for further research to develop a method for processing radar detector data have been specified.

KEYWORDS: traffic monitoring, radar detectors, macroscopic traffic flow diagram, speed-density relationship, single- and multi-mode macroscopic models

The article was submitted: January 20, 2025; approved after reviewing: March 19, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Tarakhovsky I.I., Mikhailov A.Yu. On the choice of macroscopic traffic flow models for traffic monitoring. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 254-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>

© Tarakhovsky Igor I., Mikhailov Alexander Yu., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения»¹ формулируются требования к мониторингу дорожного движения, при этом предусматривается использование ГЛОНАСС и GPS треков и детекторов транспорта. В документе подробно изложена методика оценки основных параметров транспортных потоков с применением треков, но не содержатся детальные указания по использованию данных, поступающих от детекторов транспорта. Вместе с тем количество используемых в РФ детекторов транспорта разных типов непрерывно растет. Так, в 2025 г. на территории Иркутской агломерации уже функционирует 40 детекторов транспорта.

Важным достоинством транспортных детекторов является возможность непрерывного получения в режиме реального времени данных о состоянии транспортных потоков. Важно, что поступающие в процессе мониторинга данные позволяют формировать и анализировать статистически репрезентативные выборки данных. Такие данные после математической обработки могут использоваться:

- для определения скорости потока в свободных условиях;
- определения критических значений скорости и плотности потока, при которых наблюдается максимальная интенсивность движения (т.е. пропускная способность);
- оценки уровня обслуживания транспортного потока в режиме реального времени как отношения текущего значения скорости потока к скорости потока в свободных условиях или как отношения интенсивности движения к пропускной способности (т.е. автоматизации оценки качества дорожного движения).

Для определения значений перечисленных выше характеристик необходимо устанавливать тип уравнения макроскопической диаграммы и оценивать значения параметров, входящих в состав уравнения. В нашей стра-

не публиковались работы, рассматривающие свойства фундаментальной макроскопической диаграммы транспортного потока [1,2], а также рассматривающие отдельные задачи практического ее применения [3]. Вместе с тем отмечаются единичные случаи публикаций по определению макроскопической диаграммы на основе данных, поступающих от детекторов². В этой связи ООО «КВАНТ ИНЖИНИРИНГ» (г. Иркутск) и Иркутский национальный исследовательский технический университет приступили к совместным исследованиям, целью которых являются [4,5]:

- автоматизация оценки уровня обслуживания транспортных потоков в режиме реального времени;
- разработка практических рекомендаций по обработке данных, поступающих с радиолокационных детекторов.

Цели исследования требуют последовательно решения целого ряда теоретических и экспериментальных задач. В рамках впервые выполняемого исследования предстоит определить условия, при которых следует применять модели первого порядка³ (first order models или single regime models) и модели второго порядка (second order models или multi regime models). Основанием для применения мультирежимных моделей является наличие в потоке кластеров, характеризующих разные режимы движения [6, 7, 8].

Особенностью стационарных радиолокационных детекторов является то, что они измеряют интенсивность движения и скорость движения в сечении потока, т.е. определяется средняя временная скорость \bar{v}_t , которая является смещенной оценкой средней пространственной скорости \bar{v}_s . Wardrop J.⁴ в 1952 г. установил зависимость, связывающую среднюю временную и среднюю пространственную \bar{v}_s скорости

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \sigma_s^2 / \bar{v}_s, \quad (1)$$

где σ_s^2 – дисперсия средней пространственной скорости \bar{v}_s .

¹ «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения» утверждены распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/489281> (дата обращения: 28.10.2025).

² Морозов В.В. Влияние концентрации транспортного потока на интенсивность движения автомобилей в городах (на примере г. Тюмени): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Морозов Вячеслав Валерьевич. Оренбург, 2020, 18 с.

³ Fundamental relations of traffic flow. Lecture notes in Transportation Systems Engineering. https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/1100_LnTse/502_InTse/plain/plain.htm

⁴ Wardrop J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1952. Part II. 1. pp. 325–378.

Позднее ряд авторов Coifman B., Lyddy D. и Skabardonis A.⁵, Rakha H. и Zhang W.⁶ предложили более удобную для практического применения зависимость

$$\bar{v}_s \approx \bar{v}_t - \sigma_t^2 / \bar{v}_t, \quad (2)$$

где σ_t^2 – дисперсия средней временной скорости \bar{v}_t .

В работах указанных выше авторов и ряде других статей [9, 10, 11] рассматривалось применение петлевых (индукционных) детекторов. Поэтому в настоящем исследовании еще предстоит установить зависимость влияния интенсивности движения на дисперсию средней временной скорости для разных дорожных условий.

Результаты ранее выполненных исследований [12, 13, 14, 15] показывают, что в силу разнообразия режимов движения транспортных потоков при определении уравнения макроскопической диаграммы и ее характеристик отдельно рассматриваются случаи:

- непрерывного движения на двухполосных дорогах;
- непрерывного движения на многополосных магистральных дорогах;
- прерываемое движение на городских

улицах и дорогах (воздействие светофорных объектов).

Учитывая это, принято решение – на начальном этапе многостадийного исследования рассмотреть случай непрерывного движения на двухполосных автомобильных дорогах общего пользования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнено исследование режимов непрерывного движения на трех участках дорог II технической категории – Култукский тракт и «Иркутск – Усть-Ордынский», на которых в пиковые часы наблюдается суммарная интенсивность в обоих направлениях – 2400–3000 авт/ч. Выбранные участки, расположенные на подходах к г. Иркутску, отличаются геометрическими параметрами и позволяют рассматривать максимально широкий диапазон значений интенсивности движения, наблюдающийся на дорогах II технической категории. Мониторинг дорожного движения выполнялся с применением стационарных радиолокационных детекторов. Интенсивность движения (авт/ч) и средняя временная скорость (км/ч) определялись с периодом агрегации 5 мин в отдельности для каждой полосы (рисунок 1).

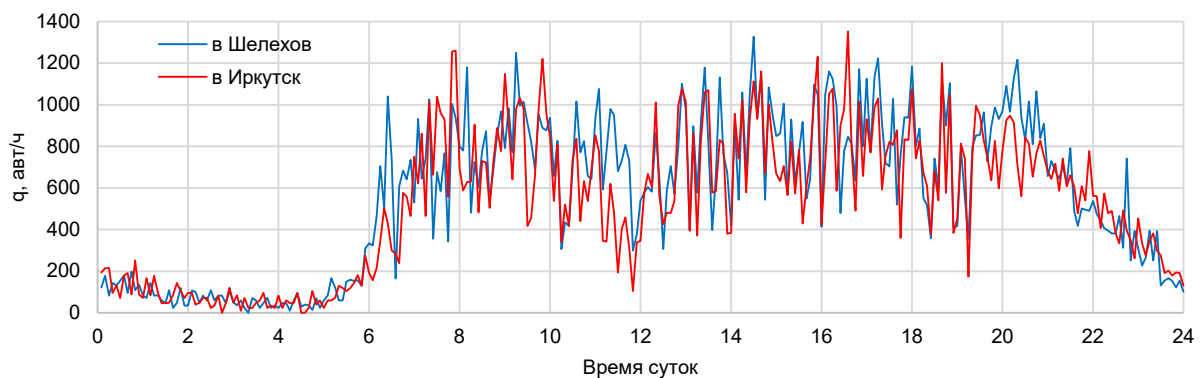


Рисунок 1 – Суточные данные мониторинга интенсивности движения: Култукский тракт, ост. Луговое 24.05.14
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Daily traffic monitoring data: Kultuisky tract, Lugovoe bus stop, May 24, 2014
Source: compiled by the authors.

⁵Coifman B., Lyddy D., Skabardonis A. The Berkeley Highway Laboratory–Building on the I-880 Field Experiment. Proc. IEEE ITS Council Annual Meeting. 2000. pp. 5–10.

⁶Rakha H., Zhang W. Estimating traffic stream space-mean speed and reliability from dual and single loop detectors. Transportation Research Record. 2005. No. 1925. pp. 38–47.

Плотность транспортного потока k в каждый период агрегации оценивалась как отношение интенсивности q к скорости v_t

$$k = q/v_t. \quad (3)$$

Представленный вариант оценки плотности потока (3) предусматривается указаниями по выполнению мониторинга нашей страны⁷ и США⁸.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты следует рассматривать как предварительные, поскольку на их основе будут формулироваться задачи последующих этапов исследования. Зависимости скорость-плотность и интенсивность-скорость, полученные по данным трех рассмотренных участков, представлены в таблице 1. При этом на участке а/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 отдельно рассмотрены зависимости для левой и правой полосы движения на подъеме.

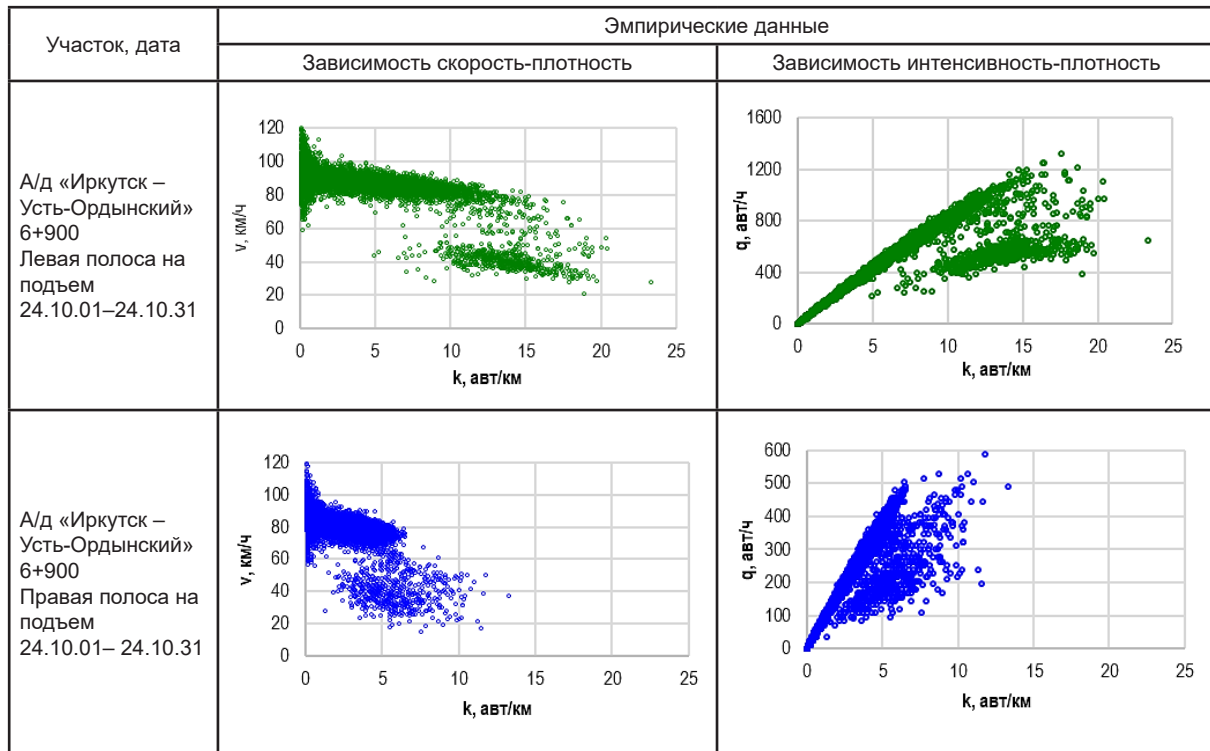
Таблица 1
Примеры данных мониторинга
Источник: составлено авторами.

Table 1
Monitoring data
Source: compiled by the authors.

Участок, дата	Эмпирические данные	
	Зависимость скорость-плотность	Зависимость интенсивность-плотность
Култукский тракт ост. Луговое горизонтальный участок 24.05.13 –24.05.20		
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» Примыкание СНТ Мечта Горизонтальный участок 24.10.01– 24.10.31		
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 Полоса на спуск, отделенная сплошной разметкой 24.10.01– 24.10.31		

⁷ «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения» утверждены распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/489281> (дата обращения: 28.10.2025)

⁸ Density Calculation from Detector Data. URL: <https://data.dot.state.mn.us/datatools/Density.html> (дата обращения: 28.10.2025)



Представленные в таблице 1 данные убедительно иллюстрируют различия характеристик транспортных потоков на рассмотренных участках. Отличаются как диаграммы скорость-плотность, так и интенсивность-скорость, что указывает на уникальность характеристик транспортного потока в каждом рассматриваемом случае. Поскольку для определения аналитического уравнения ма-

кроскопической диаграммы используется зависимость скорости от плотности [16, 17, 18, 19, 20, 21], для этих зависимостей был выполнен регрессионный анализ. Только для трех случаев из пяти, представленных в таблице 1, были получены регрессионные зависимости с коэффициентом детерминации более 0,5 (таблица 2).

Таблица 2

Уравнения регрессии зависимости скорость-плотность
Источник: составлено авторами.

Table 2

Regression equations for the velocity-density relationship
Source: compiled by the authors.

Участок, дата	Уравнение регрессии	R ²	Зависимость/предполагаемая модель
Култукский тракт ост. Луговое Горизонтальный участок 24.05.13 – 24.05.20	$v = 62,648 - 0,8173 k$	0,8119	Линейная / Greenshields model
	$v = 65,757e^{-0,02k}$	0,8078	Экспоненциальная / Underwood model
	$v = 66,246 - 7,788 \ln(k)$	0,5539	Логарифмическая / Greenberg model
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» Примыкание СНТ Мечта Горизонтальный участок 24.10.01 – 24.10.31	$v = 67,029e^{-1,5283 k}$	0,5560	Линейная / Greenshields model
	$v = 69,024e^{-0,035k}$	0,5900	Экспоненциальная / Underwood model
	$v = 65,948 - 7,248 \ln(k)$	0,4724	Логарифмическая / Greenberg model
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 Полоса на спуск, отделенная сплошной разметкой 24.10.01 – 24.10.31	$v = 86,043 - 1,4379 k$	0,6367	Линейная / Greenshields model
	$v = 86,482e^{-0,02k}$	0,6455	Экспоненциальная / Underwood model
	$v = 85,26 - 6,766 \ln(k)$	0,5717	Логарифмическая / Greenberg model

На участке движения на подъем (см. таблицу 1) у каждой из полос на диаграммах скорость-плотность и интенсивность-скорость наблюдается не разброс данных, а разделение данных на две группы, что указывает на наличие в потоке кластеров [6, 7, 8] и уже исключает применение моделей первого порядка.

ОБСУЖДЕНИЕ

Разнообразие данных, полученных даже всего на трех участках (см. таблицы 1 и 2), позволяют утверждать, что характеристики макроскопической диаграммы транспортного потока должны определяться отдельно для каждого участка размещения стационарного детектора. В этой связи в продолжающихся исследованиях необходимо выполнить:

- теоретическое обоснование методов и критериев выбора вида однорежимных (т.е. первого порядка) и многорежимных моделей (моделей второго порядка), а также методов оценки значений параметров этих моделей;
- экспериментальное тестирование выбранных методов с использованием данных, собранных на участках, отличающихся условиями дорожного движения.

Модели первого порядка более просты в практическом применении, что является их преимуществом. За долгий период развития теории транспортных потоков разработано более пятнадцати моделей первого порядка, представленных в работах Underwood R.T.⁹, Castillo J.M.D. и Benítez F.G.¹⁰, а также в более поздних публикациях [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], наиболее распространенные из них приведены в таблице 3 и сгруппированы не в хронологическом порядке, а по характеру положенных в основу зависимостей и параметров:

v_f – скорость потока в свободных условиях;
 k_j – максимальная плотность (плотность транспортного потока);

v_f и k_c – критическая скорость и оптимальная плотность, при которых наблюдается максимальная интенсивность движения (т.е. достигается пропускная способность);

n, m, a – параметры калибровки моделей.

Сопоставление полученных регрессионных моделей (см. таблицу 2) и уравнений скорость-плотность (см. таблицу 3) позволяет сделать вывод, что для рассмотренных горизонтальных участков и полосы движения на спуск параметры потоков следует определять с использованием моделей Андервуда и Гриншильдса (таблица 4). Полученные результаты позволяют осуществлять оценку уровня обслуживания (коэффициента скорости) в каждый период агрегации данных как отношение текущего значения скорости к скорости потока в свободных условиях.

Полученные результаты (см. таблицы 1 и 2) позволяют сформулировать важный вывод. Модели первого порядка не всегда применимы, что демонстрируют данные, полученные для движения на подъем на участке а/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 (см. таблицу 1). Критерием необходимости применения мультирежимных моделей является невозможность качественной аппроксимации зависимости скорость-плотность одним уравнением регрессии на всем диапазоне значений плотности потока.

В публикациях Drake J.S., Schofer J.L. и May, A.D.¹¹, Easa S.M.¹², Romanowska A. и Jamroz K. [21], посвященных макроскопической диаграмме транспортного потока, мультирежимные модели рассматриваются как комбинации линейных и нелинейных моделей (рисунок 2).

⁹ Underwood, R.T. Speed, volume and density relationships. In Quality and Theory of traffic Flow. Bureau of Highway Traffic, Yale University: New Haven, CT, USA. 1960. pp. 141–188.

¹⁰ Castillo, J.M.D.; Benítez, F.G. On the functional form of the speed-density relationship—I: General theory. Transp. Res. Part B Methodol. 1995. 29. pp. 373–389.

¹¹ Drake J.S.; Schofer, J.L.; May, A.D. A statistical analysis of speed density hypotheses. Highw. Res. Rec. 1966. 154. pp. 53–87.

¹² Easa S.M. Selecting Two-Regime Traffic-Flow Models/ Transportation Research Record .1982. vol.869. pp. 25–36.

Таблица 3
Уравнения скорость-плотность моделей первого порядка
Источник: составлено авторами.

Table 3
Velocity-density equations for the first-order models
Source: compiled by the authors.

Модели	Уравнение скорость-плотность	Параметры модели
Greenshields	$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)$	v_f, k_j
Pipes	$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)^n$	v_f, k_j
Drew	$v = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^n\right]$	v_f, k_j, n
May – Keller	$v = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^{n \cdot m}\right]$	v_f, k_j, n, m
Greenberg	$v = v_f \ln \left(\frac{k_j}{k}\right)$	v_f, k_j
Underwood	$v = v_f \exp \left(-\frac{k}{k_c}\right)$	v_f, k_c
Northwestern	$v = v_f \exp \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^2\right]$	v_f, k_j
Newell	$v = v_f \left\{1 - \exp \left[-\frac{a}{v_f} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_j}\right)\right]\right\}$	v_f, k_j, a

Таблица 4
Уравнения скорость-плотность моделей первого порядка
Источник: составлено авторами.

Table 4
Velocity-density equations for the first-order models
Source: compiled by the authors.

Участок	Параметры потока	Уравнение скорость-плотность	Уравнение интенсивность-плотность	Уровень обслуживания
Култукский тракт, ост. Луговое Горизонтальный участок	$v_f=62,65$ $k_j=76,68$	$v = 62,648 - 0,8173 k$	$q = k (62,648 - 0,8173 k)$	$\frac{v}{62,65}$
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» Примыкание СНТ «Мечта». Горизонтальный участок	$v_f=62,02$ $k_c=28,57$	$v = 69,024e^{-0,035k}$	$q = k 69,024e^{-0,035k}$	$\frac{v}{62,02}$
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 Полоса на спуск, отделенная сплошной разметкой	$v_f=86,48$ $k=28,57$	$v = 86,482e^{-0,02k}$	$q = k 86,482e^{-0,02k}$	$\frac{v}{86,65}$

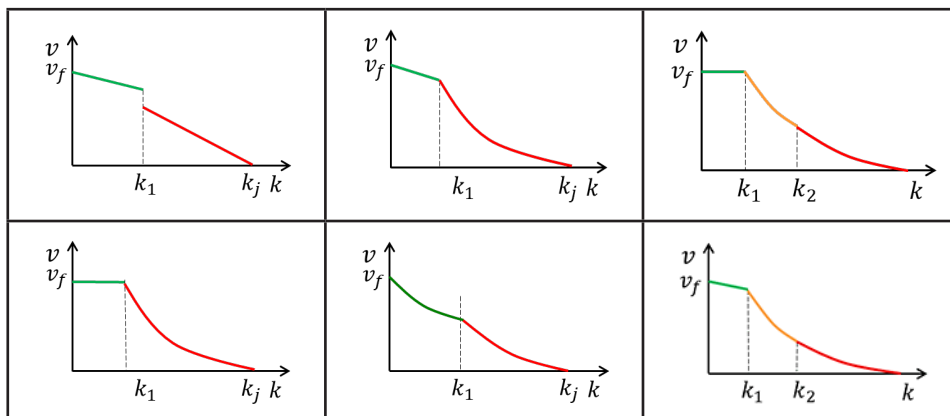


Рисунок 2 – Мультирежимные зависимости скорость-плотность: k_1 и k_2 – значения плотности, при которых происходит изменение режима движения потока
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Multi-regime speed-density models: k_1 and k_2 – critical density values for the traffic flow regime change
 Source: compiled by the authors.

Таблица 5
 Мультирежимные модели скорость-плотность
 Источник: Wang H., Chen Q-Y., Ni D. [22].

Table 5
 Multi-regime speed-density models
 Source: Wang H., Chen Q-Y., Ni D. [22].

Мультирежимные модели	Состояние потока / режим движения		
	Свободный поток	Транзитное состояние	Напряженный поток
Edie model	$v = 54,9 \ln e^{\left(\frac{-k}{163,9}\right)} (k \leq 50)$...	$v = 26,8 \ln\left(\frac{145,5}{k}\right) (k \geq 0,35)$
Линейная модель с двумя режимами	$v = 60,9 - 0,51k (k \leq 65)$...	$v = 40,0 - 0,265k (k \geq 0,65)$
Modified Greenberg model	$v = 48k (k \leq 35)$...	$v = 32 \ln\left(\frac{145,5}{k}\right) (k \geq 0,35)$
Линейная модель с тремя режимами	$v = 50,0 - 0,098k (k \leq 40)$	$v = 81,4 - 0,91k (40 \leq k \leq 65)$	$v = 40,0 - 0,265k (k \geq 0,65)$

Анализ литературы по тематике исследования Sun L., Zhou J.¹³, Wang H. и др. [22] показал, что для определения уравнений и значений плотности, при которых происходит изменения режима движения потока, используется кластерный анализ. Пример оценки двух- и трехрежимных зависимостей скорость-плотность, полученных при исследовании транспортных потоков на магистральных дорогах США, [22] представлен в таблице 2.

Сравнение таблиц 2 и 4 позволяет отметить, что в исследовании Wang H., Chen Q-Y., Ni D. [22] в двух случаях применена линейная мо-

дель Гриншильдса, которая показала достаточно высокое качество аппроксимации данных мониторинга горизонтальных участков и полосы движения на спуск (таблица 5). Вместе с тем модель Гринберга, применённая в двухрежимной модели (Modified Greenberg), во всех трех случаях, рассмотренных в таблице 2, имеет наименьшие значения коэффициента детерминации. Это позволяет делать вывод, что при рассмотрении данных о движении транспортных потоков на двухполосных дорогах и магистральных многополосных дорогах могут получаться разные макроэкономические модели.

¹³ Sun, L., Zhou, J., Development of multiregime speed-density relationships by cluster analysis. Transportation Research Record. 2005. 1934. pp. 64–71.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшим результатом этого этапа исследований является установленный факт, что при выполнении мониторинга возникает необходимость применения как моделей первого порядка, так и многорежимных моделей. Критерием необходимости применения мультимодальных моделей является невозможность аппроксимации зависимости скорость-плотность одним уравнением регрессии на всем диапазоне значений плотности потока.

На последующих этапах исследований предстоит:

- установить эмпирические зависимости между средней временной скоростью и средней пространственной скоростью;
- выполнить с применением кластерного анализа обработку примеров данных, которые не аппроксимируются моделями первого порядка;
- оценить влияние длительности периода агрегации (5, 10 и 15 мин) на качество аппроксимации данных, поступающих с детекторов;
- определить репрезентативный объем выборки (данные за сутки, данные за неделю, данные за месяц), обеспечивающий статистически надежную оценку зависимостей, входящих в состав моделей первого порядка и мультимодальных моделей;
- оценить влияние погодных условий на параметры транспортного потока: скорость потока в свободных условиях, критические скорость и плотность потока.

Решение перечисленных выше задач позволит разработать практические рекомендации по выполнению мониторинга транспортных потоков с применением радиолокационных детекторов.

Представляется важным осуществлять централизованное накопление и систематизацию данных мониторинга с использованием детекторов транспорта. Это позволит на основе актуальных данных разрабатывать на федеральном уровне методические документы в области оценки пропускной способности автомобильных дорог общего пользования и улично-дорожных сетей городов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зырянов В.В. Особенности применения основной диаграммы транспортного потока на сетевом уровне // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. Волгоградский государственный технический университет. 2013. С. 71–74. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102>.
2. Zyryanov V.V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066049
3. Цзянг Х. Оптимизация дорожного движения на основе макроскопической фундаментальной диаграммы в городской двухзональной системе // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 246–257. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257
4. Михайлов А.Ю., Тараховский И.И. Оценка скорости транспортного потока в свободных условиях на основе данных, поступающих от стационарного радиолокационного детектора // Вестник гражданских инженеров. 2025. 5(112). С. 98–110. DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-5-98-110
5. Тараховский И.И., Михайлов А.Ю. Оценка параметров модели Андервуда с использованием данных радиолокационного детектора транспорта // Транспорт Урала. 2025. 4 (87). С. 79–84. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-79-84
6. Cerner B. Three-Phase Traffic Theory and Highway Capacity // Physica A Statistical Mechanics and its Applications. 2004. 333 (1). pp. 379-440 DOI: 10.1016/j.physa.2003.10.017
7. Treiber M., Kesting A., Helbing D. 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). pp. 983-1000. DOI: 10.1016/j.trb.2010.03.004
8. Delle Monache M.L. Chi K.; Chen Y.; Goatin P.; Han K.; Qiu J.; Piccoli B. A Three-Phase Fundamental Diagram from Three-Dimensional Traffic Data // Axioms 2021, 10. 17. DOI: 10.3390/axioms10010017
9. Knoop V., Hoogendoorn S., Van Zuylen H. Empirical differences between time mean speed and space mean speed // Conference proceedings: Traffic and Granular Flow 07. 2007. pp. 351-356.
10. Han J., Polak J.W., Barria J., Krishnan R. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data // Transport. Plann. Tech. 2013. 3(1). pp. 91–104. DOI: 10.1080/03081060903429421.
11. Rakha H., Arafeh M. Calibrating steady-state traffic stream and car-following models using loop detector data // Transp. Sci. 2010. 44. pp.151–168.
12. Jovanovi B., Ševrovi M., Luburi G. Comparative Analysis of Deterministic Fundamental Diagrams Representative of Continuous and Interrupted Traffic Flow on Selected Regional Road in Croatia // Appl. Sci. 2024. 14. 533. DOI: 10.3390/app14020533
13. Bian Z. et al. Two-lane highways: guidance for estimating speed-flow relationships and free-flow speeds from field data // Advances in Transportation Studies. 2025. LXVI. pp. 241-264.
14. Daganzo C. F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 2008. 42(9). pp. 771 – 781. DOI: 10.1016/j.trb.2008.06.008
15. Zhong R. et al. Automatic calibration of fundamental diagram for first-order macroscopic freeway

traffic models // *Journal of Advanced Transportation* 2015. 50(3). pp. 363-385.

16. Gaddam H.K., Rao K.R. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation // *J. Mod. Transport*. 2019. 27(1). pp. 61–74.

17. Bramich D.M., Menéndez M., Ambühl L. Fitting Empirical Fundamental Diagrams of Road Traffic: A Comprehensive Review and Comparison of Models Using an Extensive Data Set // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022. 23., pp. 14104–14127.

18. Taylor N.B. Speed-density Equation Flow-density relationship // *Transportation Research Procedia* 2025. vol. 82. pp.3076–3095.

19. Liu Y. et al. A Flow-Speed Model for Motorways in England: Analysis Under Various Weather Conditions // *Atmosphere*. 2025. 16.117. 15 p. DOI: 10.3390/atmos16020117

20. Chen Y., Lu J. Research on traffic state prediction method based on traffic flow prediction under multi-time granularity // *Scientific Reports*. 2025. vol. 15. Article number: 24317. DOI: 10.1038/s41598-025-10267-9

21. Romanowska A., Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment. // *Appl. Sci.* 2021. 11. 9914. DOI: 10.3390/app11219914

22. Wang H., Li, J. Chen Q.-Y., Ni D. Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship. // *Transportation Research. Part A*. 2011, 45, pp. 554–566. DOI: 10.1016/j.tra.2011.03.010

REFERENCES

1. Zyrjanov V.V. Osobennosti primeneniya osnovnoj diagrammy transportnogo potoka na setevom urovne [Features of the application of the main diagram of the traffic flow at the network level]. *Izvestiya volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: nazemnye transportnye sistemy. Volgogradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet*. 2013: 71-74. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102>.

2. Zyryanov V.V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066049

3. Jiang Haiyan Optimizatsiya dorozhnogo dvizheniya na osnove makroskopicheckoy fundamental' noy diagrammy v gorodskoy dvukhzonol'noy sisteme [Traffic optimization based on a macroscopic fundamental diagram in urban bizonal system]. *Vestnik SibADI*. 2022. 19 (2). pp. 246-257. (in Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257

4. Mikhaylov A.Yu., Tarakhovskiy I.I. Otsenka skorosti transportnogo potoka v svobodnykh usloviyakh na osnove dannyykh, postupayushchikh ot stacionarnogo radiolokatsionnogo detektora [Estimation of the speed of traffic flow in free conditions based on data received from a stationary radar detector]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2025. 5 (112). C. 98-110. DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-5-98-110

5. Tarakhovskiy I.I., Mikhaylov A.Yu. Otsenka parametrov modeli andervuda s ispol'zovaniyem dannyykh radiolokatsionnogo detektora transporta [Estimation of the parameters of the Underwood model using data from a radar transport detector]. *Transport Urala*. 2025. 4 (87). C. 79-84. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-79-84

6. Cerner B. Three-Phase Traffic Theory and Highway Capacity. *Physica A Statistical Mechanics and its Applications*. 2004. 333 (1). pp. 379-440 DOI: 10.1016/j.physa.2003.10.017

7. Treiber M., Kesting A., Helbing D. 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). pp. 983-1000. DOI: 10.1016/j.trb.2010.03.004

8. Delle Monache M.L. Chi K.; Chen Y.; Goatin P.; Han K.; Qiu J.; Piccoli B. A Three-Phase Fundamental Diagram from Three-Dimensional Traffic Data. *Axioms* 2021, 10. 17. DOI: 10.3390/axioms10010017

9. Knoop V., Hoogendoorn S., Van Zuylen H. Empirical differences between time mean speed and space mean speed. *Conference proceedings: Traffic and Granular Flow 07*. 2007. pp. 351-356.

10. Han J., Polak J.W., Barria J., Krishnan R. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data. *Transport. Plann. Tech.* 2013. 3(1). pp. 91–104. DOI: 10.1080/03081060903429421

11. Rakha H.; Arafah M. Calibrating steady-state traffic stream and car-following models using loop detector data. *Transp. Sci.* 2010. 44. pp.151–168.

12. Jovanovi B., Ševrovi M., Luburi G. Comparative Analysis of Deterministic Fundamental Diagrams Representative of Continuous and Interrupted Traffic Flow on Selected Regional Road in Croatia. *Appl. Sci.* 2024. 14. 533. DOI: 10.3390/app14020533

13. Bian Z. et al. Two-lane highways: guidance for estimating speed-flow relationships and free-flow speeds from field data. *Advances in Transportation Studies*. 2025. LXVI. pp. 241-264.

14. Daganzo C.F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2008. 42(9). pp. 771 – 781. DOI: 10.1016/j.trb.2008.06.008

15. Zhong R. et al. Automatic calibration of fundamental diagram for first-order macroscopic freeway traffic models. *Journal of Advanced Transportation* 2015. 50(3). pp. 363-385.

16. Gaddam H.K., Rao K.R. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation. *J. Mod. Transport*. 2019. 27(1). pp. 61–74.

17. Bramich D.M.; Menéndez M.; Ambühl L. Fitting Empirical Fundamental Diagrams of Road Traffic: A Comprehensive Review and Comparison of Models Using an Extensive Data Set. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022. 23., pp. 14104–14127.

18. Taylor N.B. Speed-density Equation Flow-density relationship. *Transportation Research Procedia* 2025. vol. 82. pp.3076–3095.

19. Liu Y. et al. A Flow-Speed Model for Motorways in England: Analysis Under Various Weather Conditions. *Atmosphere*. 2025. 16.117. 15 p. DOI: 10.3390/atmos16020117

20. Chen Y., Lu J. Research on traffic state prediction method based on traffic flow prediction under multi-time granularity. *Scientific Reports*. 2025. vol. 15. Article number: 24317. DOI: 10.1038/s41598-025-10267-9

21. Romanowska A., Jamroz, K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment. *Appl. Sci*. 2021. 11. 9914. DOI: 10.3390/app11219914

22. Wang H., Li, J. Chen Q.-Y., Ni D. Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship. *Transportation Research. Part A*. 2011, 45, pp. 554–566. DOI: 10.1016/j.tra.2011.03.010

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тараховский И.И. Сбор и обработка экспериментальных данных, подготовка текста статьи.

Михайлов А.Ю. Анализ литературы по тематике исследования, подготовка текста и научная редакция статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tarakhovsky I.I. Collecting and processing experimental data, writing the manuscript.

Mikhailov A.Yu. State of the art analysis, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тараховский Игорь Игоревич – генеральный директор ООО «КВАНТ ИНЖИНИРИНГ» (664003, г. Иркутск, ул. Парковая, д.4, офис 1).

e-mail: igor@kvanteng.ru

Михайлов Александр Юрьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1946-0659>,

Scopus ID: 57193751842,

Author ID: 385530,

SPIN-код: 2498-7773,

e-mail: 89148701840@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tarakhovsky Igor I. – General Director, QUANT ENGINEERING LLC (664003, Irkutsk, st. Parkovaya, 4, office 1).

e-mail: igor@kvanteng.ru

Mikhailov Alexander Yu. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Automobile Transport Department, Irkutsk Scientific Research Technical University (Irkutsk, Lermontova st. 83).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1946-0659>,

Scopus ID: 57193751842,

Author ID: 385530,

SPIN-code: 2498-7773,

e-mail: 89148701840@mail.ru

Научная статья
УДК 656.02
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-266-281>
EDN: KQPJRV



ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖДУГОРОДНЕГО ПАССАЖИРСКОГО СПРОСА ПОСРЕДСТВОМ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.И. Фадеев ✉, А.М. Ильянков
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия
✉ ответственный автор
9135335784@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из актуальных нерешенных до настоящего времени вопросов является определение потенциального (общего, насыщенного) транспортного спроса, т.е. теоретического количества поездок, которое возможно на сегменте рынка перевозок по междугородным автобусным регулярным маршрутам.

Материалы и методы. Ключевой информацией для математической модели определения междугородного транспортного спроса является объем отправок и прибытий между населенными пунктами. Данная статистика доступна в основном для транспорта общего пользования. Информация об общем транспортном спросе, как правило, отсутствует. Для автодорожной сети объемы отправок и загрузку рассчитываются как определенный процент от общего населения.

В настоящее время особую перспективу представляют методы изучения транспортного спроса, основанные на сборе, интеграции и анализе больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в пространствах жизнедеятельности человека. В рамках данного направления рассматривается применение информации системы видеонаблюдения транспортных средств для учета междугородных транспортных потоков. В статье сформулирована система уравнений, связывающих корреспонденции между населенными пунктами и учитываемый пассажирский поток, который подразделяется на входящий, исходящий и транзитный.

При использовании видеонаблюдения транспортного средства в расчетах посредством предложенного поправочного коэффициента учитывается эффект, связанный с перемещением наблюдателя в пространстве, который заключается в следующем: объекты, учитываемые движущимся наблюдателем, будут доступны неподвижному наблюдателю через промежуток времени, который можно определить как отношение расстояния между наблюдателями к скорости объекта.

Результаты. Предложенный в статье подход для учета транспортных и пассажирских потоков апробирован на изолированном транспортном коридоре, пассажиры по которому перевозятся автомобильным транспортом (автобус рейсовый и заказной, легковой автомобиль), другие виды транспорта (например, железнодорожный) отсутствуют.

Обсуждение и заключение. Коэффициент детерминации полученной математической модели позволяет сделать вывод о ее приемлемости, 18% вариации зависимой переменной можно отнести на счет неизвестных, скрытых параметров или статистических погрешностей исходных данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: общественный транспорт, планирование общественного транспорта, междугородная автобусная линия, транспортный спрос, матрица пассажирских корреспонденций, транспортное предложение

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 11.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Фадеев А.И., Ильянков А.М., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Фадеев А.И., Ильянков А.М. Определение междугороднего пассажирского спроса посредством системы видеонаблюдения транспортного средства // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 266-281. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-266-281>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-266-281>

EDN: KQPJRV

DETERMINATION OF INTERCITY PASSENGER DEMAND BY MEANS OF A VEHICLE VIDEO SURVEILLANCE SYSTEM

Aleksandr I. Fadeyev ✉, Aleksey M. Ilyankov
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia
✉ corresponding author
9135335784@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. One of the current unresolved issues is to determine the potential (total, intensive) transport demand, i.e. the theoretical number of trips that are possible in the segment of the intercity bus transportation market on regular routes.

Materials and methods. The key information for the mathematical model of determining intercity transport demand is the volume of departures and arrivals between settlements. These statistics are available mainly for public transport. Information on overall transport demand, as a rule, is unavailable. For the road network, departure volumes are often calculated as a certain percentage of the total population.

Currently, methods of studying transport demand based on the collection, integration and analysis of large and heterogeneous data generated by various sources in the spheres of human activities represent a promising perspective. Within this approach, the application of information from a vehicle video surveillance system for tracking the intercity traffic flows is being considered. The article formulates a system of equations linking transport communications between settlements and the passenger flow being considered, which is divided into incoming, outgoing, and transit.

When using video surveillance of a vehicle in calculations with the use of the proposed correction factor, we take into account the effect associated with the movement of the observer in space, which is as follows: the objects taken into account by the moving observer will be available to the stationary observer after a period of time, which can be defined as the ratio of the distance between the observers to the speed of the object.

Results. The proposed in the article approach for tracking transport and passenger flows has been tested on an isolated transport corridor, along which passengers travel by road (scheduled and chartered buses, cars), and other modes of transport (e.g., rail) are absent.

Discussion and conclusion. The coefficient of determination of the obtained mathematical model allows us to conclude that it is acceptable, 18% of the variation in the dependent variable can be attributed to unknown, hidden parameters or statistical errors in the initial data.

KEYWORDS: public transport, public transport planning, intercity bus line, transport demand, passenger transport communication matrix, transport offer

The article was submitted: July 03, 2025; approved after reviewing: March 11, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Fadeyev A.I., Ilyankov A.M., Determination of intercity passenger demand by means of a vehicle video surveillance system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 266-281. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-266-281>

© Fadeyev Aleksandr I., Ilyankov Aleksey M., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Междугородный автобусный транспорт обеспечивает удовлетворение мобильности населения, что является важным фактором развития экономики и общества [1]. Он играет ключевую роль благодаря гибкости в расписании, большому пространственному охвату и относительно низким инвестициям в инфраструктуру по сравнению с железнодорожным и воздушным видами перевозок. Следует отметить особую роль автобуса для поездок населения, не имеющего личного автомобиля. На междугородных маршрутах автобуса во многих случаях осуществляются перевозки пассажиров внутри малых населенных пунктов, расположенных на регулярной линии [2, 3], в сельских районах общественный транспорт зачастую целиком базируется на региональных автобусных линиях [4, 5].

Предложение транспортных услуг должно быть сформировано таким образом, чтобы оно в наибольшей степени соответствовало спросу [6]. Под транспортным предложением понимается свойство транспортной системы обеспечивать удовлетворение потребностей населения в перевозках¹. Транспортное предложение оценивается вектором параметров (критериев), определяющих эффективность и качество транспортного обслуживания.

Транспортный спрос отражает перемещение населения различными видами транспорта. Он характеризуется широким кругом показателей, таких как пункт отправления, пункт назначения, количество перемещений, время отправления, время прибытия, причина и т.д.

Соответствие транспортного предложения спросу обеспечивается путем решения определенного круга задач, таких как оптимизация маршрутов, планирование расписания, совершенствование структуры парка транспортных средств и т.д. Исследования по проектированию маршрутов различных видов транспорта, определению интервалов (частоты) движения и формированию расписаний перевозок рассмотрены в [7, 8, 9, 10, 11]. Следует отметить, что данные задачи в большинстве случаев решаются в контексте городских перевозок.

Совершенствование перевозок по регулярным междугородным маршрутам требует оценки различных факторов, обусловленных предпочтениями пассажиров, операторов и

общества в целом [3]. В этой связи актуальным является определение и прогнозирование пассажирских потоков [12, 13].

Для решения задач совершенствования транспортной системы требуется информация об общем транспортном спросе, который реализуется посредством разных видов транспорта. Моделирование пространственного распределения пассажиропотоков является необходимым условием успешного планирования развития транспортной системы, а также прогнозирования спроса [14].

Таким образом, одним из актуальных нерешенных до настоящего времени вопросов является определение потенциального (общего, насыщенного) транспортного спроса [15], т.е. теоретического количества поездок, которое возможно на рассматриваемом рынке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для транспортных прогнозов применяются агрегированные и дезагрегированные модели [16]. Агрегированные модели основываются на усредненных значениях показателей, определяющих спрос.

Транспортное поведение жителя зависит от многих факторов, таких как размер и доходы семьи, транспортные расходы, наличие в семье легковых автомобилей и их количество и др. Для их учета применяются дезагрегированные модели. Однако дезагрегированные модели имеют недостатки, обусловленные сложностью получения требуемых данных, некоторые из которых являются конфиденциальными. Эти модели наиболее эффективны для оценки различных программ и мероприятий стимулирования перспективного транспортного спроса, повышения эффективности и качества транспортного обслуживания.

Среди агрегированных моделей оценки спроса на передвижения (trip generation) и расчета матрицы корреспонденций (trip distribution) наиболее известными являются гравитационная модель и подход, основанный на максимизации энтропии, который, в свою очередь, можно свести к гравитационной модели при решении рассматриваемой задачи [6].

В соответствии с гравитационной моделью взаимодействие населенных пунктов или транспортных районов описывается следующим образом [6]:

¹ Colonna, Pasquale & Fonzone, Achille. (2001). Factors influencing transport requirements and transport supply // Conference: Piarc international comitee c4 interurban roads and integrated transport at: Timisoara, Romania

$$T_{ij} = \alpha P_i P_j f(c_{ij}) \quad (1)$$

или

$$T_{ij} = \alpha O_i D_j f(c_{ij}), \quad (2)$$

где T_{ij} – количество перемещений между i -м и j -м населенными пунктами;

P_i, P_j – численность жителей населенного пункта i, j соответственно;

O_i и D_j – число отправок из пункта i и прибытий в пункт j соответственно;

α – постоянная, определяемая в результате калибровки модели;

$f(c_{ij})$ – обобщенная функция транспортных расходов с одним или несколькими параметрами (функция сдерживания).

Функция сдерживания описывает снижение привлекательности поездок по мере увеличения затрат пассажира, например, времени, расстояния, затрат на поездку и т.д. Часто используются следующие варианты данной функции [6]:

а) экспоненциальная:

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij}), \quad (3)$$

б) степенная:

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}, \quad (4)$$

в) комбинированная:

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \exp(-\beta c_{ij}), \quad (5)$$

где β, n – коэффициенты, определяемые при калибровке функции сдерживания.

При использовании в модели числа отправок и прибытий требуется обеспечить выполнение следующих ограничений [6]:

$$\sum_i T_{ij} = D_j; \sum_j T_{ij} = O_i. \quad (6)$$

Для этого единый коэффициент пропорциональности α заменяют на два набора уравновешивающих коэффициентов A_i и B_j , т.е. [6, 9, 17,]:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij}). \quad (7)$$

Предложены и другие варианты гравитационной модели, обеспечивающие выполнение ограничения (6), например [18]:

$$T_{ij} = \frac{\alpha_{ij} O_i D_j}{I_{ij}^m}, \quad (8)$$

где α_{ij} – функция тяготения между пунктами i и j .

Задача определения транспортного спроса рассматривалась во многих исследованиях [19, 20, 21]. Однако в большинстве из них изучался спрос общественного транспорта, а не общее число поездок населения.

В работе [22] описан алгоритм расчета матрицы корреспонденций, основанный на емкости по прибытию и отправлению остановочных пунктов пригородного маршрута. Считается, что количество пассажиров, i -го остановочного пункта, прибывают на j -й остановочный пункт пропорционально его емкости по прибытию. Однако при этом не доказано, что расстояние между остановочными пунктами не оказывает влияния на матрицу пассажирских корреспонденций. Широкое применение гравитационного метода для описания поездок пассажиров ставит под сомнение адекватность данного алгоритма.

В статье [20] делается заключение, что традиционная четырехэтапная математическая модель не подходит для анализа спроса на междугородные перевозки, создана интегрированная многоуровневая система, основанная на вложенных логит-моделях, состоящая из следующих шагов, аналогичных классической транспортной модели: генерация междугородных поездок, выбор пункта назначения и выбор вида транспорта и трансфера в пунктах отправления и назначения. В данном случае предложен комплекс логит-моделей, требующих существенный объем информации, для получения которой необходимо проводить анкетирование пассажира. Во многих случаях оценку определенного сегмента рынка пассажирских перевозок желательно на первом этапе осуществлять с применением подхода, основанного на имеющемся объеме информации без большого объема дополнительных исследований.

Во многих работах для расчета транспортного спроса на междугородных и пригородных линиях применялась гравитационная модель [23, 24, 25, 26, 27]. В [24] посредством модели (2) определялись пассажирские корреспонденции транспортом общего пользования.

Как упоминалось выше, особую проблему составляет сложность получения на междугородных линиях фактических данных об имеющемся транспортном спросе [25]. В этой связи предпринимались попытки моделирования перемещения населения маршрутными автобусами и индивидуальными автомобилями в междугородном сообщении с помощью модифицированных гравитационных моделей. Ключевой информацией для гравитаци-

онной модели являются объемы отправок и прибытий. По имеющейся статистике только для железнодорожной сети были получены эмпирические данные отправок. Для автодорожной сети в некоторых работах объемы отправок рассчитывали как определенный процент от общего населения [25].

Вопрос исследования адекватности гравитационной модели с двойным ограничением и экспоненциально-степенной функцией сдерживания рассматривается в [14]. Калибровка и валидация указанной модели показаны в наблюдаемой (фактической) матрице происхождения железнодорожного пассажира методом максимального правдоподобия. В работе также анализируются инструменты проверки гравитационной модели, используемые для оценки близости между наблюдаемой и смоделированной матрицами перемещений. Получено, что гравитационная модель с высокой степенью точности предсказывает такие агрегированные показатели, как общий пассажирооборот, среднее расстояние в пути и распределение расстояний в пути. В то же время получено, что погрешность в прогнозировании пассажиропотока для большинства отдельных рейсов из пункта отправления в пункт назначения достаточно велика.

Имеется большое число исследований оценки спроса на авиаперевозки, который обычно формулируется посредством двух задач: моделирование (первый этап) и распределение (второй этап) спроса. Для оценки общего размера рынка используется гравитационный метод. При этом учитываются следующие группы факторов: геоэкономические (ВВП, численность населения и т.д.), факторы сопротивления (расстояние, стоимость и т.д.), факторы качества и эффективности обслуживания (частота движения, типы маршрутов и т.д.). На втором этапе моделируется распределение рыночного спроса между конкурирующими альтернативами на различных уровнях агрегирования (авиакомпаний, маршрутов, аэропортов и т.д.) [28].

В работе [29] представлены две гравитационные модели для оценки объема авиапассажирских перевозок между городами-парами. Модели включают переменные, описывающие общую экономическую активность и географические характеристики пар городов. Авторы считают, что обе модели могут быть применены к городам, в которых отсутствует воздушное сообщение.

Три гравитационные модели для оценки спроса на авиаперевозки представлены в [31].

Они учитывают ВВП на душу населения, численность населения и расстояние между населенными пунктами.

В статье [30] рассматриваются закономерности изменения объема пассажирских перевозок в зависимости от численности жителей населенного пункта, установлены законы распределения объема перевозок.

Результаты изучения влияния разных факторов на междугородные пассажирские потоки даны в [31]. Рассматривались следующие факторы: частота рейсов, пассажирские тарифы, время в пути, расстояние между пунктом отправления и пунктом назначения, вместимость транспортного средства. В результате предложена модель расчета транспортного спроса населенного пункта, выраженного в пассажиро-километрах.

Таким образом, ключевой информацией для математической модели междугородного транспортного спроса является фактический объем отправок и прибытий между населенными пунктами. Данная статистика доступна в основном для транспорта общего пользования. Информация об общем транспортном спросе, как правило, отсутствует. Для ее получения затруднительно использование ручного учета вследствие существенной трудоемкости. Камеры видеонаблюдения также не всегда могут использоваться, т.к. их размещение обуславливает другие цели, связанные с повышением безопасности дорожного движения. В этой связи большинство камер размещено на подходах к населенным пунктам, на которых в транспортных потоках высок удельный вес местного движения, что препятствует определению междугородных потоков.

В работе [32] описывается использование пунктов учёта интенсивности и состава движения, принцип действия которых основан на различных методах детектирования типов автотранспортных средств: электромагнитное и радиолокационное детектирование автотранспортных средств. Однако размещение данных пунктов не обеспечивает решение задачи учета междугородных транспортных потоков.

В настоящее время особую перспективу представляют методы изучения транспортного спроса, основанные на сборе, интеграции и анализе больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в пространствах жизнедеятельности человека: мобильными телефонами, транспортными средствами, камерами видеонаблюдения и т.д. (Urban computing, Big data, Internet of things, IoT) [33, 34, 35].

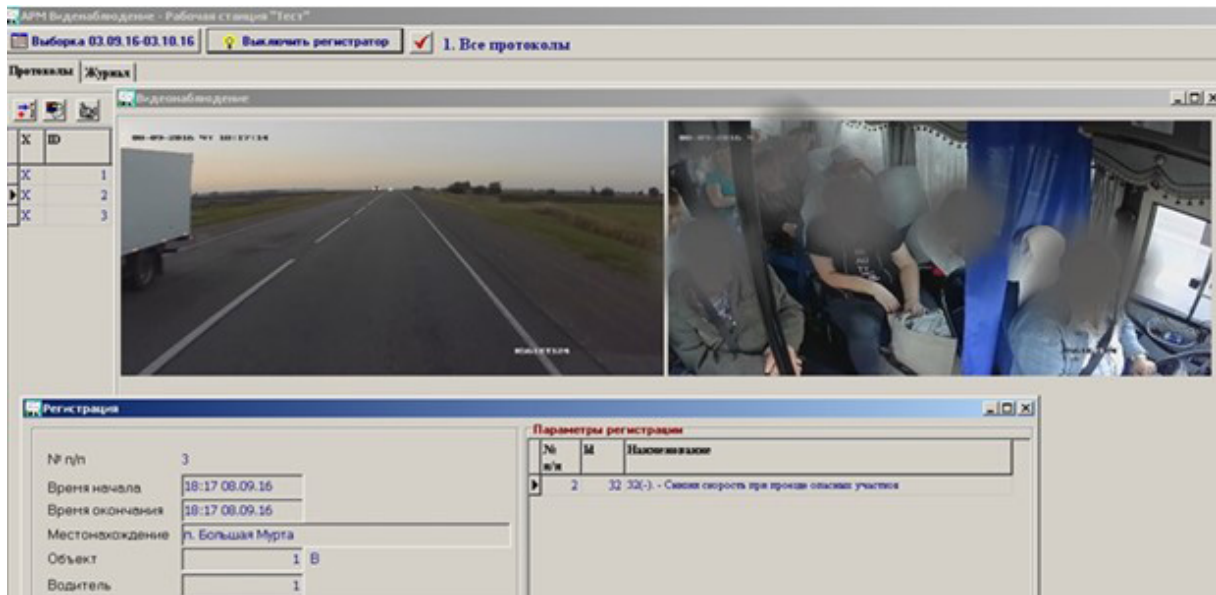


Рисунок 1 – Интерфейс программы формирования протокола обработки данных видеонаблюдения
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Program Interface to generate a protocol for processing video surveillance data
Source: compiled by the authors.

Современные мобильные операторы обеспечивают получение информации о местоположении и перемещениях населения с точностью до 500 м [36]. Эти данные используются в разных сферах, в т.ч. для определения транспортного спроса. Однако информация сотовых операторов обладает недостаточной точностью (связанной, например, с несколькими сим-картами на одного абонента, точностью геолокации и др.), необходима дополнительная калибровка модели с применением натурных обследований [36].

Система видеонаблюдения, которой оборудуется транспорт общего пользования, обеспечивает визуальный контроль перевозочного процесса²: дорожной обстановки на маршруте, событий в салоне транспортного средства. Некоторые перевозчики для повышения эффективности контроля за исполнением движением практикуют использование сменных носителей информации в таких системах. Данный подход исключает необходимость технологически затруднительной пере-

дачи данных видеонаблюдения по каналам связи (например, Wi-Fi) непосредственно с транспортного средства.

Анализ исполненного движения со сменного носителя информации выполняется на рабочем месте аналитика. В процессе анализа выбираются, описываются и классифицируются события, которые заносятся в протокол вместе с отрезками видеонаблюдения (рисунок 1). Формируется рейтинг работы водителей и персонала транспортных терминалов. При обработке контента программное обеспечение определяет местонахождение транспортного средства в момент события.

Рассмотрим возможность применения видеонаблюдения транспортного средства для определения транспортного спроса. По междугородному автобусному маршруту, как правило, выполняются несколько рейсов в день таким образом, что имеется возможность измерения транспортных и пассажирских потоков. С помощью соответствующего программного обеспечения³ на рабочем ме-

² Фадеев А.И., Ильянков М.Т. Интегрированная информационная система бронирования билетов, контроля и управления перевозками пассажиров на автомобильном транспорте // Борисовские чтения: материалы II Научно-технической конференции, посвященной памяти профессора Борисова Василия Николаевича – организатора и первого ректора Красноярского политехнического института, 25–27 сентября 2019. Красноярск, 2019. С. 215–219.

³ Фадеев А.И., Ильянков М.Т. Интегрированная информационная система организации и управления перевозками пассажиров по регулярным автобусным маршрутам // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной научно-технической конференции. 2019. С. 654–661.

сте аналитика осуществляется визуальный учет встречных транспортных средств. Учет осуществляется на участках маршрута таким образом, чтобы в наибольшей степени исключить влияние местного (пригородного) движения вблизи населенных пунктов: перемещения на дачные участки, промышленные объекты и т.д. Участки учета определяются экспериментально, таким образом, чтобы интенсивность потока не зависела от расстояния до населенного пункта. Населенные пункты, расположенные на небольшом расстоянии, рекомендуется объединять при учете вследствие большого удельного веса местного движения.

Для простоты рассмотрим изолированный транспортный коридор, состоящий из линейной последовательности населенных пунктов (рисунок 2), пассажиры по которому перевозятся автомобильным транспортом (автобус рейсовый и заказной, легковой автомобиль), другие виды транспорта (например, железнодорожный) отсутствуют. Такой транспортный коридор описан, например, в работе [28].

На рисунке 2 приведена схема транспортного коридора, состоящего из n населенных пунктов, между которыми требуется опреде-

лить общий транспортный спрос. Известно расстояние между населенными пунктами и численность населения. Расчет теоретического транспортного спроса будем осуществлять по выражению (1) с использованием степенной функции сдерживания, показатель степени равен 2. Выбор функции сдерживания осуществлен экспериментально путем сравнения результатов, полученных для каждого варианта. Для определения коэффициента применен метод наименьших квадратов.

Калибровку и валидацию математической модели транспортного спроса будем осуществлять с использованием транспортных потоков, определенных между населенными пунктами в результате обработки данных видеонаблюдения подвижного состава (см. рисунок 1). При этом осуществляется учет транспортных средств, встречных движению подвижного состава с видеорегистратором. Начало и ширина зон учета обусловлена расстоянием до населенных пунктов, на котором в минимальной степени сказывается местное движение. Это расстояние зависит от численности населения, оно определялось опытным путем при калибровке и валидации модели.

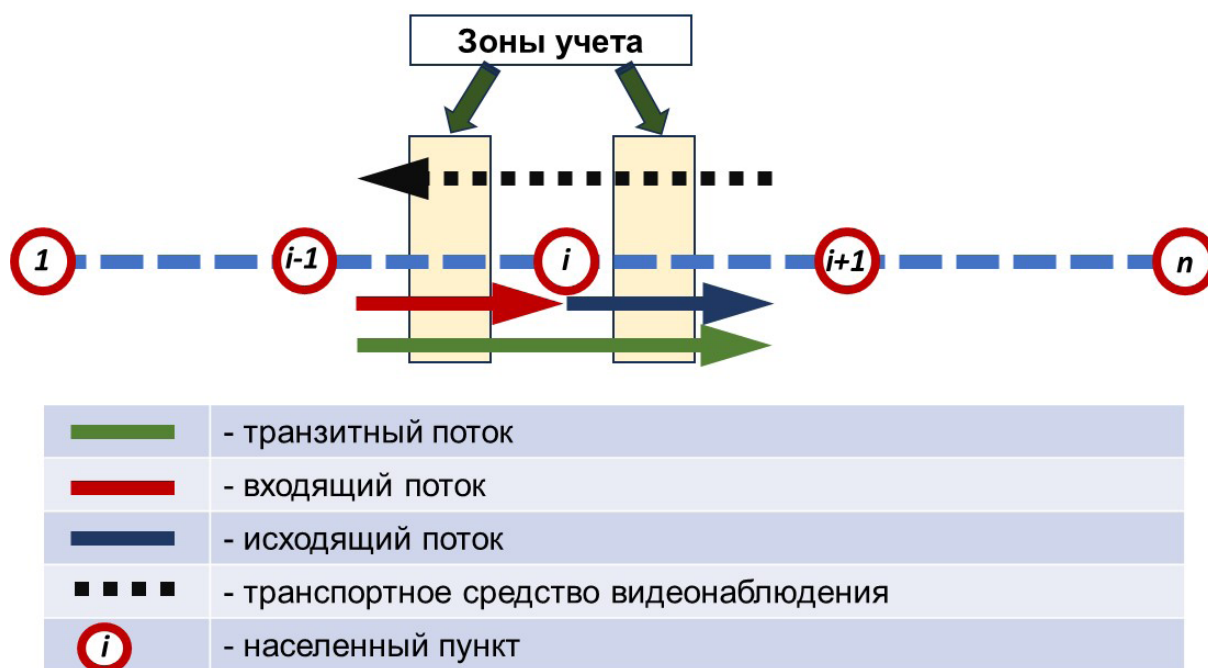


Рисунок 2 – Схема транспортного коридора
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The scheme of the transport corridor
Source: compiled by the authors.

Для учета транспортный поток разделен на следующие группы: легковые, грузовые автомобили, автобусы (большой, средней, малой и особо малой вместимости). Транспортный спрос рассчитан в среднесуточном количестве пассажиров. Среднее число пассажиров в легковом автомобиле, автобусах соответствующей вместимости определено визуальным методом⁴, который, как правило, применяется при определении транспортного спроса для решения подобных задач. Пассажиры грузовых автомобилей не учитывались: считается, что в большинстве случаев их движение обусловлено логистикой, а не мобильностью населения.

Из рисунка 2 видно, что учитываемый транспортный поток подразделяется на транзитный, входящий и исходящий. Составим систему уравнений, связывающую корреспонденции между населенными пунктами и учитываемый пассажирский поток:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{12} = \sum_2^n T_{1,i}; \\ \lambda_{23} = \sum_{i=3}^n (T_{1,i} + T_{2,i}); \\ \lambda_{3,4} = \sum_{i=4}^n (T_{1,i} + T_{2,i} + T_{3,i}); \\ \lambda_{n-1,n} = \sum_{i=n}^n (T_{1,i} + T_{2,i} + *** + T_{n,i}); \end{array} \right. \quad (9)$$

где λ_{ij} – интенсивность пассажирского потока между i -м и j -м пунктами транспортного коридора;

$T_{1,i}$ – интенсивность пассажирской корреспонденции между i -м и j -м пунктами (транспортный спрос);

n – число населенных пунктов транспортного коридора.

В таблице 1 даны результаты учета пассажирских потоков между населенными пунктами рассматриваемого транспортного коридора. В расчетах необходимо учитывать перемещение наблюдателя в пространстве. Для этого число пассажиров за час определяется следующим образом:

$$Q_i^h = \frac{60Q_i^f}{t_c k_i^p}, \quad (10)$$

$$k_i^v = \frac{v_a}{v_i}, \quad (11)$$

$$Q_i^c = n_i q_i, \quad (12)$$

где Q_i^h – число пассажиров в транспортных средствах i -й группы (легковой автомобиль, автобус большой, средней, малой и особо малой вместимости), пасс./ч;

Q_i^c – число пассажиров в транспортных средствах i -й группы, определенное за время замера (учета);

t_c – длительность замера, мин;

k_i^v – корректирующий коэффициент, учитывающий перемещение наблюдателя;

v_a – средняя скорость наблюдателя (транспортного средства, на котором установлено видеонаблюдение);

v_i – средняя скорость учитываемых транспортных средств i -й группы;

n_i – число транспортных средств i -й группы определенное в результате учета;

q_i – среднее число пассажиров в транспортном средстве i -й группы.

Физический смысл корректирующего коэффициента k_i^v заключается в следующем. Транспортные единицы, учитываемые движущимся наблюдателем, будут доступны неподвижному наблюдателю через промежуток времени, который можно определить как отношение расстояния между наблюдателями к скорости наблюдаемого объекта.

Перечень населенных пунктов рассматриваемого транспортного коридора приведен в таблице 2. В таблице 1 для расчета среднегодовой суточной интенсивности пассажирских потоков использованы коэффициенты $K_{сч}$, приведенные в ГОСТ 32965–2014⁵. В данном стандарте коэффициенты $K_{сч}$ даны для времени учета с 8:00 до 17:00, продолжительности учета от 1 до 12 ч. В связи с тем, что коэффициенты учета известны не для всех часов суток, некоторые строки таблицы 2 для определения среднесуточной интенсивности пассажирского потока не использовались.

⁴ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов М.: Высш. школа, 1980. 535 с.

⁵ ГОСТ 32965-2014. Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока (введен в действие Приказом Росстандарта от 31.08.2016 N 997-ст).

Таблица 1
 Результаты учета пассажирских потоков между населенными пунктами транспортного коридора (фрагмент)
 Источник: составлено авторами.

Table 1
 Results of tracking the passenger flows between settlements in the transport corridor (fragment)
 Source: compiled by the authors.

Перегон	Время суток	Длительность замера, мин	Пассажиропоток							
			Учет		$K_{сч}^*$	Среднегодовая суточная интенсивность, пасс.				
			пасс.	пасс./ч		Учет	Направление		В среднем	
							Прямое	Обратное		
1-2	13	7	66	267,6	15,90	4255,4	4359,4	5807,6	5083,5	
	17	5	24	130,7	13,56	1772,1				
	14	6	92	461,4	15,28	7050,6				
2-1	12	6	38	185,7	16,01	2973,1		5807,6	5083,5	
	8	5	80	462,0	17,68	8168,7				
	17	6	96	463,2	13,56	6281,0				
	0	6	2	10,6						
2-3	12	9	54	177,4	16,01	2840,9	2684,2	3910,9	3297,6	
	17	10	36	110,7	13,56	1500,6				
	14	9	72	242,9	15,28	3711,1				
3-2	13	10	94	298,6	15,90	4747,6		3910,9	3297,6	
	8	9	64	214,0	17,68	3783,4				
	17	9	70	236,1	13,56	3201,9				
	0	10	8	23,3						

12-13	8	25	138	169,7	17,68	3000,0	2347,6	2792,6	2570,1	
	13	14	78	174,9	15,90	2780,8				
	10	19	50	80,1	15,76	1262,0				
13-12	16	13	88	207,1	13,22	2737,3		2792,6	2570,1	
	12	20	112	177,9	16,01	2847,9				
	21	24	64	83,5						
	3	16	16	30,5						
13-14	7	10	66	198,1			3736,4	4092,9	3914,7	
	11	12	104	260,8	15,92	4152,0				
	8	11	68	187,8	17,68	3320,8				
14-13	18	13	114	278,6				4092,9	3914,7	
	13	12	104	257,4	15,90	4092,9				
	22	11	14	37,8						
	4	11	0	0,0						

Примечание. * $K_{сч}^*$ – коэффициент часа для перехода к среднегодовой суточной интенсивности движения в зависимости от времени начала (от 8 до 18 ч) и продолжительности (от 1 до 12 ч) проведения учета.

Таблица 2
Населенные пункты в транспортном коридоре
Источник: составлено авторами.

Table 2
Settlements in the transport corridor
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Наименование	Число жителей	Расстояние, км
1	Красноярск	1189569	0
2	Миндерла	2313	49
3	Шила	2074	64
4	Бартат	1435	84
5	Б. Мурта	7707	112
6	Таловка	1623	141
7	Мокрушенское	1482	189
8	Галанино	1617	200
9	Казачинское	5424	210
10	Шапкино	627	240
11	Новокаргино	944	273
12	Абалаково	1703	304
13	Лесосибирск	56921	324
14	Енисейск	20375	375

В таблице 3 представлены результаты расчетов пассажирских потоков и транспортных корреспонденций между населенными пунктами транспортного коридора. В верхней части таблицы дано среднегодовое суточное число поездок между населенными пунктами, рассчитанное по выражению (1). В нижней части таблицы приведена среднегодовая мощность суточных пассажирских потоков на перегонах между населенными пунктами, полученная расчетным путем по математической модели и определенная экспериментально. Определение коэффициента α выполнено с применением метода наименьших квадратов. Пассажирские потоки рассчитаны по выражению (9). Колонки 9 и 13 таблицы 3 из процесса калибровки исключены вследствие близкого расположения населенных пунктов, что не позволяет разделить междугородные потоки от

местного движения. Колонка 11 также не учитывалась вследствие отсутствия достоверных данных о численности населения.

Эпюра пассажирских потоков транспортного коридора дана на рисунке 3. Коэффициент детерминации составляет 0,82, т.е. 82% вариации зависимой переменной объясняется независимыми переменными в модели. Оставшиеся 18% можно отнести на счет факторов, не учтенных в рассматриваемой модели, а также погрешностей исходных данных. Одним из параметров модели, существенно влияющих на величину транспортного спроса, является число жителей населенных пунктов. В настоящее время для многих населённых пунктов доступна статистика только 15-летней давности. Это является существенной причиной расхождения между теоретическими и экспериментальными данными (см. таблицу 3).

Таблица 3
Результаты расчета пассажирских потоков транспортного коридора
 Источник: составлено авторами.

Table 3
Calculation results of passenger flows in the transport corridor
 Source: compiled by the authors.

№ п/п	Число жителей	Расстояние, км	Пассажирские корреспонденции, пасс./сут															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
1	1189569	0																
2	2313	49	1570,0															
3	2074	64	825,2	29,2														
4	1435	84	331,4	3,7	10,2													
5	7707	112	1001,3	6,2	9,5	19,3												
6	1623	141	133,0	0,6	0,8	1,0	20,4											
7	1482	189	67,6	0,2	0,3	0,3	2,6	1,4										
8	1617	200	65,9	0,2	0,2	0,2	2,2	1,0	27,1									
9	5424	210	200,4	0,7	0,7	0,7	6,0	2,5	25,0	120,2								
10	627	240	17,7	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,5	0,9	5,2							
11	944	273	20,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,3	0,4	1,8	0,7						
12	1703	304	30,0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,3	0,3	1,4	0,4	2,3					
13	56921	324	883,7	2,4	2,4	2,4	13,4	3,8	6,3	8,2	32,5	6,9	28,3	332,0				
14	20375	375	236,1	0,6	0,6	0,6	3,1	0,8	1,2	1,5	5,6	1,0	2,5	9,4	610,9			
Перегон			1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14			
Пассажирские потоки, пасс./сут		Модель	5383	3857	3028	2706	1719	1573	1561	2882	1921	1270	1279	2459	874			
		Эксперимент	5083	3298	2689	3345	2255	2214	1950	2938	1921	1179	2954	2570	3915			

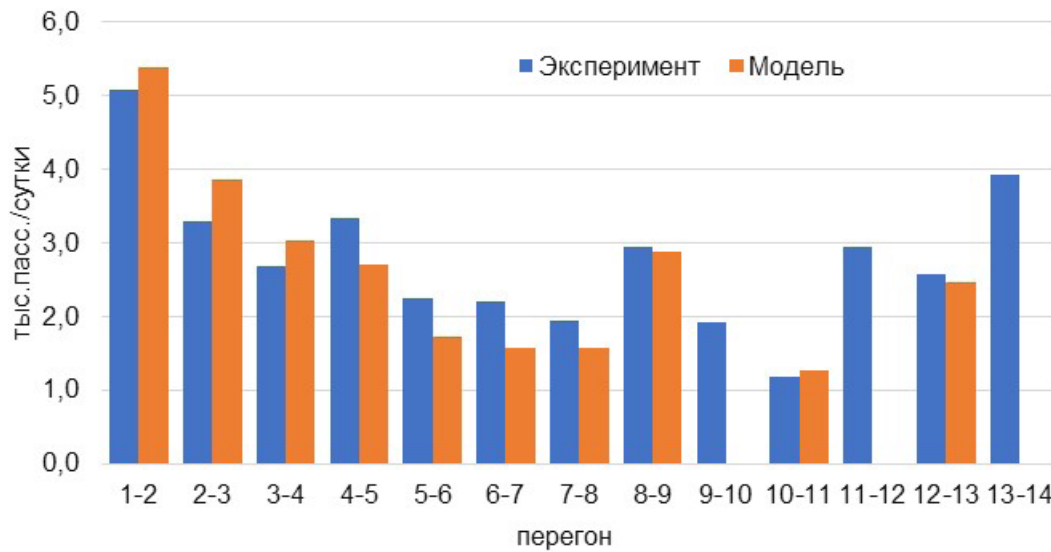


Рисунок 3 – Эпюра пассажирских потоков транспортного коридора
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The plot of passenger flows in the transport corridor
Source: compiled by the authors.

Расчет суточной (для конкретного дня года) мощности пассажирских потоков предлагается осуществлять в соответствии с методическими рекомендациями по оценке пропускной способности автомобильных дорог:⁶

$$Q_d = 365Q_y K_n K_e / 4, \quad (13)$$

где Q_y – среднегодовая суточная мощность пассажирских потоков (таблицы 1, 3);

$K_n K_e$ – коэффициенты неравномерности движения соответственно по дням недели, месяцам года даны в упомянутых рекомендациях.

Аналогичным образом можно определить суточную мощность пассажирских корреспонденций

$$T_{ij}^d = 365T_{ij}^y K_n K_e / 4. \quad (14)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В связи с высоким социально-экономическим значением междугородных автобусных перевозок особую важность приобретает вопрос совершенствования транспортной систе-

мы с целью обеспечения соответствия спроса и предложения.

Одним из актуальных нерешенных до настоящего времени вопросов является определение потенциального (общего, насыщенного) транспортного спроса, т.е. теоретического количества поездок, которое возможно на сегменте рынка перевозок по междугородным автобусным регулярным маршрутам.

2. Задача расчета транспортного спроса рассматривалась во многих исследованиях, для ее решения применяются различные агрегированные и дезагрегированные математические модели.

3. Ключевой информацией для математической модели определения междугородного транспортного спроса является объем отправок и прибытий между населенными пунктами. Данная статистика доступна в основном для транспорта общего пользования. Информация об общем транспортном спросе, как правило, отсутствует. Для автодорожной сети объемы отправок зачастую рассчитываются как определенный процент от общего населения.

⁶ Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), М.: 2012. 148 с.

4. В настоящее время особую перспективу представляют методы изучения транспортного спроса, основанные на сборе, интеграции и анализе больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в пространствах жизнедеятельности человека. В рамках данного направления рассматривается применение системы видеонаблюдения транспортных средств для учета междугородных транспортных потоков.

С целью калибровки гравитационной математической модели транспортного спроса сформулирована система уравнений, связывающих корреспонденции между населенными пунктами и учитываемый пассажирский поток, который для населенных пунктов подразделяется на входящий, исходящий и транзитный.

5. При использовании видеонаблюдения транспортного средства в расчетах перемещение наблюдателя в пространстве учитывается посредством предложенного поправочного коэффициента. Объекты, учитываемые движущимся наблюдателем, будут доступны неподвижному наблюдателю через промежуток времени, который можно определить как отношение расстояния между наблюдателями к скорости объекта.

6. Предложенный в статье подход для учета транспортных и пассажирских потоков апробирован на изолированном транспортном коридоре, пассажиры по которому перевозятся автомобильным транспортом (автобус рейсовый и заказной, легковой автомобиль), другие виды транспорта (например, железнодорожный) отсутствуют.

Коэффициент детерминации математической модели позволяет сделать вывод о ее приемлемости, 18% вариации зависимой переменной можно отнести на счет неизвестных, скрытых параметров или статистических погрешностей модели.

7. Направления дальнейших исследований:

- исследовать механизм влияния параметров предложения транспорта общего пользования на спрос;

- разработать методику определения транспортного спроса в зависимости от параметров транспортного предложения;

- применение методов обработки видеозаписей для автоматизированного учета транспортных и пассажирских потоков по данным видеонаблюдения транспортных средств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Woldeamanuel M. Evaluating the competitiveness of intercity buses in terms of sustainability indicators. *Journal of Public Transportation*. 2012; Vol. 15, No. 3: 5. DOI:10.5038/2375-0901.15.3.5

2. Javid R., Sadeghvaziri E. Investigating the Relationship Between Access to Intercity Bus Transportation and Equity. *Transportation Research Record*, 2022, p. 03611981221088218. DOI: 10.1177/03611981221088218

3. Group K. Effective Approaches to Meeting Rural Intercity Bus Transportation Needs. Report 79, Transit Cooperative Research Program. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2002. 184 p. DOI: 10.5038/2375-0901.15.3.7

4. Nielsen G., Lange T. Network design for public transport success—theory and examples. Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo, 2008. 30 p.

5. Ryan F., Allard R.F., Moura F. The Incorporation of Passenger Connectivity and Intermodal Considerations in Intercity Transport Planning, *Transport Reviews*, 2015, DOI: 10.1080/01441647.2015.1059379

6. Ortuzar J.D., Willumsen L.G.. *Modelling transport*. John Willey & Sons, 2011. 586 p. DOI: 10.1002/9781119993308

7. Alderighi M., Cento, A., Nijkamp, P., Rietveld, P. Network competition – the coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*. 2005; 11(5): 328–334. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2005.07.006

8. Alderighi M, Feder C, Nijkamp P, Ungureanu EI Simple pricing rules in complex air transport systems. *Handbook on Entropy, Complexity and Spatial Dynamics: A Rebirth of Theory?* Chapter 18. 2021: pp. 304 – 320. DOI: 10.4337/9781839100598.00027

9. Merrina A., Sparavigna A., Wolf R. A. The intermodal networks: A survey on intermodalism. *World Review of Intermodal Transport Research*. 2007; 1(3): 286–299.

10. Ranjbari A., Hickman M., Chiu YC. A Mathematical Optimization Model for Solving the Intercity Transit Network Design Problem // CASPT 2018 Extended Abstract. Режим доступа: http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT_2018_paper_128.pdf. (дата обращения: 22.05.2023).

11. Sunhyung Yoo, Jinwoo Brian Lee, and Hoon Han. A reinforcement learning approach for bus network design and frequency setting optimization // *Public Transport*. 2023: pp 1–32. DOI: 10.1007/s12469-022-00319-y

12. Корягин М.Е., Чистяков А.С. База данных для описания рынка междугородных пассажирских перевозок // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 1(56). С. 38–45. DOI:10.52170/1815-9262-2021-56-38

13. Макарова Е.А., Елизаров С.Б., Муктепавел С.В. Автоматизированная система прогнозирования пассажирских транспортных потоков на базе АСУ «Экспресс» // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2011. № 4. С. 21–27. EDN NYHLZT.

14. Grosche Tobias, Rothlauf Franz, Heinzl Armin. Gravity models for airline passenger volume estimation. *Journal of Air Transport Management*. 2007. 13:175-183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001
15. Birolini Sebastian, Pais Antunes António, Cattaneo Mattia, Paleari Stefano. Integrated flight scheduling and fleet assignment with improved supply-demand interactions. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021. 149. 162-180. DOI: 10.1016/j.trb.2021.05.001
16. Штоцкая А.А., Михайлов А.Ю. Оценка транспортной подвижности населения на основе дезагрегированных моделей // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21, № 5(124). С. 199–207. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-199-207. EDN YPLMWZ.
17. Ibarra-Rojas O., J., Delgado R. Giesen, Muñoz J.C.. Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature Review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015. 77: 38-75. DOI: 10.1016/j.trb.2015.03.002
18. Grigorova T., Davidich Yu., Dolya V. Assessment of Elasticity of Demand for Services of Suburban Road Passenger Transport // *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. Vol. 3, No 2. P. 13–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44768/
19. Wang Sen, Gao Yi. A literature review and citation analyses of air travel demand studies published between 2010 and 2020. *Journal of Air Transport Management*. 2021.79. 102135. DOI:10.1016/j.jairtraman.2021.102135
20. Lu M., Zhu H., Luo X., & Lei, L. Intercity travel demand analysis model. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015. 6. DOI: 10.1155/2014/108180
21. N. Dike Declan, Ejem Ejem, Erumaka Onyinyechi, Chukwu Oluchi Ibe, Callistus. Estimation of inter-city travel demand for public road transport in Nigeria. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2018. 3. 88-98. DOI: 10.14254/jstl.2018.3-3.7
22. Chistyakov A., Koryagin M. Interurban Travel Mode Choice Model Which Based on Departures Frequency and Passengers' Preferences. *International-Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2021. P. 964-973. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_105
23. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1-15. DOI: org/10.1016/j.tre.2015.08.007
24. Доля К.В. Формализация гравитационной модели для расчета параметров междугородних пассажирских корреспонденций // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 437–443. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443
25. Нурминский Е. А., Пугачев И.Н., Шамрай Н.Б., Седюкевич В.Н. Определение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей // *Наука и техника*. 2015. № 5. С. 39–45. EDN UMFMTL.
26. Горбачев П.Ф., Крикун В.И., Акбар Д.П. Моделирование спроса на перевозку пассажиров в пригородном сообщении // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. Т. 2, № 3(62). С. 12–15. EDN QAJHHZ.
27. Фадеев А.И., Ильянков А.М. Управление транспортным предложением на регулярных междугородных автобусных линиях // *Вестник СибАДИ*. 2023; 20(5): 632-648. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648
28. Kinene Alan, Birolini Sebastian. Optimization of subsidized air transport networks using electric aircraft. *Transportation Research Part B Methodological*. 2024. 190. 103065. DOI: 10.1016/j.trb.2024.103065
29. Grosche Tobias, Rothlauf Franz, Heinzl Armin. Gravity models for airline passenger volume estimation. *Journal of Air Transport Management*. 2007. 13. 175-183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001
30. Аземша С.А., Скирковский С.В., Горев А.Э. Установление закономерностей в изменении объема пассажирских перевозок от численности жителей населенного пункта // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 5(76). С. 206–216. 10.23968/1999-5571-2019-16-5-206-216. EDN KFKQMX.
31. Zulkarnain Ahnis, Pasaribu Hisar, Sembiring, Javensius. An Estimating Air Travel Demand in North Sumatra Using Gravity Model Approach with Economic and Route Analysis. *Langit Biru: Jurnal Ilmiah Aviasi*. 2025. 18. 1-12. DOI: 10.54147/langitbiru.v18i1.1284
32. Акулов В.В. Анализ методов учёта интенсивности движения на автомобильных дорогах // *Вестник евразийской науки*. 2012. №4 (13). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-uchyota-intensivnosti-dvizheniya-na-avtomobilnyh-dorogah> (дата обращения: 28.05.2025).
33. Хусаинов Р.М., Талипов Н.Г., Катасёв А.С., Шалаева Д.В. Интеллектуальная система анализа транспортных потоков в автоматизированных системах управления дорожным движением // *Программные продукты и системы*. 2024. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-sistema-analiza-transportnyh-potokov-v-avtomatizirovannyh-sistemah-upravleniya-dorozhnym-dvizheniem> (дата обращения: 31.05.2025).
34. Zheng Y., Capra L., Wolfson O., Yang H. Urban computing: Concepts, methodologies, and applications // *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, vol. 5, no. 3 - pp. 1–55, Sep. 2014 DOI:10.1145/2629592
35. Chen M., Mao Sh., Zhang Y., Victor C.M. *Leung Big Data. Related Technologies // Challenges, and Future Prospects*, Spinger, 2014. 100 p.
36. Трегубов В.Н. Использование информации сотовых операторов в городских транспортных исследованиях // *Транспортные системы и технологии*. 2020. Т. 6, № 2. С. 20–33. DOI: 10.17816/transsyst20206220-33. EDN UJIRSG.

REFERENCES

1. Woldeamanuel M. Evaluating the competitiveness of intercity buses in terms of sustainability indicators. *Journal of Public Transportation*. 2012; Vol. 15, No. 3: 5. DOI:10.5038/2375-0901.15.3.5

2. Javid R., Sadeghvaziri E. Investigating the Relationship Between Access to Intercity Bus Transportation and Equity. *Transportation Research Record*, 2022, p. 03611981221088218. DOI: 10.1177/03611981221088218
3. Group K. Effective Approaches to Meeting Rural Intercity Bus Transportation Needs. Report 79, Transit Cooperative Research Program. *Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.*, 2002. 184 p. DOI: 10.5038/2375-0901.15.3.7
4. Nielsen G., Lange T. Network design for public transport success—theory and examples. Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo, 2008. 30 p.
5. Ryan F., Allard R. F., Moura F., The Incorporation of Passenger Connectivity and Intermodal Considerations in Intercity *Transport Planning, Transport Reviews*, 2015, DOI: 10.1080/01441647.2015.1059379
6. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. Modeling transport John Willey & Sons, 2011. 586 p. DOI: 10.1002/9781119993308
7. Alderighi M., Cento, A., Nijkamp, P., Rietveld, P. Network competition – the coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*. 2005; 11(5): 328–334. DOI:10.1016/j.jairtraman.2005.07.006
8. Alderighi M, Feder C, Nijkamp P, Ungureanu EI Simple pricing rules in complex air transport systems. Handbook on Entropy, Complexity and Spatial Dynamics: A Rebirth of Theory? Chapter 18. 2021: pp. 304 – 320 DOI: 10.4337/9781839100598.00027
9. Merrina A., Sparavigna, A., Wolf, R. A. The intermodal networks: A survey on intermodalism. *World Review of Intermodal Transport Research*. 2007; 1(3): 286–299.
10. Ranjbari A., Hickman M., Chiu YC. A Mathematical Optimization Model for Solving the Intercity Transit Network Design Problem // CASPT 2018 Extended Abstract. Available at: http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT_2018_paper_128.pdf. (accessed 25th May 2025)
11. Sunhyung Yoo, Jinwoo Brian Lee, and Hoon Han. A reinforcement learning approach for bus network design and frequency setting optimization. *Public Transport*. 2023; pp 1–32. DOI: 10.1007/s12469-022-00319-y
12. Korjagin M.E., Chistjakov A.S. Baza dannyh dlja opisaniya rynka mezhdugorodnyh passazhirskih pere-vozok [Long Distance Passenger Market Description Database]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*. 2021; 1(56): 38–45. (in Russ.) DOI: 10.52170/1815-9262-2021-56-38
13. Makarova E.A., Elizarov S.B., Muktepa-vel S.V. Avtomatizirovannaja sistema prognozirovaniya passazhirskih transportnyh potokov na baze ASU «Jek-spress» [Automated system for forecasting passenger traffic flows based on ACS “Ex-press”]. *Vestnik nauch-no-issledovatel'skogo insti-tuta zheleznodorozhnogo transporta*. 2011; 4: 21–27. (in Russ.) – EDN NYHLZT.
14. Grosche Tobias , Rothlauf, Franz, Heinzl, Armin. Gravity models for airline passenger volume estimation. *Journal of Air Transport Management*. 2007. 13. 175-183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001
15. Birolini S., Pais A. A, Cattaneo M., Paleari S. Integrated flight scheduling and fleet assignment with improved supply-demand interactions. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021. 149. 162-180. DOI: 10.1016/j.trb.2021.05.001
16. Shtotskaya A.A., Mikhailov A.Yu. Assessment of transport mobility of the population on the basis of disaggregated models. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2017. Vol. 21. No. 5. P. 199–207. (in Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-199-207
17. Ibarra-Rojas, O., J., Delgado, R. Giesen, and J.C. Muñoz. Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature Review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015. 77: 38-75. DOI: 10.1016/j.trb.2015.03.002
18. Grigороva T., Davidich Yu., Dolya V. Assessment of Elasticity of Demand for Services of Suburban Road Passenger Transport . *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. Vol. 3, No 2. P. 13–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44768/
19. Wang Sen, Gao Yi. A literature review and citation analyses of air travel demand studies published between 2010 and 2020. *Journal of Air Transport Management*. 2021. 79. 102135. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2021.102135
20. Lu M., Zhu H., Luo X., Lei, L. Intercity travel demand analysis model. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015. 6. DOI: 10.1155/2014/108180
21. N. Dike, Declan, Ejem Ejem, Erumaka Onyinyechi, Chukwu, Oluchi, Ibe, Callistus. Estimation of inter-city travel demand for public road transport in Nigeria. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2018. 3. 88-98. DOI:10.14254/jss-dtl.2018.3-3.7.
22. Chistyakov A., Koryagin M. Interurban Travel Mode Choice Model Which Based on Departures Frequency and Passengers' Preferences. *International-Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2021. P. 964-973.
23. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1-15. DOI: 10.1016/j.tre.2015.08.007
24. Dolya C.V. Gravity Model Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence. *Science and Technique*. 2017. 16 (5), 437–443. (in Russ.) DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443
25. Nurminskij E.A., Pugachev I.N., Shamraj N.B., Sedjukevich V. N. Opredelenie passazhiropotokov v regional'noj transportnoj sisteme na osnove modifitsirovannyh gravitacionnyh modelej [Determination of passenger traffic in the regional transport system on the basis of modified gra-vital models]. *Nauka i tehnika*. 2015; 5. 2015: 39 – 45. (in Russ.) EDN UMFMTL.
26. Gorbachev P.F., Krikun V.I. Modelirovanie sprosa na perevozku passazhirov v prigorodnom soobshhenii [Modeling Demand for Commuter Transportation]. *VEZhPT*. 2013; 3(62):12–15. (in Russ.) EDN QAJHHZ.
27. Fadeev A.I., Ilyankov A.M. Transport supply management on regular intercity bus lines. *The*

Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2023;20(5):632-648. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648. EDN: WMBMDI

28. Kinene A., Birolini S. Optimization of subsidized air transport networks using electric aircraft. *Transportation Research Part B Methodological*. 2024. 190. DOI: 103065. 10.1016/j.trb.2024.103065

29. Grosche T., Rothlauf F., Heinzl A. Gravity models for airline passenger volume estimation. *Journal of Air Transport Management*. 2007. 13. 175-183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001

30. Azemsha S.A., Skirkovskiy S.V., Gorev A.E. Determining the regularities in the change of the passenger traffic volume from the number of inhabitants of the settlement. *Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 5 (76), pp. 206-216. – EDN KFKQMX. (in Russ.)

31. Zulkarnain A., Pasaribu H., Sembiring J. An Estimating Air Travel Demand in North Sumatra Using Gravity Model Approach with Economic and Route Analysis. *Langit Biru: Jurnal Ilmiah Aviasi*. 2025. 18. 1-12. DOI: 10.54147/langitbiru.v18i1.1284

32. Akulov V.V. Analysis of the accounting methods of traffic on the roads. *Naukovedenie*. 2012;(4): 1TPГCY412. Available at: <https://naukovedenie.ru/PD-F/1trgsu412.pdf> (accessed 25th May 2025). (In Russ., abstract in Eng.)

33. Khusainov R.M., Talipov N.G., Kataev A.S., Shalaeva D.V. Intelligent traffic flow analysis system in automated traffic management systems. *Software products and systems*. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-sistema-analiza-transportnyh-potokov-v-avtomatizirovannyh-sistemah-upravleniya-dorozhnym-dvizheniem> (accessed 31th May 2025). (in Russ.)

34. Zheng Y., Capra L., Wolfson O., Yang H. Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, vol. 5, no. 3 - pp. 1–55, Sep. 2014 DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2629592>

35. Chen M., Mao Sh., Zhang Y., Leung Victor C.M. Big Data. Related Technologies. *Challenges, and Future Prospects*, Springer, 2014. 100 p.

36. Tregubov V.N. Mobile Data Usage in Urban Transport Research. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(2):20-33. (in Russ.) DOI: 10.17816/transsyst20206220-33

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А.И. Постановка задачи, разработка математической модели планирования перевозок

по междугородной регулярной автобусной линии, программное обеспечение, формулирование заключения.

Ильянков А.М. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, обзор литературных источников.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Fadeyev A.I. Problem statement, mathematical model development of transportation planning on intercity scheduled bus line, software provision, formulation of the conclusion.

Ilyankov A.M. Participation in initial data preparation and calculations, literature review.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660062, г. Красноярск, пр. Свободный, 79).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN-code: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Ильянков Алексей Михайлович – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660062, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, стр. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN-code: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fadeev Alexandr I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Transport Department, Siberian Federal University (79, Krasnoyarsk, 660062).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN-code: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Ilyankov Aleksey M. – Postgraduate student, Transport Department, Siberian Federal University (79, Krasnoyarsk, 660062).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN-code: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Научная статья
УДК 338.984
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-282-293>
EDN: OFFFNБ



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РЕШЕНИЯ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ (ТРИЗ) ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ АВТОТРАНСПОРТА И РАЗРАБОТКИ МАТРИЦЫ ЗРЕЛОСТИ

И.В. Анохов¹ ✉, Н.Ю. Торопов²

¹ Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта,
г. Москва, Россия

² Российский дорожный научно-исследовательский институт,
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
i.v.anokhov@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современный транспорт находится в стадии кардинальной трансформации, связанной с внедрением информационных и интеллектуальных систем. Этот процесс отличается неопределенностью и непредсказуемостью. В статье предпринята попытка теоретически рассмотреть процесс перехода в новое качество. Цель исследования – разработка матрицы зрелости для технической системы «Автомобиль», которая позволила бы судить о ее возможных будущих состояниях.

Материалы и методы. Для анализа тенденций развития технических систем сегодня применяются различные теоретические модели и шкалы (S-образная кривая жизненного цикла, шкала уровня технологической готовности, уровни автономности транспорта и др.), которые не учитывают факторы экономического, социального, инфраструктурного и иного характера. Между тем такой вид транспорта, как автомобиль, отличается высоким уровнем сложности, определяет во многом состояние транспортной системы страны и поэтому требует кардинально иного способа оценки. Для разработки матрицы в статье использован аналитический аппарат Теории решения изобретательских задач (ТРИЗ).

Результаты. Представлена матрица зрелости, которая отражает процесс последовательного перехода функций технической системы «Автомобиль» к надсистеме. Каждый этап этого перехода означает сворачивание одной из подсистем автомобиля и в настоящее время наблюдается в подсистеме «Вычислитель». В конечном счете автомобиль (в современном его понимании) может кардинально трансформироваться путем сворачивания всех подсистем и передачи их функций надсистеме (интеллектуальной транспортной системе). В итоге его структура будет сведена к подсистеме «Накопитель» с соответствующей монофункцией.

Обсуждение и заключение. Теоретическое представление о структуре и стадиях развития, сформулированное в виде матрицы зрелости, может быть полезным при разработке стратегии развития автомобилестроения и автодорожного хозяйства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобиль, перевозки, матрица зрелости, интеллект, транспорт, Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ)

Статья поступила в редакцию 16.02.2026; одобрена после рецензирования 03.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Анохов И.В., Торопов Н.Ю. Применение теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) для оценки перспектив интеллектуализации автотранспорта и разработки матрицы зрелости // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 282-293. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-282-293>

© Анохов И.В., Торопов Н.Ю., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-282-293>
EDN: OFFFNB

THEORY OF INVENTIVE PROBLEM SOLVING (TRIZ) IN THE FIELD OF AUTOMOBILE TRANSPORT: AN ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR INTELLECTUALIZATION AND THE DEVELOPMENT OF A MATURITY MATRIX

Igor V. Anokhov¹ ✉, Nikolay Yu. Toropov²

¹Railway Research Institute,
Moscow, Russia

²Russian Road Research Institute,
Moscow, Russia

✉ corresponding author
i.v.anokhov@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern transport is undergoing a radical transformation due to the introduction of information and intelligent systems. This process is characterized by uncertainty and unpredictability. The article attempts to consider theoretically the process of transition to a new quality. The purpose of the study is to develop a maturity matrix for the Automobile technical system, which would allow us to assess its possible future states.

Materials and methods. To analyze the trends in the development of technical systems, various theoretical models and scales (S-shaped life cycle curve, scale of technological readiness, levels of transport autonomy, etc.) are used today, which do not take into account factors of an economic, social, infrastructural, and other aspects. Meanwhile, such a type of transport as a car is characterized by a high level of complexity, largely determines the state of the country's transport system, and therefore requires a radically different way of assessment. The analytical apparatus of the Theory of Inventive Problem Solving (TIPS) was used to develop the matrix.

Results. The maturity matrix is presented, which reflects the process of the sequential transition of the functions of the technical system "Automobile" to the supersystem. Each stage of this transition means the reduction of one of the car subsystems, and is currently being occurred in the "Calculator" subsystem. Ultimately, a car (in its modern sense) can be radically transformed by reduction of all subsystems and transferring their functions to an intelligent transport system. As a result, its structure will be reduced to the "Accumulating" subsystem with the corresponding mono-function.

Discussion and conclusion. A theoretical understanding of structure and stages of technical evolution, formulated in the form of the maturity matrix, can be useful in developing a strategy for the progress of automobile construction and road industry.

KEYWORDS: automobile, transportation, maturity matrix, intelligence, transport, Theory of Inventive Problem Solving

The article was submitted: February 16, 2025; approved after reviewing: March 03, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Anokhov I.V., Toropov N.Yu. Theory of inventive problem solving (TRIZ) in the field of automobile transport: an assessment of the prospects for intellectualization and the development of a maturity matrix. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 282-293. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-282-293>

© Anokhov Igor V., Toropov Nikolay Yu., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

До середины XX в. неявно считалось, что изобретательская и внедренческая деятельность поддаются стимулированию и регламентации в очень ограниченных пределах. Однако активное развитие крупносерийного и массового производств во второй половине прошлого столетия потребовало определенности и предсказуемости в этом вопросе. Как следствие, управление научно-техническими разработками стало приобретать целенаправленный, системный характер, что выразилось в разработке методов оценки технологий:

1) в методике Technology Readiness Assessment (TRA) [1, 2], разработанной Национальным аэрокосмическим агентством США (NASA). Она представляет процесс трансфера технологии в виде трех последовательных этапов:

- определение критических технологических элементов (Critical Technology Elements – CTE);

- оценка уровня технологической готовности (Technology Readiness Levels – TRL);

- разработка плана совершенствования технологии (Technology Maturation Plan – TMP);

2) S-образной кривой жизненного цикла, включающей участки [3, 4]:

- зарождения молодой технологии;

- роста технологии;

- развития ключевой технологии;

- устаревания и замены технологии;

3) шкале уровней автономности транспорта (беспилотных автомобилей), разработанной организацией SAE International (Society of Automotive Engineers) [5]: от уровня 0 (отсутствие автоматизации) до уровня 5 (полный автопилот).

На наш взгляд, такого рода шкалы и методы оценки имеют ограниченный спектр применения по следующим причинам:

- разработка и внедрение технологий рассматриваются в них как линейный процесс, в то время как на практике действует множество непрогнозируемых, нелинейно изменяющихся факторов;

- применимость ориентирована в первую очередь на простые технические системы, что не позволяет в полной мере адаптировать их к таким технологически сложным изделиям, как автомобиль;

- не учитываются факторы экономического, социального, политического, инфраструктур-

ного и иного характера, которые в развитии автомобиля зачастую имеют решающее значение;

- не учитываются возможности информатизации и интеллектуализации автомобиля;

- не учитываются альтернативные пути технологического развития.

Современный автомобильный транспорт имеет высокий уровень сложности (причем не только технической, но и экономико-социальной), не сопоставимый со сложностью любой его составляющей части. По этой причине актуальной задачей на сегодняшний день является разработка адекватных методов оценки зрелости автомобильного транспорта.

Научно-технический прогресс на транспорте

Всякая новая технология на транспорте является продуктом научно-технического прогресса (НТП) и объективно направлена на решение одной или нескольких задач:

- удешевление перевозки грузов, под которыми в данной статье понимается и перевозка пассажиров;

- расширение пропускных возможностей по территории страны;

- повышение гибкости доставки;

- сокращение времени доставки;

- повышение прогнозируемости грузоперевозок.

Теоретически НТП происходит путем передачи функций человека внешним системам. В полной мере это относится и к системе «Автомобиль»: на наш взгляд, его появлению предшествовал ряд технологических этапов:

1. Изобретение тары для грузов (керамические сосуды, мешки, бочки, короба, стеклотара, гофрокартон, паллеты, контейнеры и многое др.). Это позволило добиться стандартизации процессов хранения и перемещения грузов с соответствующим увеличением объемов.

2. Изобретение технических систем, ослабляющих сопротивление внешней среды движущемуся транспорту (колесо, дорожное покрытие).

3. Замена мускульной силы человека или животного силой технического двигателя (парового, электрического, внутреннего сгорания).

4. Изобретение вычислительных систем, дополняющих или заменяющих водительские, диспетчерские и иные функции человека.

Рассмотрим роль НТП в развитии автомобиля с помощью методологии ТРИЗ^{1,2}, которая была разработана советским исследователем Г.С. Альтшуллером.

Одним из главных достоинств методологии ТРИЗ является «перевод решаемой проблемы в более абстрактный вид, чтобы сделать её независимой от её физической области, описывая её в форме противоречий» [6]. Сегодня она широко применяется в России и за рубежом, в т.ч. для решения транспортных задач: технологии применения водорода в топливных элементах [7], при проектировании компонентов для новых моделей автомобилей [8], специального транспорта [9], композитных покрытий [10] и др.

В соответствии с законом полноты частей системы ТРИЗ всякая техническая система, в том числе автомобиль, в наиболее развернутом виде включает следующие подсистемы:

- «Рабочий орган», главной функцией которого является физическое воздействие на объект для получения желаемого эффекта. В рамках настоящей статьи рабочий орган – это та подсистема, с помощью которой преодолевается сопротивление внешней среды и

обеспечивается достижение требуемого эффекта (целевой функции) – перемещение в пространстве (т.е. колесо, электромагнитное поле, воздушная подушка и т.п.).

- «Источник энергии». В данном случае – это все виды вещества и энергии, пригодные для использования в автомобиле.

- «Двигатель». Главная функция – преобразование энергии, получаемой от «Источника энергии».

- «Трансмиссия». Главная функция – передача энергии от «Двигателя» к «Рабочему органу».

Авторы считают, что применительно к транспортному средству перечисленные подсистемы из методологии ТРИЗ необходимо дополнить еще двумя элементами (рисунок 1):

1. «Накопитель», под которым авторы понимают часть автомобиля, предназначенную для размещения пассажиров и груза (кузов грузового автомобиля, салон для пассажиров, платформа для контейнера и т.п.).

2. «Вычислитель». Главная функция – управление «Двигателем», «Трансмиссией» и «Рабочим органом».

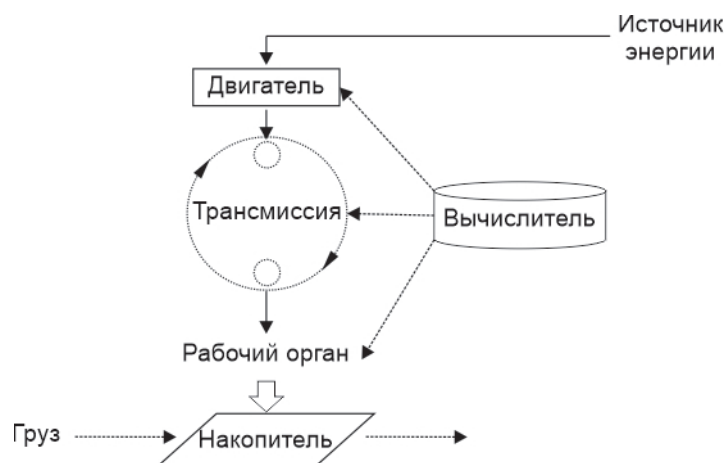


Рисунок 1 – Внутренняя структура технической системы с точки зрения ТРИЗ
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Internal structure of the technical system from the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) perspective
Source: compiled by the authors.

¹ Альтшуллер Г.С. Найти идею: введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. М.: Альпина Паблишер. 2021. 401 с.

² Шпаковский Н.А., Новицкая Е.Л. ТРИЗ. Практика целевого изобретательства. М.: ФОРУМ. 2011. 335 с.

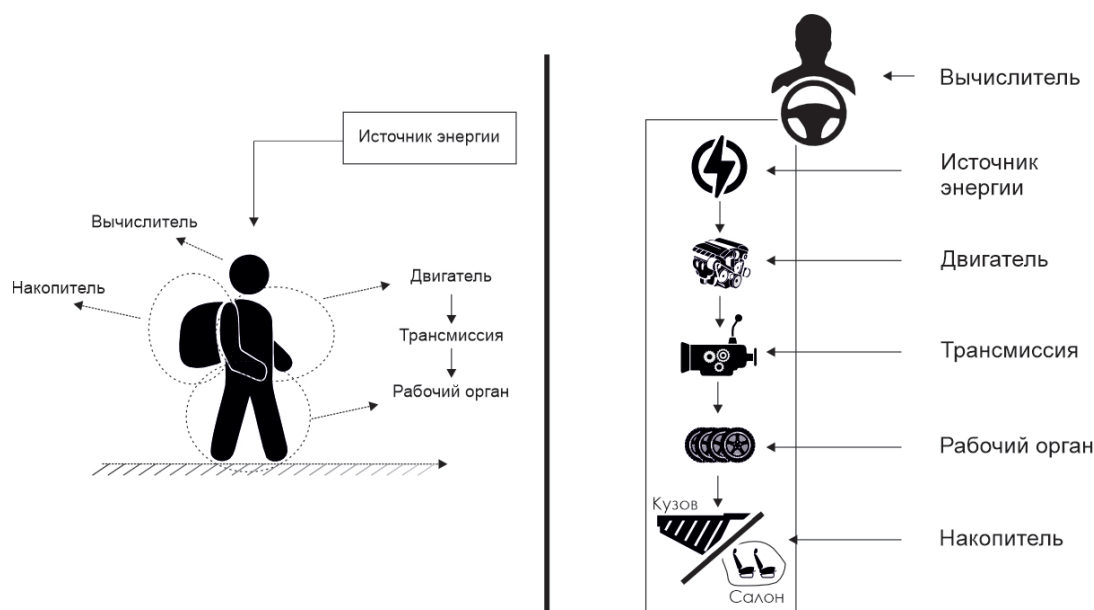


Рисунок 2 – Структура отдельной транспортной единицы с точки зрения ТРИЗ: человека и автомобиля
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Structure of the separate transport unit from the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) perspective: a person and a vehicle
 Source: compiled by the authors.

В самом простом понимании транспортное средство может состоять всего из одного человека, переносящего грузы. При этом и такая система будет иметь все перечисленные выше подсистемы (рисунок 2).

На рисунке 2 показано, что каждая отдельная транспортная единица с точки зрения ТРИЗ структурно идентична другим транспортным системам. Более того, на основе работ Г.С. Альтшуллера мы можем предположить, что данная структура фрактально воспроизводится в каждой подсистеме технической системы «Автомобиль»; в свою очередь каждая подсистема эволюционирует в полную систему ТРИЗ (в т.ч. обретая собственный Вычислитель).

Такая гипотеза о фрактальности технических систем и подсистем будет использоваться в дальнейшем анализе данной статьи.

Матрица зрелости автомобильного транспорта

За минувшие эпохи автомобиль как техническая система преодолел несколько этапов развития (зрелости):

1. Нулевой этап. Система состоит из двух подсистем: Накопитель + Рабочий орган (органы движения человека или животного) и/или надсистема (например, в виде рек и озер). Человек являлся единственным транспортным средством, которое иногда дополнялось эле-

ментами механизации (разного рода колесной техникой, подъемными устройствами, инструментами складирования, дорожным покрытием и др.).

2. Этап специализации. Возникает и совершенствуется техническая система перевозки: колесо плюс двигатель (в виде мускульной силы человека и животных). Появляется регулярный процесс грузоперевозок, благодаря чему данный вид транспорта начинает активно развиваться, а грузоперевозки становятся отдельным специализированным видом деятельности.

3. Этап принятия концепции. Мускульная сила человека и животных меняется на технический автономный двигатель, благодаря чему кардинально увеличиваются провозные возможности и грузопотоки. Окончательно складывается концепция автомобиля.

4. Этап автоматизации. Управление подсистемами автомобиля все больше осуществляется с помощью компьютерных программ по заранее заложенному и (что принципиально важно) неизменному алгоритму.

5. Этап интеллектуализации. Происходит передача от человека к технической системе способности частично или полностью изменять выполняемую программу. В результате этого происходит последовательное освобождение человека от непосредственного уча-

ствия в оперативном управлении перевозочным процессом. Другими словами, система «Автомобиль» в этом случае уже способна:

- воспринимать и интерпретировать сигналы внешней среды;
- корректировать программу на основе контекста;
- адаптироваться, самонастраиваться и самообучаться;
- автономно перестраивать весь перевозочный процесс.

Предложенная выше классификация уровней развития автотранспорта будет использована далее авторами для построения матрицы.

Следует отметить, что становление каждого нового этапа развития из указанных выше не уничтожает доминирующую технологию предшествующего этапа полностью, а вытесняет ее в изолированные рыночные ниши (как не исчез, например, гужевой транспорт).

В транспортной отрасли уже есть примеры интеллектуализированных систем, способных действовать без непосредственного присутствия человека: адаптивные системы светофорного управления, высокоавтоматизированный транспорт, автономные средства для доставки грузов (дроны и роботы-доставщики), а также интеллектуальные платежные системы транспорта, системы ситуационного управления и т.п. В стадии теоретической проработки находятся проекты автономных контейнеров [11] и контейлеров [12], автоматизированных интермодальных грузовых перевозок [11], челночных танкеров [13] и т.п. Такого рода примеры означают, что интеллектуализация объективно направлена на полное удаление человека из процесса перевозки и передачу всех его функций киберфизическим системам – это «умные системы, включающие интерактивные инженерные сети из физических и коммуникационных компонент» [14]. По мнению авторов, эти системы должны быть способны выполнять как минимум следующие функции:

- прогнозирование потребности в перемещении груза;
- заблаговременное планирование производственных мощностей для физического перемещения груза (то есть обновление, модификацию или даже замену «Рабочего органа», «Трансмиссии», «Двигателя»);
- комбинирование производственных мощностей для решения текущих задач по физическому перемещению груза и пассажиров;
- контроль над процессом транспорти-

ровки и связанным с ним документооборотом;

- обеспечение всеми видами энергии;
- корректировка процессов прогнозирования, планирования и физической транспортировки.

Интеллектуализация требует выполнения ряда условий:

1. Полная прогнозируемость транспортных потоков.
2. Эффективные инструменты нейтрализации нестабильности внешней среды.
3. Наличие у всех участников транспортировки одного и того же максимально полного объема актуальных данных.
4. Средства транспортировки грузов, технологически способные действовать автоматически в составе киберфизических систем.
5. Значительный рыночный запрос на плановую и неограниченную по времени перевозку однородных грузов.
6. Полная комплементарность деятельности всех участников перевозочного процесса.

Перечисленные условия в полном объеме сегодня являются труднодостижимыми, но в будущем они могут оказаться вполне выполнимыми.

Матрица зрелости автотранспорта

В методологии ТРИЗ используется целый ряд визуальных матриц, которые постоянно совершенствуются и уточняются [15], а также разрабатывается их математическое представление [16].

На этапе интеллектуализации зрелость той или иной технологии нужно оценивать по степени присвоения ею функций человека.

История развития автомобильного транспорта показывает, что техническая система (т.е. автомобиль) изменялась путем развития её подсистем (технических узлов, агрегатов и др.). Кроме того, активно развивались и надсистемы, в т.ч. надсистема регулирования дорожного движения, информационная надсистема, платежная надсистема и др. И в настоящее время наряду с эволюцией технической системы происходит не всегда внешне видимая эволюция и элементов надсистемы второго и третьего порядков, которая в перспективе может позволить формировать из отдельных транспортных средств беспилотные транспортные потоки. Уже сегодня есть примеры организации движения колонны высокоавтоматизированного транспорта по технологии platooning, при которой два и более грузовых транспортных средства движутся в колонне, активно координируя свое движение с помощью беспроводных технологий, причём

головное транспортное средство является ведущим, а все последующие – ведомыми [17, 18]. При пассажирских перевозках перспективными являются технологии динамической вместимости в виде транспортных средств, способных менять свою вместимость в зависимости от величины пассажиропотока [19]. Преимуществами такой технологии являются уменьшение расхода топлива и повышение эффективности движения, отсутствие издержек на содержание водителей ведомых транспортных средств.

Более того, сегодня мы видим, что стремительно интеллектуализируются и отдельные компоненты автомобиля (т.е. его подсистемы), получая, например, возможность связываться с другими транспортными средствами и с элементами обустройства автомобильных дорог (в т.ч. минуя водителя), а также влиять на движение автомобиля или же полностью управлять им. При этом сама технология движения и конструкция автомобиля концептуально не меняются, а все эволюционные процессы происходят в надсистеме и подсистемах. Другими словами, каждая из подсистем автомобиля постепенно обретает свои собственные подсистемы второго порядка (см. рисунок 1), включая Вычислитель и становясь в полной мере обособленными техническими системами. Уже сейчас некоторые элементы автомобиля способны автоматически изменять собственный режим работы в соответствии с изменяющейся внешней дорожной ситуацией.

Кроме того, сегодня можно наблюдать, как Вычислитель автомобиля постепенно становится функцией надсистемы, которая уже способна дистанционно управлять им в пределах среды штатной эксплуатации. Все меньше остается сомнений в том, что такое управление может осуществляться при любых дорожных условиях и в течение всего жизненного цикла автомобиля, что будет иметь далеко идущие последствия.

В частности, это означает, что интеллектуальная транспортная надсистема должна будет взять на себя и все функции по поддержанию работоспособности автомобиля на весь срок жизненного цикла, включая обеспечение энергией, техническое обслуживание, обновление компьютерных алгоритмов и т.п., а также обеспечивать юридическое и экономическое сопровождение его работы (например, страхование и логистику). Соответственно тенденции развития событий показывают, что

и эти сферы должны оказаться под контролем интеллектуальной надсистемы: только при таком условии могут быть обеспечены массовость, бесперебойность и бесшовность транспортных потоков (что, в свою очередь, обеспечит экономическое преимущество по сравнению с транспортом, управляемым человеком).

Таким образом, в итоге надсистема возьмет на себя управление всеми элементами автомобиля. При этом подсистема «Вычислитель» оказывается физически вынесенной за пределы корпуса автомобиля (вероятно, останутся только те Вычислители, которые являются собственными элементами подсистем). В связи с этим возникает вопрос: могут ли быть физически вынесены еще какие-либо подсистемы?

В данном случае можно рассуждать следующим образом. Как известно, в силу положительного эффекта масштаба при массовой технологии производства себестоимость каждой единицы товара, как правило, значительно ниже, чем при штучном или мелкосерийном производстве. Вследствие этого централизованное обеспечение энергией большого количества однотипных автомобилей дешевле, чем индивидуальное, а транспортировка совокупности вагонов с помощью локомотива выгоднее оснащения каждого вагона собственным двигателем. Логично предположить, что и автоперевозки будут экономически более эффективны, если автомобиль будет снабжаться энергией централизованно, например, с помощью контактного рельса (как метро), электромагнитного поля (как в Hyperloop) и т.п. При таком сценарии автомобиль передает надсистеме и подсистеме как «Источник энергии», так и «Двигатель» (вероятно вместе с «Трансмиссией»). Подсистема «Рабочий орган» (т.е. колесо и подвеска в целом) при достаточном уровне развития технологий также может покинуть автомобиль. В этом случае фактически единственной неустранимой и непередаваемой подсистемой окажется «Накопитель» и автомобиль превращается в предельно упрощенную систему, выполняющую монофункцию – концентрацию грузов и пассажиров в удобной для транспортировки форме.

Таким образом, система «Автомобиль» теоретически может вернуться на исходную точку своего развития (т.е. к «Накопителю»), а затем начать новый виток развития, но на более высоком технологическом уровне (рисунок 3).

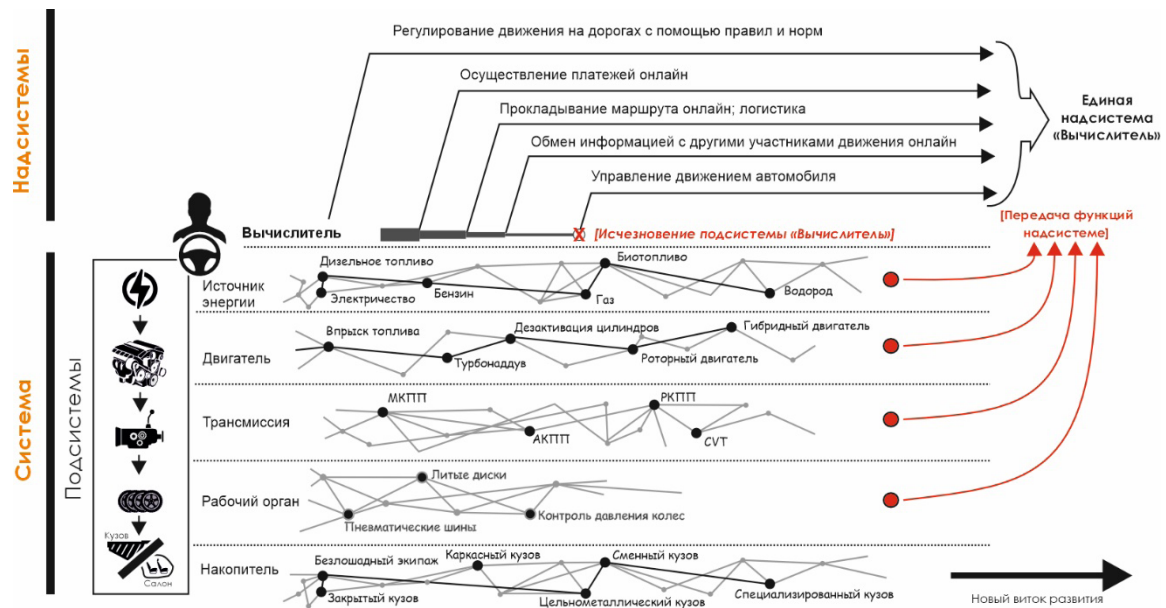


Рисунок 3 – Гипотетическое изменение концепции технической системы «Автомобиль»
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Hypothetical change in the concept of the «Automobile» technical system
Source: compiled by the authors.

На рисунке 3 показано, что предположительно подсистемы автомобиля будут сворачиваться, передавая свои функции в надсистему. В транспортной сфере можно найти примеры свертывания элементов и передачи функций другим подсистемам (например, исчезновение крыльев и выполнение их функций корпусом самолета – экраноплан; несущий кузов автомобиля, заменяющий рамную конструкцию), но на рисунке 3 речь идет о переходе функций в надсистему.

Эволюция подсистем заканчивается в той стадии, когда у них появляется собственный «Вычислитель», информационно связанный с надсистемой. Каждая подсистема имеет собственную скорость развития, но алгоритм этого развития, по-видимому, будет идентичным.

С этой точки зрения наиболее развитой подсистемой автомобиля сегодня является «Вычислитель», т.к. он имеет или может иметь собственные подсистемы второго порядка:

- процессор («Вычислитель» второго порядка или «Вычислитель*»), благодаря которому возможно автономное выполнение части задач по управлению движением автомобиля;
- собственный источник энергии (например, блок питания, аккумулятор, солнечная батарея и т.п.) («Источник энергии*»);
- устройства ввода/вывода («Двигатель*»);

- магистраль или системная шина («Трансмиссия*»);
- оперативную и долговременную память («Накопитель*»);
- процессор («Рабочий орган*»).

В настоящее время происходит последовательная передача функций надсистеме за счет процессора «Вычислителя». Как только все его функции будут переданы, у технической системы «Автомобиль» отпадет объективная необходимость не только в «Вычислителе*», но и в других его подсистемах второго порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из вышесказанного, мы можем в первом приближении оформить матрицу зрелости графически. Это можно осуществить с различной степенью детализации. В максимально обобщенном виде каждая ячейка матрицы может отражать одно из двух состояний: имеется – не имеется, да – нет, «+» или «-». Логика построения матрицы исходит из рассмотренного выше тезиса о том, что каждая подсистема фрактально воспроизводит саму систему. Кроме того, матрица должна отображать уровни развития технической системы «Автомобиль» и позволять судить о ее будущих возможных состояниях (рисунок 4).

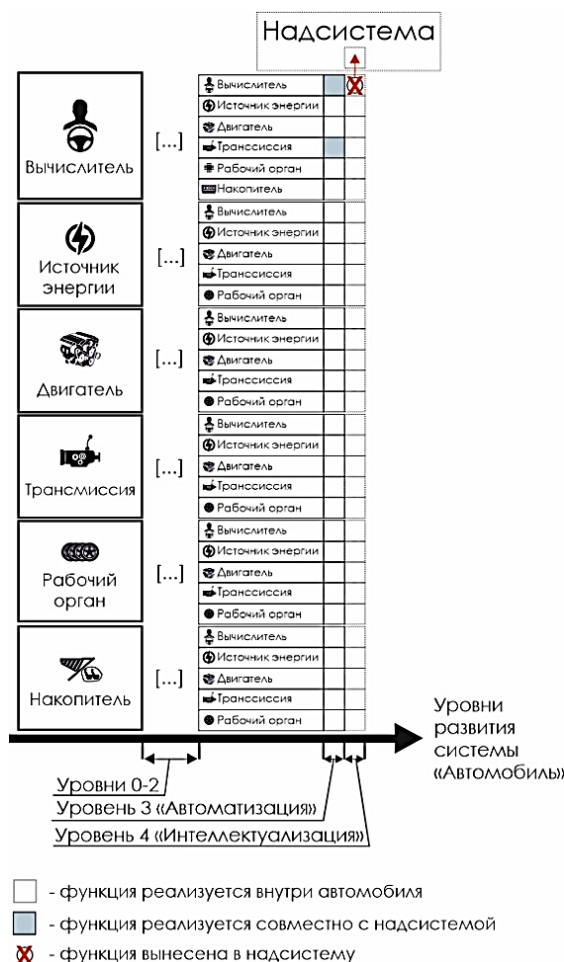


Рисунок 4 – Матрица зрелости технической системы «Автомобиль»: фрактальное развитие системы и сворачивание подсистем (общий вид)
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Maturity Matrix of the Technical System «Automobile» (general view): fractal development of the system and reduction of subsystems
 Source: compiled by the authors.

В представленной матрице конечный итог развития технической системы «Автомобиль» можно выразить формулировкой идеального конечного результата в ТРИЗ: система отсутствует, а ее функция выполняется. Ранее подобием такой идеальной транспортной системы являлись речные пути, которые позволяли выполнять регулярные перевозки без создания стационарной технической системы. Это означает, что система «Автомобиль» (в современном понимании) может исчезнуть, а ее функции будет выполнять надсистема – аналог водных путей прошлого.

Предложенная матрица требует проверки и апробации, которые планируется осуществить в дальнейших исследованиях.

ВЫВОДЫ

В статье предложено применить методы ТРИЗ для моделирования матрицы зрелости такой сложной технической системы, как автомобиль.

Предложенная в статье матрица зрелости позволит прогнозировать развитие системы и будет полезна в планировании уровня и оценки технологической готовности при разработке инновационной продукции в этой области.

На сегодняшний день конструкцию автомобиля можно считать логически завершенной, т.к. концептуальное развитие происходит главным образом в сфере подсистем и надсистем. В ходе этого надсистемы обеспечивают автомобилю возможность автоматически со-

гласовывать свои движения с другими движущимися объектами и частично снимают часть функций с человека. Кроме того, подсистемы автомобиля теперь способны напрямую контактировать с надсистемой без участия водителя.

Все это позволяет предполагать, что с течением времени надсистемы и все подсистемы обретут способность непрерывно обмениваться информацией между собой, полностью управляя отдельным автомобилем и автомобильными потоками в целом. Следует ожидать, что это произойдет одновременно с исчезновением подсистемы «Вычислитель» в системе «Автомобиль». Процесс декомпозиции технической системы может продолжаться до тех пор, пока она не будет сведена к одной подсистеме «Накопитель» с соответствующей монофункцией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гранич В.Ю., Дутов А.В., Мирошкин В.Л., Сыпало К.И. Об уровнях готовности технологий и применении Калькулятора УГТ для их оценивания // Экономика науки. 2020. Т. 6, № 1-2. С. 6–10. DOI: 10.22394/2410-132X-2020-6-1-2-6-10. EDN IDJEKP.
2. Митягина М.Н., Назаревич С.А. Применение метода априорного ранжирования при оценке уровня готовности технологии в сложной технической системе // Системный анализ и логистика. 2023. № 2(36). С. 45–53. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-2-45-53. EDN TQBPNX.
3. Kucharavy D., De Guio R. Application of S-shaped curves. *Procedia Engineering*. 2011. No 9. Pp. 559–572.
4. Schilling M.A., Esmundo M., Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government. *Energy Policy*. 2009, doi:10.1016/j.enpol.2009.01.004.
5. Чаруйская М.А. Исследование моделей жизненного цикла технологий // Экономические науки. 2024. № 230. С. 38–45. DOI: 10.14451/1.230.38. EDN PWRELB.
6. Fleury S., Richir S. Some Creative Problem-Solving Methods: TRIZ, C-K, CPS, Design Sprint. In *Immersive Technologies to Accelerate Innovation* (eds S. Fleury and S. Richir). 2021. DOI: 10.1002/9781119887294.ch5
7. Abdul Rahim Z., Iqbal M.S. Innovation Process of Hydrogen Fuel Cell Storage Technology Using the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ). *Chem. Eng. Technol.*, 2023. 46: 2635-2643. DOI: 10.1002/ceat.202300310
8. Da Silva RH, Kaminski PC, Armellini F. Improving new product development innovation effectiveness by using problem solving tools during the conceptual development phase: Integrating Design Thinking and TRIZ. *Creat Innov Manag.* 2020;29:685–700. DOI: 10.1111/caim.12399
9. Yu Sen-lin, Cheng Miao, Tian Qian, Community Micro-Ambulance Design Based on QFD and TRIZ Theories, *Mathematical Problems in Engineering*, 2023, 6698270, 25 pages, 2023. DOI: 10.1155/2023/6698270
10. H. Xu, L. Zhang, L. Wang, Y. Lu, H. Feng, A Robust Superhydrophobic/Conductive Composite Coating with Excellent Anticorrosive Performance. *Chemistry Select.* 2021, 6, 10412. DOI: 10.1002/slct.202101043
11. Лapidус Б.М. О создании Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы России и проекта «Интеллектуальный контейнерный конвейер» // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79, № 5. С. 276–281. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-5-276-281
12. Freimann R., Maier S., Sannia A. Self-Propelled Trailers – An Approach to Type Approval. In: Bargende, M., Reuss, HC., Wagner, A. (eds) 21. *Internationales Stuttgarter Symposium. Proceedings.* Springer Vieweg, Wiesbaden. 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-33466-6_2
13. Seungjin Sh., Hong-Seung R., Sung-Ho H. Technical Trends Related to Intermodal Automated Freight Transport Systems (AFTS) // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Vol. 34, Is. 2, 2018, Pages 161-169, DOI: 10.1016/j.ajsl.2018.06.013
14. Еремин Н.А., Столяров В.Е., Халворсен А.Л., Басниева И.К. Подводные челночные танкеры для транспортировки углеводородов // *Neftegaz.RU*. 2023. № 11. С. 42–51. EDN: ABXFIB
15. Chen, Shaohan, Kamarudin, Khairul Manami, Yan, Shihua, Analyzing the Synergy between HCI and TRIZ in Product Innovation through a Systematic Review of the Literature, *Advances in Human-Computer Interaction*, 2021, 6616962, 19 pages, 2021. DOI: 10.1155/2021/6616962
16. Lu, Shizhu, Guo, Yuqing, Huang, Wei, Shen, Min, Product Form Evolutionary Design Integrated with TRIZ Contradiction Matrix. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 3844324, 12 pages, DOI: 10.1155/2022/3844324
17. Zeng Y., Wang M., Rajan R. T. Decentralized coordination for truck platooning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022. 37, 1997–2015. DOI: 10.1111/mice.12899
18. Pourmohammad-Zia N., Negenborn R.R., Schulte, F. Collaborative platooning and routing for mixed fleets of electric automated vehicles and conventional trucks. *Intl. Trans. in Op. Res.*, 2025. DOI: 10.1111/itor.70073
19. Аземша С.А. Дорожный пассажирский транспорт динамической вместимости: история появления и перспективы развития // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2024. № 3(69). С. 28–50. EDN LYGXBC.
20. Bergenheim C., Shladover S., Coelingh E. Overview of platooning systems // *Proceedings of the 19th ITS World Congress*. 2012. Oct 22-26. URL: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174621/local_174621.pdf (дата обращения: 06.10.2025).

REFERENCES

1. Granich V.Yu., Dutov A.V., Miroshkin V.L., Sypalo K.I. On the levels of technology readiness and the use of the UGT Calculator for their assessment. *Economics of science*. 2020. Vol. 6, No. 1-2. pp. 6-10. DOI: 10.22394/2410-132X-2020-6-1-2-6-10. EDN IDJEKP.
2. Mityagina M.N., Nazarevich S.A. Application of the a priori ranking method in assessing the level of technology availability in a complex technical system. *System analysis and logistics*. 2023. № 2(36). Pp. 45-53. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-2-45-53. EDN TQBPNX.
3. Kucharavy D., De Guio R. Application of S-shaped curves. *Procedia Engineering*. 2011. No 9. Pp. 559–572.
4. Schilling M.A., Esmundo M., Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government. *Energy Policy*. 2009, doi:10.1016/j.enpol.2009.01.004.
5. Charuyskaya M.A. Research of technology life cycle models. *Economic sciences*. 2024. No. 230. pp. 38-45. DOI: 10.14451/1.230.38. EDN PWRELB.
6. Fleury S., Richir, S. Some Creative Problem-Solving Methods: TRIZ, C-K, CPS, Design Sprint. In *Immersive Technologies to Accelerate Innovation* (eds S. Fleury and S. Richir). 2021. DOI: 10.1002/9781119887294.ch5
7. Abdul Rahim Z., Iqbal M.S. Innovation Process of Hydrogen Fuel Cell Storage Technology Using the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ). *Chem. Eng. Technol.*, 2023. 46: 2635-2643. DOI: 10.1002/ceat.202300310
8. Da Silva RH, Kaminski PC, Armellini F. Improving new product development innovation effectiveness by using problem solving tools during the conceptual development phase: Integrating Design Thinking and TRIZ. *Creat Innov Manag*. 2020;29:685–700. DOI: 10.1111/caim.12399
9. Yu Sen-lin, Cheng Miao, Tian Qian. Community Micro-Ambulance Design Based on QFD and TRIZ Theories, *Mathematical Problems in Engineering*, 2023, 6698270, 25 pages, 2023. DOI: 10.1155/2023/6698270
10. H. Xu, L. Zhang, L. Wang, Y. Lu, H. Feng, A Robust Superhydrophobic/Conductive Composite Coating with Excellent Anticorrosive Performance. *Chemistry Select*. 2021, 6, 10412. DOI: 10.1002/slct.202101043
11. Lapidus B.M. On the creation of an Intelligent multimodal transport system in Russia and the Intelligent Container Conveyor project. *Bulletin of VNIIZHT*. 2020. Vol. 79. No. 5. pp. 276-281. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-5-276-281
12. Freimann R., Maier S., Sannia A. Self-Propelled Trailers – An Approach to Type Approval. In: Bargende, M., Reuss, HC., Wagner, A. (eds) 21. Internationales Stuttgarter Symposium. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-33466-6_2
13. Seungjin Sh., Hong-Seung R., Sung-Ho H. Technical Trends Related to Intermodal Automated Freight Transport Systems (AFTS). *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Vol. 34, Is. 2, 2018, Pages 161-169, DOI: 10.1016/j.ajsl.2018.06.013
14. Eremin N.A., Stolyarov V.E., Halvorsen A.L., Basnieva I.K. Underwater shuttle tankers for transportation of hydrocarbons. *Neftegaz.RU*. 2023. No. 11. pp. 42-51. EDN: ABXFIB
15. Chen Shaohan, Kamarudin Khairul Manami, Yan Shihua, Analyzing the Synergy between HCI and TRIZ in Product Innovation through a Systematic Review of the Literature, *Advances in Human-Computer Interaction*, 2021, 6616962, 19 pages, 2021. DOI: 10.1155/2021/6616962
16. Lu Shizhu, Guo Yuqing, Huang, Wei, Shen, Min, Product Form Evolutionary Design Integrated with TRIZ Contradiction Matrix. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 3844324, 12 pages, DOI: 10.1155/2022/3844324
17. Zeng Y., Wang M., Rajan, R. T. Decentralized coordination for truck platooning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37, 1997–2015. DOI: 10.1111/mice.12899
18. Pourmohammad-Zia N., Negenborn R.R., Schulte F. Collaborative platooning and routing for mixed fleets of electric automated vehicles and conventional trucks. *Intl. Trans. in Op. Res.*. 2025. DOI: 10.1111/itor.70073
19. Azemsha S.A. Dynamic capacity road passenger transport: the history of its appearance and development prospects. *Technical and technological problems of service*. 2024. № 3(69). Pp. 28-50. EDN LYGXBC.
20. Bergenheim C., Shladover S., Coelingh E. Overview of platooning systems. Proceedings of the 19th ITS World Congress. 2012. Oct 22-26. URL: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174621/local_174621.pdf (дата обращения: 06.10.2025).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Анохов И.В. Вклад в общую работу заключается в формулировании идеи статьи, подбора литературы, написании текста, создании изображений.

Торопов Н.Ю. Вклад в общую работу заключается в изучении публикаций по теме статьи, корректировке гипотез; критический анализ статьи, модификация текста и изображений.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Anokhov I.V. Concept development, literature review, text writing, creating the illustration materials.

Toropov N.Yu. Literature review, checking and correction of the hypotheses, critical analysis of the article, text and illustration editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анохов Игорь Васильевич – канд. экон. наук, доц. Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (129626, ул. 3-я Мытищинская, д. 10).

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-5983-2982>,

SPIN-код: 1444-3259,

Author ID: 260787,

e-mail: I.V.Anokhov@yandex.ru

Торопов Николай Юрьевич – зам. директора Департамента цифровой трансформации, ФАУ «РОСДОРНИИ» (125493, ул. Смольная, д. 2).

SPIN-код: 1065-7137,

Author ID: 1234059,

e-mail: toropov@rosdornii.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anokhov Igor V. – Cand. of Sci. (Economics), Associate Professor, Railway Research Institute (10, the Third Mytischinskaya Street, Moscow, 129626).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5983-2982>,

SPIN-code: 1444-3259,

Author ID: 260787,

e-mail: I.V.Anokhov@yandex.ru

Toropov Nikolay Yu. – Deputy Director, Digital Transformation Department, Federal Autonomous Institution “Russian Road Research Institute “ (2, Smolnaya Street., Moscow, 125493).

SPIN-code: 1065-7137,

Author ID: 1234059,

e-mail: toropov@rosdornii.ru

Научная статья
УДК 629-039-58
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-294-305>
EDN: OTICHR



РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ АВАРИЙНОСТИ ОБЪЕКТОВ НА ГОРОДСКОЙ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

А.А. Юнг¹ ✉, А.Г. Шевцова¹, Д.А. Полещенко², Ю.А. Цыганков²

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

²Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета «МИСИС»,
г. Старый Оскол, Россия
✉ ответственный автор
yungnastena33@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день на улично-дорожной сети (УДС) крупных городов и административных центров появился новый быстроразвивающийся вид транспорта, а именно средства индивидуальной мобильности (СИМ). Существует большое количество положительных факторов использования данных средств, таких как экологичность, маневренность, экономичность, социальная дистанцированность, гибкость маршрута и т.д. Однако из-за отсутствия адаптированной инфраструктуры для их передвижения можно наблюдать стремительный рост дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с их участием. Для снижения количества ДТП в рамках исследования предлагается разработать математическую модель для оценки вероятности наступления аварийного события на каждом из выделенных типов объектов.

Материалы и методы. В данной статье представлены результаты математического моделирования, основанного на анализе аварийности объектов на городской улично-дорожной сети. Для достижения результатов были применены эмпирический анализ официальной статистики количества дорожно-транспортных происшествий с участием СИМ, классификационный подход, вероятностное моделирование и регрессионный прогноз. В исследовании в качестве материалов выступали данные по числу ДТП с участием СИМ на отдельных объектах улично-дорожной сети. Основной акцент сделан на количественном описании и предсказании аварийности с участием СИМ в смешанной городской среде, особенно в зонах, не предназначенных изначально для транспортных средств.

Результаты. Получена математическая модель оценки аварийности объектов городской УДС с учетом нового вида транспорта – средства индивидуальной мобильности. Адекватность и предсказательная надёжность построенных моделей подтверждаются значениями коэффициента детерминации, находящимися в пределах от 0,64 до 0,92.

Обсуждение и заключение. Использование данной модели позволяет не только оценить текущий уровень аварийности на объектах УДС, но и выявить тенденции её изменения во времени. Благодаря высокой достоверности аппроксимации, модель обеспечивает надёжный прогноз количества числа ДТП с участием СИМ на различных объектах УДС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка, объект, модель, прогноз, уравнение, тенденция, мобильность, дорожное движение, средства индивидуальной мобильности

Статья поступила в редакцию 25.01.2026; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Юнг А.А., Шевцова А.Г., Полещенко Д.А., Цыганков Ю.А. Разработка математической модели оценки аварийности объектов на городской улично-дорожной сети // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 294-305. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-294-305>

© Юнг А.А., Шевцова А.Г., Полещенко Д.А., Цыганков Ю.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-294-305>
EDN: OTICHR

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING TRAFFIC ACCIDENT RISK ON URBAN ROAD NETWORKS

Anastasia A. Jung¹ ✉, Anastasia G. Shevtsova¹, Dmitry A. Poleshchenko², Yury A. Tsygankov²

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

²Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (Branch)
of the National University of Science and Technology «MISiS»,
Stary Oskol, Russia

✉ corresponding author
yungnastena33@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Nowadays, personal mobility devices (PMDs), a new and rapidly developing mode of transport, are increasingly integrated into the urban road network (URN) of large cities and administrative centers. Numerous advantages are associated with this practice, including environmental friendliness, maneuverability, cost-effectiveness, social distancing, route flexibility, etc. However, due to the lack of infrastructure adapted for PMD movement, a sharp increase in road traffic accidents (RTAs) involving PMDs has been observed. To mitigate this negative effect, a mathematical model for assessing the probability of accident occurrence at each identified type of road network objects has been proposed in this research.

Materials and Methods. This article presents the results of mathematical modeling based on the analysis of accident rates at various objects within an urban road network. To achieve these results, the following approaches were employed: empirical analysis of official statistics on RTAs involving PMDs, a classification approach, probabilistic modeling, and regression forecasting. The primary data used in the study included the number of RTAs involving PMDs and recorded at selected URN objects. Particular emphasis was placed on quantitative description and prediction of PMD-related accident rates in mixed urban environments, especially in areas originally not designed for vehicular traffic.

Results. A mathematical model for evaluating accident risk at urban URN objects, accounting for the new transport mode – personal mobility devices – has been developed. The adequacy and predictive reliability of the constructed models are confirmed by coefficients of determination (R^2) ranging from 0.64 to 0.92.

Discussion and Conclusion. The proposed model enables not only assessments of the current accident risk at URN objects but also the identification of temporal trends in its evolution. Thanks to the high accuracy of approximation, the model provides a reliable forecast for the expected number of PMD-involved RTAs at different types of URN objects.

KEYWORDS: assessment, road network element, model, forecasting, mobility, equation, trend, personal mobility devices, road traffic, urban transportation

The article was submitted: January 25, 2026; approved after reviewing: March 16, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Jung A.A., Shevtsova A.G., Poleshchenko D.A., Tsygankov Yu.A. Development of a mathematical model for assessing traffic accident risk on urban road networks. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 294-305. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-294-305>

© Jung Anastasia A., Shevtsova Anastasia G., Poleshchenko Dmitry A., Tsygankov Yury A., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на предпринимаемые в последние годы активные меры, существенной проблемой остается безопасность населения на транспорте, которая является системной комплексной задачей на сегодняшний день [1].

С 2017 г. СИМ начали активно внедряться в транспортные процессы городской среды. В крупнейших мегаполисах России, таких как Москва, Санкт-Петербург, доля пользователей СИМ ежегодно увеличивается с нарастающей скоростью. Аналогичная тенденция наблюдается и в региональных административных центрах: местные жители всё чаще выбирают СИМ в качестве основного или вспомогательного способа передвижения, привлечённые их многочисленными преимуществами – экономией времени и финансовых ресурсов, возможностью избежать избыточных социальных контактов, а также из-за гибкости маршрута [2].

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» особое внимание уделяется таким приоритетам, как устойчивое демографическое развитие и формирование комфортной, безопасной городской среды. В контексте дорожной безопасности эти задачи реализуются в рамках национального проекта «Инфраструктура для жизни», а именно через федеральный проект «Безопасность дорожного движения». Одним из ключевых направлений данного проекта выступает модернизация улично-дорожной сети за счёт внедрения современных цифровых решений, направленных на снижение аварийности и повышение уровня защищённости всех участников дорожного движения как водителей, так и пешеходов [3].

Обеспечение безопасного дорожного движения (БДД) в городах невозможно без комплексного подхода, предполагающего реализацию совокупности архитектурно-планировочных и организационных мер. Важнейшим из них является формирование благоприятной инфраструктурной среды, специально адаптированной под особенности передвижения пользователей средств индивидуальной мобильности. Это предполагает не только выделение отдельных зон или полос для их движения, но обустройство дорожной разметки и знаков, регулирующих порядок использования городского пространства СИМ, а также

обеспечение достаточной ширины тротуаров и пешеходных дорожек, позволяющей избежать конфликтов между пешеходами и пользователями микромобильности. В перспективе эффективным инструментом может стать интеграция интеллектуальных транспортных систем, обеспечивающих мониторинг потоков и оперативное управление дорожной обстановкой [4].

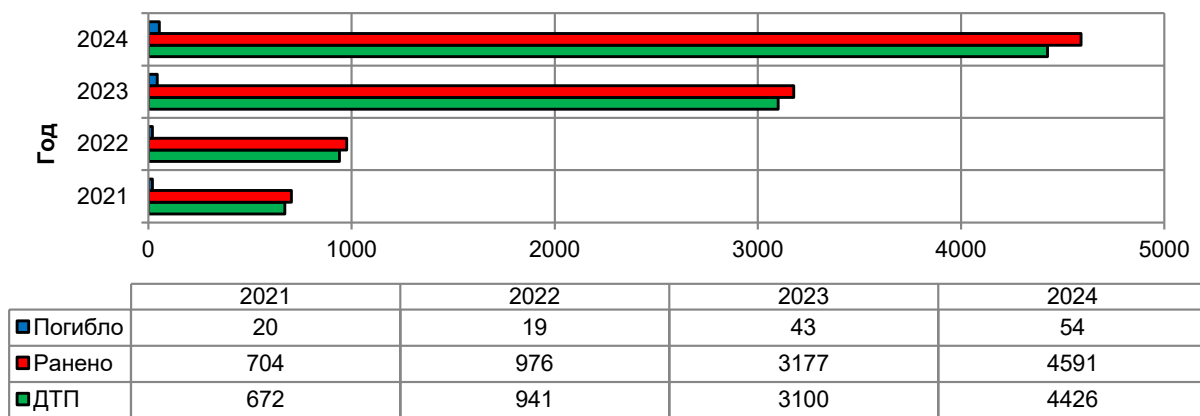
Рост числа ДТП обусловлен усилением конфликтов в городской транспортной среде, в первую очередь между пешеходами и пользователями СИМ, а также между транспортными средствами и СИМ. Такие конфликты возникают вследствие отсутствия чёткого разграничения пространства для различных участников движения, несовершенства нормативно-правового регулирования использования СИМ, а также недостаточной адаптации существующей инфраструктуры под новые формы мобильности [5].

Согласно данным официальных источников (Научный центр БДД МВД России) в 2024 г. зарегистрировано 4426 (+42,8%) ДТП с участием СИМ, в результате которых погибли 54 (+25,6%) человека, в том числе 6 детей. Ранение получили 4591 (+44,5%) человек, в числе которых 1165 детей (рисунок 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе исследования в качестве первичной информации были задействованы данные из открытых источников, включая официальную статистику Госавтоинспекции МВД России, региональные отчёты по аварийности, а также аналитические материалы Научного центра БДД МВД России за период 2021–2024 гг. [6]. Указанные источники содержат сведения о количестве ДТП с участием СИМ, в том числе с географической привязкой к конкретным элементам УДС.

После проведения предварительной обработки и структурирования массива данных удалось идентифицировать типовые участки УДС, характеризующиеся наибольшей концентрацией ДТП с участием СИМ. Анализ показал, что такие зоны объединяет ряд общих особенностей: высокая плотность точек взаимодействия между различными участниками движения, совместное использование пространства пешеходами, традиционными транспортными средствами и пользователями СИМ, а также отсутствие инфраструктурных решений, адаптированных под специфику эксплуатации малогабаритных электрических транспортных средств [7].



Количество дорожно-транспортных происшествий, ед.
Количество раненых и погибших, чел.

■ Погибло ■ Ранено ■ ДТП

Рисунок 1 – Показатели аварийности ДТП с участием СИМ за 2021–2024 гг.
Источник: информационный аналитический обзор НЦ БДД.

Figure 1 – Road accidents involving SIM, 2021–2024 period.
Source: informational analytical review of SIC BDD.

К числу наиболее аварийно-опасных объектов УДС были отнесены: тротуары, пешеходные дорожки и зоны; межперекрестковые участки (перегоны); выезды с прилегающих территорий; регулируемые и нерегулируемые пешеходные переходы; внутриворотовые проезды; перекрестки как регулируемые, так и нерегулируемые, включая пересечения равнозначных и неравнозначных дорог; автостоянки, а также прочие элементы городской среды, не входящие в основную транспортную сеть [8].

Для построения математической модели аварийности выделены наиболее аварийные объекты УДС и их типы, каждому из которых присвоено математическое обозначение:

H_1 – доля ДТП на тротуаре, пешеходной дорожке и в пешеходной зоне;

H_2 – доля ДТП на выездах с прилегающей территории;

H_3 – доля ДТП на пешеходных переходах;

H_4 – доля ДТП на перекрестках;

H_5 – доля ДТП на иных объектах УДС.

Следует отметить, что происшествия на

пешеходных переходах и перекрестках имеют определенные разновидности, так доля ДТП на пешеходных переходах имеет следующий составной вид:

3.1 H_{31} – доля ДТП на регулируемых пешеходных переходах;

3.2 H_{32} – доля ДТП на нерегулируемых пешеходных переходах.

Аналогичным образом подразделяются ДТП на перекрестках:

4.1 H_{41} – доля ДТП на регулируемых перекрестках;

4.2 H_{42} – доля ДТП на нерегулируемых перекрестках.

Помимо этого, сложную структуру также имеют ДТП на нерегулируемых перекрестках:

4.2.1 H_{421} – доля ДТП на нерегулируемых перекрестках неравнозначных улиц (дорог);

4.2.2 H_{422} – доля ДТП на нерегулируемых перекрестках равнозначных улиц (дорог).

Схематично сложная структура исследуемых объектов УДС городской транспортной системы в системе долей имеет следующий вид (рисунок 2).

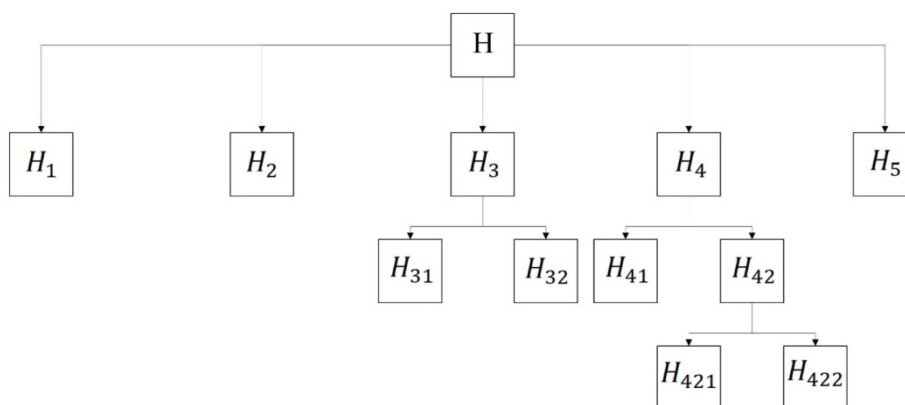


Рисунок 2 –Схема и обозначение исследуемых объектов УДС
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagram and notation of road network elements under study
 Source: compiled by the authors.

H_1 – доля ДТП на тротуаре, пешеходной дорожке и в пешеходной зоне; H_2 – доля ДТП на выездах с прилегающей территории; H_3 – доля ДТП на пешеходных переходах: H_{31} – доля ДТП на регулируемых пешеходных переходах и H_{32} – доля ДТП на нерегулируемых пешеходных переходах; H_4 – доля ДТП на перекрестках: H_{41} – доля ДТП на регулируемых перекрестках; H_{42} – доля ДТП на нерегулируемых перекрестках; H_{421} – доля ДТП на нерегулируемых перекрестках неравнозначных улиц (дорог) и H_{422} – доля ДТП на нерегулируемых перекрестках равнозначных улиц (дорог); H_5 – доля ДТП на иных объектах УДС.

Данные, имеющиеся в официальных источниках, представлены в виде процентного распределения, что позволяет перейти к показателям статистической вероятности возникновения ДТП на определенных (принятых в работу) объектах УДС. Имеющиеся данные представлены за последние четыре года – 2021, 2022, 2023, 2024, в общем виде полная статистическая вероятность будет иметь вид:

$$P(N) = P(H_1) + P(H_2) + P(H_3) + P(H_4) + P(H_5), \quad (1)$$

где

$$P(H_3) = P(H_{31}) + P(H_{32}), \quad (2)$$

$$P(H_4) = P(H_{41}) + P(H_{42}), \quad (3)$$

$$P(H_{42}) = P(H_{421}) + P(H_{422}), \quad (4)$$

где $P(N)$ – полная статистическая вероятность; $P(H_1)$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на тротуаре, пешеходной дорожке и в пешеходной зоне; $P(H_2)$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на выездах с прилегающей территории; $P(H_3)$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на пешеходных переходах; $P(H_{31})$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на регулируемых пешеходных переходах; $P(H_{32})$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на нерегулируемых пешеходных переходах; $P(H_4)$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на перекрестках; $P(H_{41})$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на регулируемых перекрестках; $P(H_{42})$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на нерегулируемых перекрестках; $P(H_{421})$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на нерегулируемых перекрестках неравнозначных улиц (дорог); $P(H_{422})$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на нерегулируемых перекрестках равнозначных улиц (дорог); $P(H_5)$ – статистическая вероятность возникновения ДТП на иных объектах УДС городской транспортной системы [9].

Методологическую основу исследования составили эмпирический анализ официальной статистики ДТП с участием СИМ, классификационный подход для выделения и типологизации аварийно-опасных объектов УДС, вероятностное моделирование для формализации рисков ДТП в виде статистических вероятностей, а также иерархическое декомпозиционное моделирование для учёта сложной структуры взаимосвязанных элементов

УДС. Полученная модель позволяет оценить полную вероятность ДТП с участием СИМ как сумму вероятностей по всем выделенным категориям объектов, что обеспечивает как обобщающую, так и детализированную оценку аварийности в условиях смешанного городского движения [10].

МЕТОДОЛОГИЯ

Согласно официальным статистическим данным, представленным в виде процентного распределения ДТП по типам объектов УДС, возможно определить соответствующие значения статистической вероятности наступления аварийных событий [11]. Для демонстрации методики оценки была выбрана категория «тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона» – один из наиболее характерных элементов городской инфраструктуры, активно используемых пользователями СИМ.

Анализ динамики статистической вероятности данного события за четырёхлетний период (2021–2024 гг.) выявил значительные изменения (таблица 1). В первые два года наблюдений (2021–2022 гг.) вероятность не превышала 0,05, однако в последующие периоды (2023–2024 гг.) зафиксирован резкий рост показателя. Такая тенденция свидетельствует о заметном увеличении числа ДТП с участием СИМ именно в пешеходной зоне, что, в свою очередь, подчеркивает необходимость адаптации инфраструктуры и усиления мер по обеспечению безопасности смешанного движения [12].

Регрессионный анализ статистической вероятности позволил установить наиболее точный вид функции, описывающий распределение исследуемых значений (рисунок 3, таблица 2).

Таблица 1
Изменение статистической вероятности объекта УДС в городской транспортной системе «тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона» – $P(H_1)$
Источник: составлено авторами.

Table 1
Changes in the statistical probability of the urban road network element Sidewalk, Pedestrian Path, Pedestrian Zone» – $P(H_1)$
Source: compiled by the authors.

Номер периода	1	2	3	4
Значение	0,05	0,04	0,26	0,38

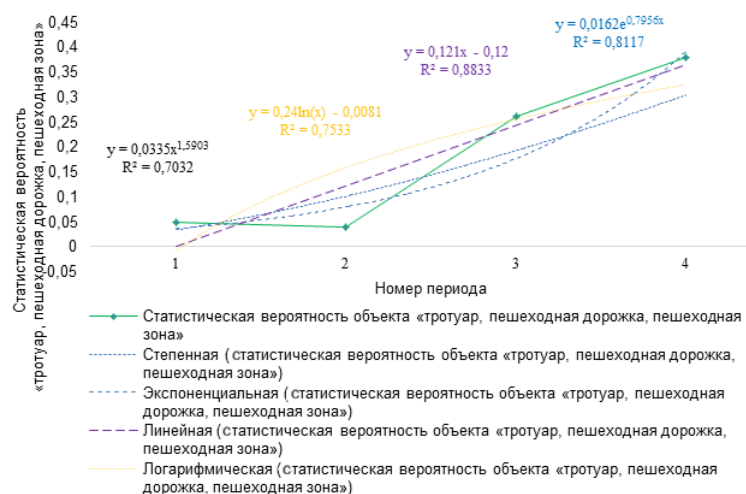


Рисунок 3 – Графический регрессионный анализ объекта УДС транспортной системы города «тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона» – $P(H_1)$
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Graphical regression analysis of the urban road network element Sidewalk, Pedestrian Path, Pedestrian Zone – $P(H_1)$
Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Уравнения регрессии и значение величины достоверности в результате анализа объекта УДС транспортной системы города «тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона» – $P(H_1)$
 Источник: составлено авторами.

Table 2

Regression equations and coefficient of determination (R^2) resulting from the analysis of the urban road network element Sidewalk, Pedestrian Path, Pedestrian Zone» – $P(H_1)$
 Source: compiled by the authors.

Наименование функции	Вид функциональной зависимости	Величина достоверности, R^2
Степенная	$y=0,0335 \cdot x^{1,5903}$	0,92
Экспоненциальная	$y=0,0162 \cdot e^{0,7956 \cdot x}$	0,9
Линейная	$y=0,121 \cdot x - 0,12$	0,88
Логарифмическая	$y=0,24 \ln(x) - 0,0081$	0,75

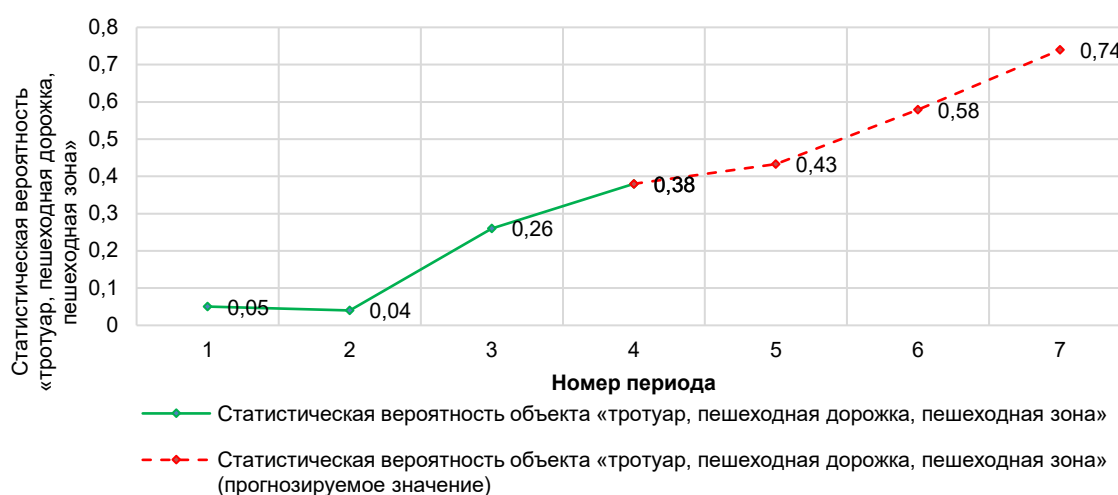


Рисунок 4 – Прогнозируемые значения изменения статистической вероятности $P(H_1)$ на объекте УДС транспортной системы города «тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона»
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Forecasted values of changes in statistical probability $P(H_1)$ for the urban road network element Sidewalk, Pedestrian Path, Pedestrian Zone – $P(H_1)$
 Source: compiled by the authors.

Наиболее точно рассматриваемые данные описываются степенной функцией вида:

$$y = 0,0335 \cdot x^{1,5903}, \quad (5)$$

где y – доля ДТП на объекте «тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона»; x – номер периода, соответствующий рассматриваемому году.

Полученное уравнение позволяет осуществить прогнозирование изменения доли ДТП для 5, 6 и 7-го периодов, соответствующих значениям 2025, 2026 и 2027 гг. (рисунок 4).

На основе проведённого регрессионного анализа было получено уравнение, описывающее динамику статистической вероятности в виде степенной функции. С его помощью выполнен прогноз изменения исследуемо-

го показателя на ближайшие три временных периода 2025–2027 гг. Результаты моделирования свидетельствуют о продолжающемся росте вероятности наступления ДТП на объектах типа «тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона», что указывает на устойчивую тенденцию к увеличению аварийности в этих зонах [13].

Аналогичный статистический анализ был последовательно применён ко всем выделенным типам объектов улично-дорожной сети. Это позволило не только количественно оценить текущий уровень риска, но и сформировать прогнозные значения вероятностей возникновения ДТП с участием средств индивидуальной мобильности по каждому из рассматриваемых элементов инфраструктуры [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В общем виде математическая модель оценки аварийности объектов городской УДС с учетом нового вида транспорта – СИМ, будет иметь вид

$$P(H) = \begin{cases} P(H_1) \\ P(H_2) \\ P(H_3) \\ P(H_4) \\ P(H_5) \end{cases} = \begin{cases} y = 0,0335 \cdot x^{1,5903} \\ y = -0,02 \cdot x + 0,195 \\ y = -0,0425 \cdot x^2 + 0,1975 \cdot x + 0,0825. \\ y = -0,039 \cdot x + 0,33 \\ y = 0,2691 \cdot x^{-0,608} \end{cases} \quad (6)$$

Полученные уравнения функций позволяют оценить аварийность рассматриваемых объектов на городской УДС, что позволяет спрогнозировать вероятность наступления ДТП (таблица 3).

Наиболее высокий уровень аварийности в прогнозируемом периоде (2025–2027 гг.) жи-

дается на тротуарах, пешеходных дорожках и в пешеходных зонах: вероятность возникновения ДТП с участием СИМ варьируется от 0,43 до 0,74 при устойчивой тенденции к росту. Такая динамика может быть обусловлена ростом пешеходного трафика, физическим износом инфраструктуры или недостаточной адаптацией городской среды под новые формы мобильности, включая отсутствие специализированных элементов безопасности [14, 15].

В то же время наблюдается снижение аварийности на выездах с прилегающих территорий – с 0,095 до 0,055. Вероятно, это связано с улучшением организации движения в этих зонах, установкой дополнительных знаков, ограничений скорости или активным контролем со стороны надзорных органов.

Аналогичная положительная динамика отмечена на нерегулируемых пешеходных переходах: вероятность ДТП снижается с 0,095 до 0,071. Несмотря на улучшение, данный показатель остаётся относительно высоким, что указывает на необходимость дальнейших мер по повышению их безопасности [16].

Таблица 3
Результаты математического расчета
Источник: составлено авторами.

Table 3
Results of mathematical calculation
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Наименование объекта УДС	Полученное уравнение функции	Величина достоверности,
1	Тротуар, пешеходная дорожка, пешеходная зона	$y=0,0335 \cdot x^{1,5903}$	0,92
2	Выезд с прилегающей территории	$y=-0,02 \cdot x+0,195$	0,69
3	Пешеходный переход	$y=-0,0425 \cdot x^2+0,1975 \cdot x+0,0825$	0,73
3.1	Регулируемый пешеходный переход	$y=-0,0325 \cdot x^2+0,1595 \cdot x-0,0225$	0,47
3.2	Нерегулируемый пешеходный переход	$y=-0,012 \cdot x+0,155$	0,55
4	Перекресток	$y=-0,039 \cdot x+0,33$	0,79
4.1	Регулируемый перекресток	$y=-0,017 \cdot x+0,145$	0,86
4.2	Нерегулируемый перекресток	$y=-0,022 \cdot x+0,185$	0,64
4.2.1	Нерегулируемый перекресток неравнозначных улиц (дорог)	$y=-0,018 \cdot x+0,16$	0,6
4.2.2	Нерегулируемый перекресток равнозначных улиц (дорог)	$y=0,0283 \cdot e^{-0,277 \cdot x}$	0,78
5	Иные	$y=0,2691 \cdot x^{-0,608}$	0,65

Общая аварийность на перекрёстках демонстрирует чёткую тенденцию к снижению – с 0,135 до 0,057. Наиболее выраженный эффект зафиксирован как на регулируемых перекрёстках (снижение с 0,060 до 0,026), так и на нерегулируемых (с 0,075 до 0,031). Это может свидетельствовать об эффективности комплексных мер: применения светофорного регулирования, установки дорожных знаков, разметки, а также усиления контроля за соблюдением ПДД [17].

Особо низкие значения прогнозируются для нерегулируемых перекрёстков равнозначных улиц – от 0,005 до 0,001. Столь малая вероятность ДТП может объясняться как низкой интенсивностью движения в этих зонах, так и хорошей обзорностью, способствующей своевременному реагированию участников движения [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе оценки аварийности на объектах УДС с учётом участия СИМ была разработана иерархическая (древовидная) структура, отражающая вероятностное распределение дорожно-транспортных происшествий по типам транспортной инфраструктуры. В качестве наиболее уязвимых зон были выделены: тротуары, пешеходные дорожки и пешеходные зоны; регулируемые и нерегулируемые пешеходные переходы; выезды с прилегающих территорий; перекрёстки различных категорий, включая регулируемые, нерегулируемые неравнозначные и нерегулируемые равнозначные дороги, а также прочие элементы УДС, характеризующиеся интенсивным смешанным движением [19].

На основе анализа официальной статистики и пространственной локализации ДТП были выполнены математические расчёты, позволившие сформировать регрессионные уравнения для оценки вероятности аварийного события на каждом из выделенных типов объектов. Адекватность и прогностическая надёжность полученных моделей подтверждены значениями коэффициента детерминации, находящимися в диапазоне от 0,64 до 0,92. Такой уровень соответствия эмпирических данных теоретическим оценкам свидетельствует о высокой точности и практической применимости разработанных моделей [20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шевцова А.Г. Динамика реализации программы VISION ZERO в мировых странах // Мир транспорта и технологических машин. 2021. № 3 (74). С. 35–42. DOI: 10.33979/2073-7432-2021-74-3-35-42
2. Семикопенко Ю.В., Шевцова А.Г., Дмитриев Д.В., Бахарев Г.А. Основные виды дорожно-транспортных происшествий в Российской Федерации // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 5, № 7. С. 76–79.
3. Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г. Пути повышения безопасности функционирования общественного транспорта в условиях перспективного развития города // Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. 239 с. ISBN 978-5-361-01180-3.
4. Купавцев В.А., Донченко В.В. Разработка модели оценки риска наезда средства индивидуальной мобильности на пешехода // Вестник МГУ. Серия 6: Экономика. 2025. № 3. С. 45–58.
5. Юнг А.А., Шевцова А.Г., Васильева В.В., Долиненко А.А. Разработка математической модели прогнозирования аварийности с участием средств индивидуальной мобильности // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 1–3 (88). С. 90–96.
6. Докукин В.М., Цыганков Ю.А. Сравнительный анализ эффективности методов линейной регрессии для решения задачи прогнозирования значений временного ряда // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство : материалы XX Всерос. науч.-практ. конф. 2024. С. 396–401.
7. OECD/ITF. Micromobility Safety: Managing the Integration of E-Scooters and Other Devices into Urban Transport Systems. Paris : International Transport Forum, . 2024. № 1–5 (54). С. 81–85.
8. Купавцев В.А., Донченко В.В. Определение основных препятствий городских дорог и городских улиц при движении средств индивидуальной мобильности // Транспорт и логистика: Развитие в условиях глобальных изменений потоков : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2023. С. 184–187.
9. Zhang Y., Wang J, Chen X. Crash risk analysis of e-scooter riders in urban environments using mixed logit models // Accident Analysis & Prevention. 2021. Vol. 159. P. 106253. DOI: 10.1016/j.aap.2021.106253
10. Юнг А.А. Разработка математической модели прогнозирования количества дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1 (101). С. 112–122.
11. Юнг А.А., Трошин А.С., Ван Я., Романенко А.О. Оценка скоростных особенностей движения средств индивидуальной мобильности при интеллектуализации городских транспортных систем // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 4-2 (87). С. 135–140.
12. Козлов В.И. Применение регрессионных моделей для прогнозирования ДТП с участием СИМ // Информационные технологии в транспортной системе. 2023. № 3. С. 62–70.
13. Litman T. Evaluating Micromobility Impacts and Best Practices // Transport Policy Institute. 2023. № 1–6 (14). С. 79–85.

14. Смирнов Н.Н., Петров И.О. Безопасность смешанного движения в условиях роста популярности СИМ // *Городские технологии*. 2024. № 1. С. 22–30.

15. Шелмаков П.С., Шелмаков С.В. Развитие велосипедного движения в Российской Федерации // *Успехи современного естествознания*. 2012. № 6. С. 183–184.

16. Соиников С.А. Особенности определения административно-правового статуса участников дорожного движения, использующих современные технические средства передвижения (средства индивидуальной мобильности) // *Вестник экономической безопасности*. 2020. № 1. С. 216–219.

17. Волков П.А., Кемьяш Ю.В. Средства индивидуальной мобильности: вопросы теории и практики использования // *Вестник Белгородского юридического института МВД России им. И. Д. Путилина*. 2021. № 1. С. 51–55.

18. Мишина Ю.В. Проблемы определения административно-правового статуса лиц, использующих для передвижения электросамокаты, сегвеи и иные современные технические средства // *Проблемы экономики и юридической практики*. 2020. № 4. С. 321–325.

19. Smith J.A., Patel R.K, Chen L.M. A machine learning approach to urban traffic congestion prediction // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Vol. 124. P. 102987. DOI: 10.1016/j.trc.2021.102987

20. Trofimenko Y.V., Komkov V.I., Potapchenko T.D, Donchenko V.V. Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. Vol. 7, No 1. P. 465–473.

REFERENCES

1. Shevtsova A.G. Dynamics of VISION ZERO Programme Implementation in Countries Worldwide // *World of Transport and Technological Machines*. 2021. No. 3 (74). P. 35–42. (In Russ.) DOI: 10.33979/2073-7432-2021-74-3-35-42.

2. Semikopenko Yu.V., Shevtsova A.G., Dmitriev D.V., Bakharov G.A. Main Types of Road Traffic Accidents in the Russian Federation. *Advances in Modern Science and Education*. 2016. Vol. 5, No. 7. P. 76–79. (In Russ.)

3. Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G. Approaches to Enhancing Public Transport Safety under Prospective Urban Development. *Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2023. 239 p. . ISBN 978-5-361-01180-3. (In Russ.)

4. Kupavtsev V.A., Donchenko V.V. Development of a Model for Assessing the Risk of Collisions between Micromobility Devices and Pedestrians. *Moscow University Bulletin. Series 6: Economics*. 2025. No. 3. P. 45–58. (In Russ.)

5. Yung A.A., Shevtsova A.G., Vasilieva V.V., Dolinenko A.A. Development of a Mathematical Model for Predicting Accidents Involving Micromobility Devices. *World of Transport and Technological Machines*. 2025. No. 1–3 (88). P. 90–96. (In Russ.)

6. Dokukin V.M., Tsygankov Yu.A. Comparative Analysis of Linear Regression Methods for Time Series Forecasting. *Modern Problems of the Mining and Metallurgical Complex. Science and Production: Proceedings of the XX All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2024. P. 396–401. (In Russ.)

7. OECD/ITF. *Micromobility Safety: Managing the Integration of E-Scooters and Other Devices into Urban Transport Systems*. Paris: International Transport Forum, 2024. P. 81–85.

8. Kupavtsev V.A., Donchenko V.V. Identification of Key Obstacles on Urban Roads and Streets for Micromobility Device Users // *Transport and Logistics: Development under Global Changes in Flows: Collection of Scientific Papers of the VII International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don, 2023. P. 184–187. (In Russ.)

9. Zhang Y., Wang J., Chen X. Crash Risk Analysis of E-Scooter Riders in Urban Environments Using Mixed Logit Models. *Accident Analysis & Prevention*. 2021. Vol. 159. P. 106253. DOI: 10.1016/j.aap.2021.106253

10. Yung A.A. Development of a Mathematical Model for Forecasting the Number of Road Traffic Accidents Involving Micromobility Devices. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*. 2025. Vol. 22, No. 1 (101). P. 112–122. (In Russ.)

11. Yung A.A., Troshin A.S., Van Ya., Romanenko A.O. Assessment of Speed Characteristics of Micromobility Devices in Intelligent Urban Transport Systems. *World of Transport and Technological Machines*. 2024. No. 4-2 (87). P. 135–140. (In Russ.)

12. Kozlov V.I. Application of Regression Models for Forecasting Road Accidents Involving Micromobility Devices. *Information Technologies in Transport Systems*. 2023. No. 3. P. 62–70. (In Russ.)

13. Litman T. Evaluating Micromobility Impacts and Best Practices. *Transport Policy Institute*. 2023. P. 79–85.

14. Смирнов Н.Н., Петров И.О. Safety of Mixed Traffic under Growing Popularity of Micromobility Devices. *Urban Technologies*. 2024. No. 1. P. 22–30. (In Russ.)

15. Shelmakov P.S., Shelmakov S.V. Development of Cycling in the Russian Federation. *Advances in Modern Natural Science*. 2012. No. 6. P. 183–184. (In Russ.)

16. Соиников С.А. Peculiarities of Determining the Administrative and Legal Status of Road Users Employing Modern Personal Mobility Devices (Micromobility). *Bulletin of Economic Security*. 2020. No. 1. P. 216–219. (In Russ.)

17. Volkov P.A., Kemyash Yu.V. Micromobility Devices: Theoretical and Practical Aspects of Use. *Bulletin of the Belgorod Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I. D. Putilin*. 2021. No. 1. P. 51–55. (In Russ.)

18. Mishina Yu.V. Issues Concerning the Administrative and Legal Status of Individuals Using Electric Scooters, Segways, and Other Modern Personal Mobility Devices. *Problems of Economics and Legal Practice*. 2020. No. 4. P. 321–325. (In Russ.)

19. Smith J.A., Patel R.K., Chen L.M. A Machine Learning Approach to Urban Traffic Congestion Prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Vol. 124. P. 102987. DOI: 10.1016/j.trc.2021.102987

20. Trofimenko Y.V., Komkov V.I., Potapchenko T.D., Donchenko V.V. Model for the Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Road Transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. Vol. 7, No. 1. P. 465–473.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Юнг А.А. Постановка задачи исследования, разработка концепции математической модели, сбор и предварительная обработка данных об аварийности на улично-дорожной сети, выполнение вычислительных экспериментов, оформление основного текста статьи.

Шевцова А.Г. Разработка методологической основы исследования, участие в проектировании структуры модели, анализ результатов моделирования, интерпретация полученных зависимостей, формулировка выводов, общее редактирование и доработка статьи.

Полещенко Д.А. Подготовка геоинформационных данных и характеристик дорожной инфраструктуры, интеграция пространственных данных в модель, визуализация результатов, участие в анализе и обсуждении выводов, редактирование разделов, связанных с данными и картографическим представлением.

Цыганков Ю.А. Разработка алгоритмической части модели, реализация регрессионного и машинного обучения компонентов, оценка точности и устойчивости модели, статистическая валидация результатов, участие в написании методологической части статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yung A.A. Conceptualization of the research problem, development of the mathematical model concept, collecting and initial processing of road traffic accident data on the urban street network, conducting computational experiments, and drafting the main text of the manuscript.

Shevtsova A.G. Development of the methodological framework, contribution to the design of the model architecture, analysis of simulation results, interpretation of identified relationships, formulation of conclusions, and overall editing and revision of the manuscript.

Poleshchenko D.A. Preparation of geospatial data and road infrastructure characteristics, integration of spatial datasets into the model, visualization of results, participation in the analysis and discussion of findings, and editing of sections related to data processing and cartographic representation.

Tsygankov Yu.A. Development of the algorithmic component of the model, implementation of regression and machine learning modules, evaluation of model accuracy and robustness, statistical validation of results, and contribution to writing the methodology section of the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юнг Анастасия Алексеевна – канд. техн. наук, аспирант кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0691-1393>,

SPIN-код: 8392-4329,

e-mail: yungnastena33@gmail.com

Шевцова Анастасия Геннадьевна – д-р техн. наук, директор института дополнительного образования и профессионального обучения «Высшая технологическая школа» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>,

SPIN-код: 1326-7713,

e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru

Полещенко Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доц., декан факультета «Автоматизация и информационные технологии» Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (309516, г. Старый Оскол, микрорайон им. Макаренко, 42).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-4296>,

SPIN-код: 6145-1391,

e-mail: po-dima@yandex.ru

Цыганков Юрий Александрович – канд. техн. наук, и.о. заведующего кафедрой «Автоматизированные и информационные системы управления» Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (309516, г. Старый Оскол, микрорайон им. Макаренко, 42).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3001-8362>,

SPIN-код: 5586-2938,

e-mail: TsY-18@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Jung Anastasia A. – Cand. of Sci. (Engineering), PhD student, Department of Automotive Transport Operation and Organization, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46 Kostyukova Street, Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0691-1393>,

SPIN-code: 8392-4329,

e-mail: yungnastena33@gmail.com

Shevtsova Anastasia G. – Dr. of Sci. (Engineering), Director of the Institute of Continuing Education and Professional Training “Higher Technological School” of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova Street, Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>,

SPIN-code: 1326-7713,

e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru

Poleshchenko Dmitry A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Automation and Information Technologies, A.A. Ugarov Sary Oskol Technological Institute (Branch) of the National University of Science and Technology “MISiS” (42 Makarenko Microdistrict, Sary Oskol, 309516).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-4296>,

SPIN- code: 6145-1391,

e-mail: po-dima@yandex.ru

Tsygankov Yury A. – Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Department of Automated and Information Management Systems, A.A. Ugarov Sary Oskol Technological Institute (Branch) of the National University of Science and Technology “MISiS” (42 Makarenko Microdistrict, Sary Oskol, 309516).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3001-8362>,

SPIN- code: 5586-2938,

e-mail: TsY-18@yandex.ru

Научная статья
УДК 656.05
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>
EDN: PTDOLT



РАЗРАБОТКА МЕТОДА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ГОРОДСКИХ ПЕРЕКРЁСТКОВ НА ОСНОВЕ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.Т. Саргсян

Фонд «Дорожный департамент»,
г. Ереван, Армения
artan-sargsyan-97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях устойчивого роста автомобилизации и увеличения нагрузки на улично-дорожную сеть крупных городов возникает необходимость совершенствования методов управления регулируемы-ми перекрёстками. Традиционные системы светофорного регулирования, основанные на фиксированных программах либо данных локальных детекторов, обладают ограниченной адаптивностью и не всегда обеспечивают эффективное распределение пропускной способности при изменяющихся транспортных потоках. Целью настоящего исследования является разработка метода адаптивного управления светофорным регулированием городских перекрёстков на основе навигационных данных транспортных средств.

Материалы и методы. В работе использованы данные, поступающие от навигационных устройств транспортных средств, включая координаты, скорость и направление движения. Методология исследования основана на прогнозировании ожидаемого количества транспортных средств, подходящих к перекрёстку по каждому направлению, и оценке времени их прибытия. Управление параметрами светофорного цикла осуществляется в дискретных расчётных интервалах продолжительностью 15 мин с учётом временной неопределённости подхода транспортных средств. Для повышения устойчивости управления предложен механизм взвешивания, позволяющий корректно учитывать транспортные средства, прибывающие вблизи границ расчётных интервалов, а также остаточные очереди предыдущих периодов.

Результаты. Результаты исследования показывают, что применение разработанного метода обеспечивает более сбалансированное распределение продолжительности зелёных фаз пропорционально ожидаемой нагрузке направлений движения, что способствует повышению пропускной способности перекрёстков и снижению задержек транспортных средств. Предлагаемый подход ориентирован на использование в рамках государственных систем управления дорожным движением и не требует установки дополнительных детекторов или средств видеофиксации.

Обсуждение и заключение. Практическая ценность работы заключается в возможности внедрения метода при проектировании и модернизации светофорных объектов в крупных городах. Оригинальность исследования состоит в использовании прогнозно-ориентированного подхода к адаптивному управлению светофорами на основе навигационных данных, что расширяет возможности существующих систем управления дорожным движением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное движение, навигационные данные, эффективное управление, адаптивное управление светофорами, городское движение, прогнозирование транспортных потоков, интеллектуальные транспортные системы, пропускная способность, перекрёсток, оптимизация трафика, технические решения

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 04.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Саргсян А.Т., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Саргсян А.Т. Разработка метода адаптивного управления светофорным регулированием городских перекрёстков на основе навигационных данных транспортных средств // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 306-315. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>

EDN: PTDLT

DEVELOPMENT OF METHOD FOR ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL AT URBAN INTERSECTIONS BASED ON VEHICLE NAVIGATION DATA

Arman T. Sargsyan

Road Department Fund,

Yerevan, Armenia

arman-sargsyan-97@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Under conditions of sustained growth in motorization and increased loads in urban road networks of large cities, there is a need to improve control methods for signalized intersections. Traditional traffic signal control systems based on fixed timing plans or data obtained from local detectors demonstrate limited adaptability and do not always ensure efficient distribution of intersection capacity under variable traffic flow conditions. The purpose of this study is to develop a method for adaptive traffic signal control at urban intersections based on vehicle navigation data.

Materials and Methods. The study uses data obtained from vehicle navigation devices, including coordinates, speed, and direction of movement. The proposed methodology is based on forecasting the expected number of vehicles approaching an intersection from each traffic direction and estimating their arrival times. Traffic signal control parameters are adjusted within discrete calculation intervals of 15 minutes, taking into account the temporal uncertainty of vehicle arrivals. To improve control stability, a weighting mechanism is introduced, leading to correct record of vehicles arriving within the calculation intervals, as well as residual queues from previous periods.

Results. The results of the study have demonstrated that the application of the proposed method ensures a more balanced distribution of green signal timing in proportion to the expected load of traffic directions, which contributes to increased intersection capacity and reduced vehicle delays. The proposed approach is intended for use within governmental traffic management systems and does not require the installation of additional detectors or video surveillance equipment.

Discussion and conclusion. The practical significance of the study lies in the possibility of implementing the developed method in the design and modernization of traffic signal control systems in large cities. The research novelty refers to the application of a forecast-oriented approach to adaptive traffic signal control based on navigation data, which expands the capabilities of existing traffic control systems.

KEYWORDS: traffic, navigation data, efficient management, adaptive traffic light control, urban traffic, traffic flow forecasting, intelligent transport systems, capacity, intersection, traffic optimization, technical solutions

The article was submitted: January 12, 2026; approved after reviewing: February 04, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Sargsyan A.T. Development of method for adaptive traffic light control at urban intersections based on vehicle navigation data. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2026; 23 (2): 306-315. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-306-315>

© Sargsyan Arman T., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное управление транспортными системами в современной городской среде является одним из основных условий обеспечения устойчивого развития и мобильности населения. Резкое увеличение количества транспортных средств увеличивает нагрузку на улично-дорожную сеть, вероятность возникновения заторов на перекрестках и увеличивает задержки транспортных средств. В результате снижается пропускная способность дорожной сети, возрастают расходы на топливо и вредные выбросы, а также ухудшается уровень безопасности дорожного движения [1, 2, 3].

Традиционные системы управления, основанные на заранее заданных программах работы светофорных объектов либо на данных, получаемых от ограниченного числа детекторов, не обеспечивают оптимизацию дорожного движения в условиях динамично изменяющейся транспортной обстановки. В этих условиях возникает необходимость в разработке методов управления, обеспечивающих более гибкое и адаптивное регулирование транспортных потоков.

В таких плотно застроенных и динамично развивающихся городах, как Ереван, требуется внедрение современных технических решений, обеспечивающих получение данных о транспортных потоках и оптимизацию режимов работы светофорных объектов¹. Существенный интерес для формирования подобной системы представляет использование данных бортовых навигационных устройств транспортных средств. В настоящее время в г. Ереване отсутствует система управления светофорным регулированием, использующая навигационные данные транспортных средств для прогнозирования подходов потоков к перекресткам. В связи с этим разработка и обоснование соответствующего метода управления представляет практический интерес для условий городской улично-дорожной сети г. Еревана.

В отличие от навигационных сервисов, ориентированных на индивидуальную маршрутизацию транспортных средств, в данной работе навигационные данные рассматриваются как источник прогнозной информации о подходах транспортных средств к перекресткам и ис-

пользуются для формирования управляющих воздействий на уровне светофорных объектов.

Таким образом, формируется информационная основа для оценки ожидаемой интенсивности движения, распределения транспортных потоков по направлениям и уровня загрузки перекрестков без необходимости установки дополнительных детекторов или видеокамер.

Предлагаемый подход предусматривает мониторинг транспортных потоков, их прогнозирование и адаптацию тактов светофорных объектов на основе динамически изменяющихся данных. Реализация данного подхода позволяет:

- повысить пропускную способность перекрестков;
- сократить транспортные задержки;
- снизить расход топлива и объём выбросов;
- обеспечить централизованный мониторинг параметров транспортных потоков.

В работе предлагается алгоритм адаптивного управления светофорным регулированием, основанный на распределении длительности фаз светофорного цикла по прогнозируемому количеству транспортных средств, приближающихся к перекрестку. Отличительной особенностью алгоритма является учет временной неопределенности прибытия транспортных средств при формировании управляющих воздействий в расчётных интервалах продолжительностью 15 мин. Адаптация режимов работы светофорных объектов осуществляется в дискретных расчётных интервалах, что обусловлено характером изменения интенсивности движения, при котором существенные колебания параметров транспортного потока проявляются, как правило, в интервалах порядка 15 мин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе предлагается метод адаптивного управления светофорными перекрестками, основанный на использовании навигационных данных транспортных средств, содержащих информацию о прогнозируемом времени их прибытия к перекресткам. В рамках рассматриваемой концепции предполагается, что навигационные устройства транспортных средств находятся под контролем

¹ Спектр ПДД. История создания и развития организации дорожного движения. <http://spectr-pdd.ru/istoricheskaya-statya#history-BDD> (дата обращения: 10.10.2025).

государственных органов и используются в составе централизованной системы мониторинга транспортных потоков. В отличие от существующих систем, осуществляющих управление движением на основе данных локальных детекторов или средств видеонаблюдения, предложенная модель базируется на прогнозировании ожидаемых подходов транспортных средств по каждому направлению движения.

При этом в качестве исходных данных используются прогнозируемые значения количества транспортных средств, которые достигнут перекрёстка в заданном расчётном интервале, а не фактически измеренные запаздывающие показатели интенсивности движения. Указанный подход позволяет заблаговременно реагировать на изменения дорожной обстановки и обеспечивать прогнозируемую и устойчивую оптимизацию светофорных циклов. Сбор данных осуществляется с помощью навигационных устройств, бесплатно предоставляемых водителям, которые устанавливают связь с центральным сервером с использованием мобильных сетей связи 4G/5G. Устройства оснащены GPS-модулями, регистрирующими координаты транспортного средства, скорость движения, направление и частоту остановок с интервалом 5–10 сек. Передача данных осуществляется в зашифрованном виде, что обеспечивает защиту персональных данных водителей [4, 5].

Собранная информация централизуется в единой базе управления дорожным движением, где осуществляется её обработка, классификация и моделирование. Система проектируется таким образом, чтобы обеспечивать оценку текущего состояния перекрёстков и автоматическую адаптацию режимов работы светофорных объектов на основе данных о транспортных потоках в режиме реального времени. Предлагаемая система включает следующие основные подсистемы.

1. Навигационный модуль (на борту транспортных средств):

- оборудование GPS + GSM;
- частота регистрации данных – 0,2 Гц (каждые 5 сек);
- типы данных: координаты (x, y), скорость (v), направление движения (φ), текущий маршрут (r).

2. Центральная управляющая база (Data Processing Unit):

- подсистема приёма данных;
- модуль классификации транспортных потоков;

- алгоритмы прогнозирования потоков и оптимизации режимов работы светофорных объектов.

3. Подсистема управления светофорами (Adaptive Traffic Controller):

- связь со всеми регулируемыми перекрёстками;
- возможность изменения продолжительности циклов в зависимости от текущего уровня загрузки без прерывания работы системы;
- наличие резервного программного обеспечения.

Моделирование транспортных потоков основано на взаимосвязи средней интенсивности (N), скорости (v) и плотности (q) в соответствии с классическим соотношением [6].

$$N = q \cdot v. \quad (1)$$

Каждые 15 мин формируются временно усреднённые значения для транспортных потоков, подходящих к каждому перекрёстку. Если $N_i(t)$ – количество транспортных средств, приближающихся по i -му направлению за рассматриваемый временной интервал, то коэффициент загрузки перекрёстка определяется следующим образом [7]:

$$B = \frac{N_i(t)}{P_i}, \quad (2)$$

где P_i – пропускная способность по данному направлению (ед./ч).

Алгоритм управления учитывает весь диапазон значений коэффициента загрузки B . При малых значениях B (например, $B < 0,5$) длительность зелёных фаз сокращается во избежание неэффективных простоев, а при приближении B к критическому уровню ($B > 0,85$) приоритет перераспределяется в пользу перегруженных направлений движения.

Аналогичные интеллектуальные системы обеспечивают формирование значительных данных о транспортных потоках, используемых для прогнозирования дорожной обстановки [8]. В системе также реализован модуль прогнозирования ожидаемых потоков, который рассчитывает интенсивность движения на последующие 10–15 мин на основе следующих факторов:

- динамика текущей интенсивности;
- повторяющихся закономерностей по дням недели;
- влияния погодных условий и временной зоны.

Модель прогнозирования строится на принципах машинного обучения (machine learning) с использованием комбинации регрессионных и нейронных методов (MLP, LSTM) в обобщённом виде, что позволяет обеспечить точность прогноза на уровне 90–95% [9]. Методы машинного обучения рассматриваются как статистические модели, применяемые для классификации и прогнозирования на основе данных. Машинное обучение является областью искусственного интеллекта, ориентированной на разработку предиктивных алгоритмов и направленной на выявление закономерностей в больших массивах данных [10, 11].

В предлагаемой системе методы машинного обучения используются для прогнозирования ожидаемых потоков транспортных средств на 15 мин. Формирование управляющих воздействий на светофорные объекты осуществляется на основе детерминированной модели оптимизации длительности фаз светофорного цикла. Такой подход позволяет сочетать адаптивность прогнозных моделей и устойчивость классических алгоритмов управления.

Данные по всем перекрёсткам интегрируются в единую геоинформационную систему (GIS), в которой интенсивность движения представляется в виде картографической визуализации. Геоинформационный подход позволяет осуществлять оценку транспортных рисков не только на основе статистических показателей, но и посредством комплексного анализа их пространственного распределения. Результаты геоинформационного мониторинга используются для повышения качества пространственной оценки рисков, что позволяет выявлять пространственные закономерности загрузки, аварийности, задержек и заторов [12, 13]. Данный подход позволяет идентифицировать зоны повышенного риска, оценить их влияние на общую эффективность дорожного движения и формировать пространственно-ориентированные управленческие решения. Кроме того, использование геоинформационной системы обеспечивает следующие функциональные возможности:

- наблюдать зоны загрузки в режиме реального времени;
- выбирать маршруты, минимизирующие среднее время поездки;
- обеспечивать обмен данными между городской транспортной системой, службами скорой помощи, общественными и другими учреждениями.

Использование средств видеofиксации и сверточных нейронных сетей для оценки интенсивности движения является перспективным направлением исследований, однако требует развертывания дорогостоящей инфраструктуры и характеризуется зависимостью от погодных условий и освещённости. В рамках данной работы рассматривается альтернативный подход, основанный на использовании навигационных данных транспортных средств, не требующий установки дополнительных датчиков и камер. Предлагаемый метод не исключает возможности интеграции с иными источниками данных в составе комплексной интеллектуальной транспортной системы.

База данных хранится в среде PostgreSQL + PostGIS, при этом объём информации на каждое транспортное средство не превышает 10 МБ в сутки. Для парка до 100 000 автомобилей общий поток данных составляет примерно 1 ТБ в сутки, что технически реализуемо в рамках государственной серверной инфраструктуры [14, 15].

Оптимизация циклов светофоров осуществляется на двух уровнях:

1. Локальная оптимизация (Local Optimization): система управления каждым перекрёстком рассчитывает интенсивность потоков, подчиняющихся ему, и самостоятельно определяет новую продолжительность цикла на основе следующего принципа:

$$T_{z,i} = \frac{N_i}{\sum N_i} \times T_{ц}, \quad (3)$$

где $T_{z,i}$ – продолжительность зелёного сигнала по i -му направлению; $T_{ц}$ – продолжительность цикла; N_i – интенсивность транспортного потока по i -му направлению; $\sum N_i$ – суммарная интенсивность по всем направлениям перекрёстка.

При наличии конфликтующих направлений движения перераспределение свободной части цикла осуществляется пропорционально значениям коэффициента загрузки по каждому направлению. В случае одновременной перегрузки нескольких направлений увеличение длительности зелёных фаз выполняется для всех данных направлений в относительных долях, что позволяет учитывать конфликтность потоков и обеспечивать сбалансированную пропускную способность перекрёстка без приоритизации только одного направления.

Продолжительность светофорного цикла формируется как результат перераспределения времени между всеми направлениями

движения в пределах одного расчётного интервала. Таким образом, адаптация режима работы перекрёстка осуществляется не для одного критического потока, а для совокупности направлений с учётом их текущей загрузки.

2. Централизованная оптимизация (Global Optimization): центральная база периодически объединяет данные смежных перекрёстков и формирует «координированное управление», что позволяет транспортным средствам проходить маршруты с постоянной скоростью, повышая среднюю скорость движения на 20–25% [16, 17].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Теоретическое значение предложенного подхода заключается в расширении классических моделей управления транспортными потоками за счёт интеграции навигационных данных. В то время как в традиционных теориях оценка потоков основывается на актуальных значениях интенсивности, скорости и плотности, данный метод включает также фактор прогнозируемого подхода, который становится возможным благодаря постоянному мониторингу цифровых навигационных данных. В результате формируется новая концепция управления на основе данных, сочетающая математическое моделирование и информационные технологии.

Затраты на внедрение навигационной системы управления и её эффективность оценивались на основе сравнительного анализа международного опыта с использованием средних значений, представленных в проектах транспортного управления. Стоимость навигационных систем транспортных средств варьируется от 40 до 80 долларов США и выше, в зависимости от модели, производителя и функциональности. Основные бюджетные модели стоят около 50–60 долл. США. В Ереване зарегистрировано около 300 000 транспортных средств. Таким образом, общая средняя стоимость устройств рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} C_1 &= N \times P = 300,000 \times 55 = \\ &= 16,500,000 \text{ долл. США.} \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно опыту программы Smart Mobility 2030 в Сингапуре, стоимость создания центра обработки данных о дорожном движении в режиме реального времени в среднем составляет 2–3 млн долл. США, включая серверы

хранения данных, программное обеспечение и подсистему сетевой безопасности. Для Еревана можно принять усреднённую стоимость $C_2=2,5$ млн долл. США. Количество регулируемых перекрёстков в городе составляет около 263 ед. [16]. Предположим, что наиболее загруженные участки составляют 50%. Средняя стоимость подключения управления каждого перекрёстка, включая модем связи и обновление контроллера, составляет 5 500 долл. США. Следовательно,

$$C_3 = 132 \times 5,500 = 726,000 \text{ долл. США.} \quad (5)$$

Общая стоимость инвестиций

$$\begin{aligned} C_{\text{total}} &= C_1 + C_2 + C_3 = 16,5 + 2,5 + 0,726 = \\ &= 19,726 \text{ млн долл. США.} \end{aligned} \quad (6)$$

В области управления транспортом общепринято оценивать экономическую эффективность по трём показателям [18]:

1. сокращение задержек движения;
2. экономия топлива;
3. снижение выбросов CO_2 .

После внедрения адаптивного управления светофорами средние задержки сокращаются на 10–60% [19]. В Ереване годовое потребление топлива в транспортном секторе по увеличенным расчётам составляет около 200 млн л бензина. Международный опыт показывает, что внедрение автоматизированных систем позволяет сократить расход топлива на 8–33% [20]. Если благодаря системе удастся сократить неэффективные расходы топлива на 15 %, то

$$\begin{aligned} S_f &= 200,000,000 \times 0,15 \times 1,3 = \\ &= 39,000,000 \text{ долл. США/год,} \end{aligned} \quad (7)$$

где 1,3 долл. за литр – средняя цена на бензин.

Однако весь эффект не может быть полностью отнесён на систему – он учитывается с коэффициентом 0,4 с учётом городского масштаба. То есть частный эффект за счёт системы составляет $0,4 \times 39,0 = 15,6$ млн долларов США в год. Таким образом, общие затраты на внедрение составляют 19,726 млн долларов США, а годовой эффект – около 15,6 млн долларов США, что обеспечивает

$$T_{\text{обрат}} = \frac{C_{\text{total}}}{S_f} = \frac{19,726}{15,6} \approx 1,3 \text{ год.} \quad (8)$$

Общие затраты на внедрение составляют 19,726 млн долл. США, а годовой экономиче-

ский эффект – 15,6 млн долларов США. При таких показателях срок окупаемости инвестиций составляет примерно 1,3 года, а годовая рентабельность инвестиций (ROI) – около 80%. После окупаемости система обеспечивает чистую экономическую прибыль в размере примерно 15,6 млн долл. США в год. После указанного периода инвестиции приносят стабильную прибыль, а накопительный ROI за 5 лет превышает 200%. В системах автоматизированного управления перекрёстками продолжительность зелёного сигнала может изменяться с определённой периодичностью в зависимости от количества транспортных средств, подходящих к данному участку. Этот метод предусматривает, что продолжительность зелёного сигнала (фаза) корректируется каждые 15 мин, а основой расчёта служит количество транспортных средств, подходящих к перекрёстку за этот 15-минутный интервал по направлениям. Такой принцип позволяет отражать стохастические флуктуации интенсивности транспортного потока в течение дня, не делая систему чрезмерно чувствительной или нестабильной. Навигационное устройство, установленное в каждом транспортном средстве, регистрирует следующие данные:

$$\{ID_i, t_i, x_i, y_i, V_i, \varphi_i\}, \quad (9)$$

где ID_i – идентификатор транспортного средства; t_i – заданное время фиксации; x_i, y_i – координаты транспортного средства; V_i – текущая скорость; φ_i – направление движения.

На основе этих данных рассчитывается D_i – расстояние от транспортного средства до перекрёстка (м) и, соответственно, оцененное время подхода транспортного средства T_i :

$$T_i = \frac{D_i}{V_i}. \quad (10)$$

Система делит данные за весь день на 15-минутные временные интервалы,

$$T_k = [t_k, t_k + 900) \text{ с}, \quad (11)$$

где каждый блок длится 900 сек (15 мин).

В течение каждого такого временного интервала рассчитывается количество транспортных средств, которые подойдут к данному перекрёстку в этот промежуток времени. Таким образом, для каждого направления получается

$$N_j^{(k)} = \sum_{i=1}^{n_j} [T_i \leq 900], \quad (12)$$

где $N_j^{(k)}$ – количество транспортных средств, подходящих к перекрёстку по j -му направлению в k -й 15-минутный интервал; T_i – оцененное время достижения перекрёстка данным транспортным средством в секундах.

Эти значения служат основой для определения продолжительности зелёного сигнала в данном временном интервале. Поскольку транспортные средства могут достигать перекрёстка не точно в пределах 15-минутного блока – некоторые немного раньше или позже – необходимо определить взвешенный подход для сглаживания влияния таких отклонений. Для этого вводится временной порог $\Delta = 30 - 60$ сек и задаётся вес для каждого транспортного средства:

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{если } T_i \leq 900 - \Delta, \\ \frac{900 - T_i}{2\Delta}, & \text{если } 900 - \Delta < T_i < 900 + \Delta, \\ 0, & \text{если } T_i \geq 900 + \Delta. \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, для каждого направления рассчитывается «взвешенное» количество ожидаемых транспортных средств по следующей формуле:

$$\tilde{N}_j^{(k)} = \sum_{i \in j} w_i. \quad (14)$$

Таким образом, мы избегаем ситуации, когда транспортные средства ошибочно учитываются в неверном временном блоке. Каждый новый 15-минутный интервал начинается с определённой остаточной очереди – $Q_j^{(kk)}$, представляющей количество транспортных средств, не обслуженных в предыдущем блоке. Эта очередь должна быть добавлена к ожидаемому потоку текущего блока.

$$N_{j, \text{все}}^{(k)} = Q_j^{(k)} + \tilde{N}_j^{(k)}. \quad (15)$$

Таким образом, для каждого направления общий ожидаемый поток в данном блоке равен сумме очереди, оставшейся с предыдущего блока, и транспортных средств, ожидаемых в течение текущего блока. Обозначим общую продолжительность цикла $T_{\text{ц}}$, количество тактов – m , минимальную продолжительность зелёного сигнала – $T_{\text{з}}$. мин. Сначала рассчитывается свободное распределяемое время:

$$T_{\text{ц, свободно}} = T_{\text{ц}} - m \cdot T_{\text{з}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{ц, свободно}}$ – свободная часть цикла, подлежащая перераспределению между направлениями движения; $T_{\text{ц}}$ – общая продолжительность цикла светофорного регулирования; m – количество фаз (направлений движения); $T_{\text{з}}$ –

– минимально допустимая продолжительность зелёной фазы.

Затем продолжительность зелёного сигнала для каждого направления определяется пропорционально ожидаемому потоку:

$$T_{3,j}^{(k)} = T_{3, \text{мин}} + \frac{N_{j, \text{все}}^{(k)}}{\sum_{r=1}^n N_{r, \text{все}}^{(k)}} \cdot T_{\text{Ц, свободно}} \quad (17)$$

где $T_{3,j}^{(k)}$ – продолжительность зелёного сигнала по j -му направлению в данном 15-минутном интервале, $\sum_{r=1}^n N_{r, \text{все}}^{(k)}$ сумма количества транспортных средств, подходящих к перекрёстку по всем направлениям в интервале k .

Эта формула показывает, что каждое направление получает долю зелёного сигнала, пропорциональную количеству ожидаемых транспортных средств за 15-минутный интервал. Система каждые 15 мин (то есть через $t_k + 900$ сек) вновь проверяет навигационные данные, рассчитывает новые значения $N_{j, \text{все}}^{(k+1)}$ и по формуле (17) определяет новые $T_{3,j}^{(k+1)}$. Таким образом, перекрёсток получает самонастраивающийся цикл управления, который периодически корректируется в соответствии с фактической нагрузкой транспортного потока. Кроме того, если общий поток в данном блоке снижается (например, в ночное время), система поддерживает минимальное значение $T_{3, \text{мин}}$, обеспечивая минимально допустимую пропускную способность направления. Механизм взвешивания ($\Delta = 30\text{--}60$ сек) гарантирует, что раннее или позднее прибытие транспортных средств не приведёт к ошибкам в расчётах. В условиях городского движения неопределённость T_i формируется тремя основными факторами: ошибки измерений GPS ($\pm 10\text{--}25$ сек, $\sim 2\%$), задержки, обусловленные наличием красного сигнала на промежуточных регулируемых перекрёстках (в среднем $\pm 20\text{--}40$ сек), естественные колебания потока, связанные с режимами остановок, перестроениями и нестабильностью скорости (в среднем $\pm 15\text{--}20$ сек) [20,21].

Комбинация этих трёх источников показывает, что общая неопределённость T_i составляет примерно 30–60 сек. Следовательно, данный интервал служит оптимальным порогом, который предотвращает ошибочную классификацию транспортных средств, прибывающих на несколько десятков секунд раньше или позже, в пределах 15-минутных расчётных интервалов.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённого исследования показывают, что предложенный метод на основе навигационных данных обеспечивает эффективную оптимизацию управления светофорами на перекрёстках в 15-минутных расчётных интервалах. Применение подхода позволяет корректировать продолжительность зелёного сигнала исходя из фактического числа транспортных средств, подходящих к перекрёстку в данный интервал, одновременно учитывая предельные отклонения транспортных средств, прибывающих раньше или позже. Анализ подтвердил, что такой подход обеспечивает сбалансированное обслуживание транспортных потоков и стабильную работу циклов светофоров, что снижает неравномерные очереди на перекрёстках и задержки транспортных средств. Полученные результаты показывают, что метод применим как для отдельных перекрёстков, так и для целых маршрутов, обеспечивая адаптивное управление городской транспортной системой в реальном времени.

Данные результаты могут быть использованы при проектировании систем адаптивного управления регулируемые перекрёстками в Ереване и других крупных городах, снижая необходимость установки дополнительных детекторов и обеспечивая управляемость на основе данных с высокой гибкостью на уровне государственной транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Решетников Е.Б., Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Анализ организации дорожного движения в центральной части города Харькова // Вестник ХНАДУ. 2005. Вып. 29. С. 116–122.
2. Vorobyev I., Zamytskih A.V., Golubchenko N.S., Vorobyeva T.V., Morozov D.Y. Ensuring the Accuracy of Digital Road Model Data to Increase Situational Awareness. 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, Russian Federation, 2021, pp. 1-6, DOI:10.1109/TIRVED53476.2021.9639134
3. Саргсян А.Т. Ситуация дорожного движения в Ереване и пути модернизации с помощью автоматизированной системы управления дорожным движением // Вестник СибАДИ. 2024. 21 (3 (97)), 422–434. DOI:10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434
4. Аламир Х.С., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А. Интеллектуальная система контроля заторов на дорогах с использованием контролируемого алгоритма машинного обучения на базе адаптивного IOTN // Известия Южного федерального университета.

Технические науки. 2023. № 2 (232). С. 175–186. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-175-186

5. Romanowska A, Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment // *Applied Sciences*. 2021; 11(21): 9914. DOI: 10.3390/app11219914

6. Лозовая Е.А., Терешкина О.А., Власова О.И. МЕТОДИКА Расчета пропускной способности автомобилей на участке аксайского проспекта г. Ростова-на-Дону // *Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты*. 2017. С. 337–339.

7. J. Zhang, F. Wang, K. Wang, W. Lin, X. Xu and C. Chen, “Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 4, 2011, pp. 1624–1639. doi:10.1109/TITS.2011.2158001

8. Xing Z, Huang M, Peng D. Overview of machine learning-based traffic flow prediction. *Digital Transportation and Safety*. 2023. 2(3):164–175 DOI: 10.48130/DTS-2023-0013

9. Singh G, Al'Aref SJ, Van Assen M, et al. Machine learning in cardiac CT: Basic concepts and contemporary data // *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2018;12(3):192–201. doi:10.1016/j.jcct.2018.04.010

10. Ahsan M.M., Luna S.A., Siddique Z. Machine-Learning-Based Disease Diagnosis: A Comprehensive Review. *Healthcare*, 2022. 10(3), 541. DOI: 10.3390/healthcare10030541

11. Esteban Zimányi, Mahmoud Sakr, and Arthur Lesuisse. *MobilityDB: A Mobility Database Based on PostgreSQL and PostGIS*. *ACM Trans. Database Syst*. 2020. 45, 4, Article 19 (December 2020), 42 pages. DOI: 10.1145/3406534

12. Алибиева Ж., Мукажанов Н., Черикбаева Л., Еримбетова А., Байымбетов Д. Сравнение возможностей NOSQL колоночной базы данных // *Вестник КазАТК*. 2024. 131, 2 (фев. 2024), 350–358. DOI: 10.52167/1609-1817-2024-131-2-350-358

13. Цветков В.Я. Геоинформационный мониторинг // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2005. № 5. С.151–155.

14. Охотников А.Л. Геоинформационный мониторинг транспортных объектов // *Наука и технологии железных дорог*. 2017. 3(3). С. 35–47.

15. Саргсян А. Разработка инвестиционных способов дистанционного комбинированного управления движением в городе Ереване // *Научные труды Национального университета архитектуры и строительства Армении*. 2024. 89(2). 104–109. DOI: 10.54338/18294200-2024.2-12

16. Саргсян А. Изучение и анализ основных проблем транспорта в городе Ереване с целью улучшения // *Научные труды Национального университета архитектуры и строительства Армении*. 2024. 89(2). 94–103. DOI: 10.54338/18294200-2024.2-11

17. Yusuf J.A. Economic Evaluation of Smart Traffic Management Systems in Reducing Carbon Emissions // *Journal of Economics, Business, and Commerce*, 2024. 1(1), 30-35. DOI: 10.69739/jebc.v1i1.82

18. Горшко В.С., Шамлицкий Я.И. Применение адаптивных систем управления дорожным дви-

жением // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2012. № 8. С. 243–244.

19. Данильчик Р.А. Влияние адаптивных систем на условия дорожного движения: сборник тезисов научной студенческой конференции «Неделя науки – 2015». БрГТУ, 2015. С. 15.

20. Ткачева Т.М., Цибалов К.А., Шишкин Д.О. Погрешности видекамеры, спидометра и навигатора // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2019. № 1(19). С. 17.

21. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S. Patterns of traffic congestion indicator at some intersections of the road network // *Intellect. Innovacii. Investicii*. 2024. Vol. 1, pp. 95–115. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-1-95

REFERENCE

1. Reshetnikov E.B., Abramova L.S., Chernobaev N.S., Shirin V.V. Analysis of traffic organization in the central part of Kharkov city. *Vestnik of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2005; (29), 116–122. (In Russ.)

2. Vorobyev A.I., Zamytskih A.V., Golubchenko N.S., Vorobyeva T.V., Morozov D.Y. Ensuring the Accuracy of Digital Road Model Data to Increase Situational Awareness. Intelligent Technologies and Electronic Devices in *Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 2021; pp. 1-6, doi: 10.1109/TIRVED53476.2021.9639134

3. Sargsyan A.T. Traffic situation in Yerevan and ways to modernize with the help of current problem of traffic congestion. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(3):422-434. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434. EDN: UAXSCA

4. Alamir H.S., Zargaryan E.V., Zargaryan, Yu.A. Intelligent system for controlling traffic congestion using a supervised machine learning algorithm based on adaptive IOTN. *Izvestiya of Southern Federal University. Technical Sciences*, 2023; (2(232)), 175–186. (In Russ.) DOI:10.18522/2311-3103-2023-2-175-186

5. Romanowska A, Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment. *Applied Sciences*. 2021; 11(21): 9914. DOI: 10.3390/app11219914

6. Lozovaya E.A., Tereshkina O.A., Vlasova, O.I. Method for calculating the capacity of vehicles on a section of Aksaysky Prospekt in Rostov-on-Don. *Fundamental Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects*, 2017; pp. 337–339. (In Russ.)

7. Zhang J., Wang F., Wang K., Lin W., Xu X., Chen C. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011; Vol. 12, No. 4, pp. 1624–1639. doi:10.1109/TITS.2011.2158001

8. Xing Z, Huang M, Peng D. Overview of machine learning-based traffic flow prediction. *Digital Transportation and Safety*. 2023; 2(3):164–175 DOI: 10.48130/DTS-2023-0013

9. Singh G, Al'Aref SJ, Van Assen M, et al. Machine learning in cardiac CT: Basic concepts and contemporary data. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2018; 12(3):192–201. doi:10.1016/j.jcct.2018.04.010

10. Ahsan M.M., Luna S.A., Siddique Z. Machine-Learning-Based Disease Diagnosis: A Comprehensive Review. *Healthcare*, 2022; 10(3), 541. DOI: 10.3390/healthcare10030541
11. Esteban Zimányi, Mahmoud Sakr, Arthur Lesuisse. MobilityDB: A Mobility Database Based on PostgreSQL and PostGIS. *ACM Trans. Database Syst.* 2020; 45, 4, Article 19 (December 2020), 42 pages. DOI: 10.1145/3406534
12. Alibieva Zh., Mukazhanov N., Cherikbaeva L., Yerimbetova, A., & Baiymbetov, D. (2024). Comparison of capabilities of NoSQL columnar database. *Vestnik KazATK*, 131(2), 350–358. (In Russ.) DOI: 10.52167/1609-1817-2024-131-2-350-358
13. Tsvetkov V.Ya. Geoinformation monitoring. *Izvestiya of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*, 2005; (5), 151–155. (In Russ.)
14. Okhotnikov A. L. Geoinformation monitoring of transport objects. *Science and Technology of Railways*, 2017; 3(3), 35–47. (In Russ.)
15. Sargsyan A. Development of investment methods for remote combined traffic control in Yerevan city. *Scientific Works of the National University of Architecture and Construction of Armenia*, 2024; 89(2), 104–109. (In Russ.) DOI: 10.54338/18294200-2024.2-12
16. Sargsyan A. Study and analysis of the main transport problems in Yerevan city with the aim of improvement. *Scientific Works of the National University of Architecture and Construction of Armenia*, 2024; 89(2), 94–103. (In Russ.) DOI: 10.54338/18294200-2024.2-11
17. Yusuf J.A. Economic Evaluation of Smart Traffic Management Systems in Reducing Carbon Emissions. *Journal of Economics, Business, and Commerce*, 2024; 1(1), 30-35. DOI: 10.69739/jebc.v1i1.82
18. Goroshko V.S., Shamlytskyi, Ya.I. Application of adaptive traffic control systems. *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2012; (8), 243–244. (In Russ.)
19. Danilchik R.A. Influence of adaptive systems on road traffic conditions. In Proceedings of the Student Scientific Conference “Science Week – 2015”. 2015; (p. 15). Brest State Technical University (BrSTU). (In Russ.)
20. Tkacheva T.M., Tsibalov K.A., Shishkin D.O. Errors of video camera, speedometer and navigator. *Automobile. Road. Infrastructure*, 2019; 1(19), 17. (In Russ.)
21. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S. Patterns of traffic congestion indicator at some intersections of the road network. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2024; Vol. 1, pp. 95–115. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-1-95

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Саргсян Арман Тигранович – канд. техн. наук, старший инженер по изучению проектов и обеспечению безопасности дорог, Фонд «Дорожный департамент» (0010, г. Ереван, Площадь Республики, Дом Правительства 3).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-6804>,

SPIN-код: 8636-0560,

e-mail: arman-sargsyan-97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sargsyan Arman T. – Candidate of Technical Sciences, Senior Engineer for Project Study and Road Safety, Road Department Fund (3, Government Building, Republic Square, Yerevan, 0010).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-6804>,

SPIN-code: 8636-0560,

e-mail: arman-sargsyan-97@mail.ru

Научная статья
УДК 629.113, 621.87
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>
EDN: RDLMBO



УГЛУБЛЕННОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФОРСУНОК АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМЫ ВПРЫСКА ТОПЛИВА СИЛОВОГО АГРЕГАТА АВТОМОБИЛЯ

Б.В. Журавский¹ ✉, **С.И. Цехош²**

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

²Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Россия

✉ ответственный автор
ra9teo@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. На эффективность и надёжность силовых агрегатов автомобилей с дизельным двигателем значительное влияние оказывает техническое состояние электрогидравлических форсунок системы впрыска топлива. Для своевременного выявления и устранения возникающих в процессе эксплуатации неисправностей форсунок необходимо периодически проводить контрольно-диагностические работы. Диагностирование демонтированных с силового агрегата форсунок при помощи специальных стендов характеризуется наибольшей точностью, при этом определяется только общее техническое состояние форсунок, без конкретизации неисправностей. Углубленное диагностирование с локализацией неисправностей позволит принимать оптимальные решения о технических воздействиях при ремонте форсунок. Целью работы является оценка возможности повышения глубины поиска неисправностей при стендовом диагностировании форсунок путём анализа характера зависимостей диагностических параметров от величины давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор стенда при постоянной длительности управляющих импульсов.

Материалы и методы. Математическая модель электрогидравлической форсунки представлена в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику происходящих в форсунке процессов. При проведении численных экспериментов осуществлялось изменение в определённых диапазонах значений давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор, структурных параметров: зазора в сопряжениях «плунжер мультипликатора – втулка», «направляющая часть иглы – корпус распылителя», неплотности управляющего клапана и уплотнительного кольца. Длительность электрических управляющих импульсов оставалась постоянной.

Результаты. Приведены графики полученных зависимостей диагностических параметров: цикловой подачи, среднего расхода тестовой жидкости в обратную линию и продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости при различных значениях структурных параметров.

Обсуждение и заключение. В результате проведённых исследований были выявлены отличия в характере зависимостей некоторых из рассмотренных диагностических параметров от давления на входе в аккумулятор при наличии отклонений отдельных структурных параметров. Полученная при диагностировании дополнительная информация позволит выявлять наличие отклонений отдельных структурных параметров, что увеличит глубину поиска неисправностей. В работе приведена блок-схема предлагаемого диагностического алгоритма.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: силовой агрегат автомобиля, дизельный двигатель, аккумуляторная система впрыска, электрогидравлическая форсунка, математическая модель, техническое состояние, неисправность, диагностирование, глубина поиска неисправности, структурный параметр, диагностический параметр, диагностический алгоритм

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность рецензентам данной работы.

© Журавский Б.В., Цехош С.И., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 23.12.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Журавский Б.В., Цехош С.И. Углубленное диагностирование электрогидравлических форсунок аккумуляторной системы впрыска топлива силового агрегата автомобиля // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 316-333. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>

EDN: RDLMBO

IN-DEPTH DIAGNOSTICS OF ELECTROHYDRAULIC INJECTORS FOR BATTERY-POWERED FUEL INJECTION SYSTEM OF VEHICLE POWERTRAIN

Boris V. Zhuravsky¹ ✉, Sofia I. Tsekhoosh²

¹The Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russia

²Tyumen State University
Tyumen, Russia

✉ corresponding author
ra9meo@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The technical condition of electro-hydraulic injectors of the fuel injection system has a significant impact on the efficiency and reliability of power units in diesel vehicles. To promptly detect and eliminate any injector failures during operation, it is necessary to follow periodical control and diagnostics procedures. Diagnosing injectors removed from the power unit with special stands is characterized by the highest accuracy, though it allows checking general technical condition of the injectors, without specifying particular faults. In-depth diagnostics with fault localization will affect optimal decisions to be made regarding technical measures during injector repair. The research objective is to evaluate the possibility of increased in-depth failure detection during bench diagnostics of injectors by analyzing the nature of relations between diagnostic parameters and the values of test fluid pressure at the bench liquid accumulator inlet with constant time of control pulses.

Materials and methods. A mathematical model of an electrohydraulic injector is presented in the form of a system of differential equations describing the dynamics of the processes in the injector. During numerical experiments, the pressure of the test liquid at the battery inlet and the following structural parameters were changed within specific ranges: multiplier plunger - sleeve gap, needle guide - nozzle, and the leakage of the control valve and that of the sealing ring. The time of the electrical control pulses remained constant.

Results. The graphs demonstrating relations between the diagnostic parameters (cyclic delivery, average flow rate of test fluid in the return line and delay time in the end of injection) and the pressure of the test fluid have been presented for different values of the structural parameters.

Discussion and conclusion. As a result of the conducted research, differences were revealed in the nature of the relations between some diagnostic parameters and the accumulator inlet pressure with deviations in particular structural parameters. The additional information obtained during diagnostics will allow us to identify deviations in certain structural parameters, which will increase the level of detecting failures. The paper presents a block diagram of the proposed diagnostic algorithm.

KEYWORDS: automotive powertrain, diesel engine, battery injection system, electrohydraulic injector, mathematical model, technical condition, failure, diagnostics, failure detection level, structural parameter, diagnostic parameter, diagnostic algorithm

ACKNOWLEDGEMENT: the authors express gratitude to the reviewers of this paper.

© Zhuravsky Boris V., Tsekhoosh Sofia I., 2026



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

The article was submitted: December 23, 2025; approved after reviewing: February 10, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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: Zhuravsky B.V., Tsekhosh S.I. In-depth diagnostics of electrohydraulic injectors for battery-powered fuel injection system of vehicle powertrain. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 316-333. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>

ВВЕДЕНИЕ

Значительное влияние на работу силового агрегата автомобиля с дизельным двигателем внутреннего сгорания оказывает техническое состояние электрогидравлических форсунок (ЭГФ), входящих в состав аккумуляторной системы впрыска топлива АСВТ [1, 2, 3]. В процессе эксплуатации происходит ухудшение технического состояния ЭГФ [4, 5, 6]. Для своевременного выявления и устранения возникающих неисправностей необходимо регулярно проводить диагностирование ЭГФ [7]. Выявление изменений технического состояния ЭГФ на ранней стадии позволяет своевременно устранить проблему и предотвратить серьезные последствия для силового агрегата [1].

Вопросам диагностирования ЭГФ АСВТ посвящено большое число работ [1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Диагностирование ЭГФ может проводиться без их демонтажа с силового агрегата, а также после их демонтажа при помощи специальных диагностических стендов [13, 16, 17]. Стендовое диагностирование ЭГФ позволяет с наибольшей точностью определять их техническое состояние [9].

Диагностические стенды позволяют в автоматизированном режиме с высокой точностью определять значения ряда диагностических параметров: цикловой подачи, среднего расхода тестовой жидкости в обратную линию, продолжительности запаздывания начала впрыска, продолжительности запаздывания и окончания впрыска, минимального давления срабатывания и др. [10, 16].

При стандартном стендовом диагностировании ЭГФ реализуются тестовые режимы, параметры которых устанавливаются согласно тест-планам [9, 16, 17]. Определение значений диагностических параметров и их сравнение с номинальными и предельно-допустимыми значениями происходит только на определённых режимах работы форсунки, для каждого из которых задано сочетание значения давления тестовой жидкости на входе в форсунку и продолжительность управляющих импульсов [16].

Как показывает опыт эксплуатации, достаточно большое число неисправностей ЭГФ связано с изменением определённых структурных параметров: с увеличением зазоров в сопряжениях «направляющая часть иглы – корпус распылителя», «втулка – плунжер мультипликатора»; нарушением гидроплотности запорного элемента управляющего клапана и уплотнительного кольца втулки (корпуса клапана) [5, 6].

На рисунке 1 приведена схема, показывающая влияние рассматриваемых структурных параметров на диагностические параметры [9, 10].

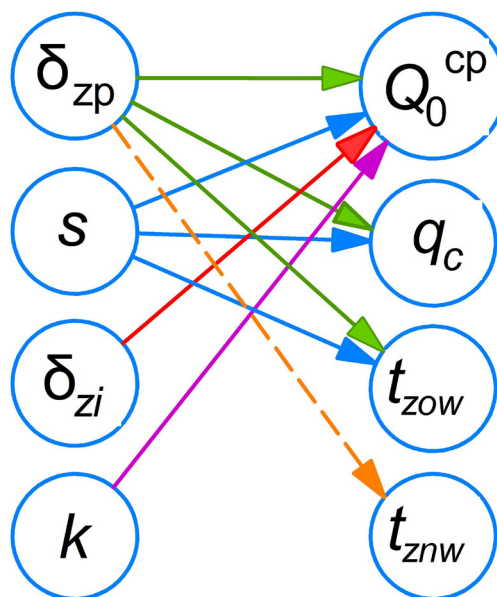


Рисунок 1 – Связь структурных и диагностических параметров электрогидравлической форсунки
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Relationship between structural and diagnostic parameters of electrohydraulic injector
Source: compiled by the authors.

Структурные параметры: зазор в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора» δ_{zp} , величина неплотности управляющего клапана s одновременно оказывают влияние на несколько диагностических параметров: на цикловую подачу q_c , на средний расход в обратную линию Q_0^{cp} и на продолжительность за-

паздывания окончания впрыска t_{zov} . Изменение зазора δ_{zp} также влияет на диагностический параметр – продолжительность запаздывания начала впрыска t_{zov} , однако чувствительность данного диагностического параметра мала [10], что затрудняет его практическое применение.

Структурные параметры: зазор в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя» δ_{zi} , величина неплотности уплотнительного кольца k влияют одновременно на диагностический параметр – средний расход в обратную линию Q_0^{cp} .

Следует отметить, что увеличение среднего расхода в обратную линию Q_0^{cp} происходит при возрастании значений всех рассмотренных структурных параметров. Цикловая подача q_c возрастает при увеличении значения зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора» δ_{zp} , а также при увеличении значения неплотности управляющего клапана s . Аналогичное влияние оказывают структурные параметры δ_{zp} и s на диагностический параметр t_{zov} . Это все приводит к возникновению неопределённости при диагностировании, информация только о наличии превышения предельно-допустимого значения отдельными диагностическими параметрами не позволяет выявлять конкретные причины данных отклонений. При реализации существующей технологии стендового диагностирования ЭГФ диагностические параметры рассматриваются в качестве интегральных, определяется только общее техническое состояние форсунок, без конкретизации неисправностей [9].

При выявлении в процессе стендового диагностирования отклонений в работе ЭГФ производится её полная разборка и дефектовка всех деталей и узлов. Полная разборка и дефектовка ЭГФ характеризуются высокой трудоёмкостью. Снизить трудоёмкость дефектовки ЭГФ можно путем осуществления предварительного углубленного диагностирования [9] с локализацией неисправностей.

В работах [9, 15] рассматривается метод повышения глубины поиска неисправностей, сущность которого заключается в анализе значений совокупности измеряемых диагностических параметров и выявлении неисправностей по наличию или отсутствию отклонений определённых диагностических параметров из рассматриваемой совокупности. Предварительно в данных работах для каждого рассмотренного структурного параметра определялся набор связанных с ним диагностических

параметров. Данный метод повышения глубины поиска неисправностей при диагностировании ЭГФ имеет определённые ограничения, так как отклонение отдельных структурных параметров оказывает одинаковое влияние на вид совокупности изменяющихся при этом диагностических параметров (см. рисунок 1). При изменении величин зазора δ_{zp} и неплотности s , а также при изменении величин зазора δ_{zi} и неплотности k получаются практически одинаковые совокупности изменяющихся диагностических параметров, это вносит неопределённость и ограничивает глубину поиска неисправностей. Для уменьшения неопределённости при диагностировании с целью локализации конкретных неисправностей необходима дополнительная информация.

Разработка методов и способов повышения глубины поиска неисправностей при диагностировании ЭГФ является достаточно актуальной и практически значимой.

При диагностировании ЭГФ на стендах имеется техническая возможность задавать параметры тестовых режимов: величину давления тестовой жидкости и продолжительность управляющих импульсов. Можно реализовать такой тестовый режим, при котором диагностические параметры будут измеряться при изменении давления тестовой жидкости в определённом диапазоне при фиксированной продолжительности управляющих импульсов либо при постоянном давлении и варьируемой длительности управляющих импульсов. Анализ полученных зависимостей диагностических параметров от параметров тестовых режимов может дать дополнительную информацию, снижающую неопределённость и позволяющую проводить углубленное диагностирование ЭГФ.

Целью данной статьи является оценка возможности повышения глубины поиска неисправностей при стендовом диагностировании ЭГФ путём анализа характера зависимостей диагностических параметров от величины давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор стенда при постоянной длительности управляющих импульсов.

Задачи исследования:

1. Установить и проанализировать зависимости цикловой подачи тестовой жидкости от давления в аккумуляторе при разных значениях неплотности управляющего клапана, зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора».

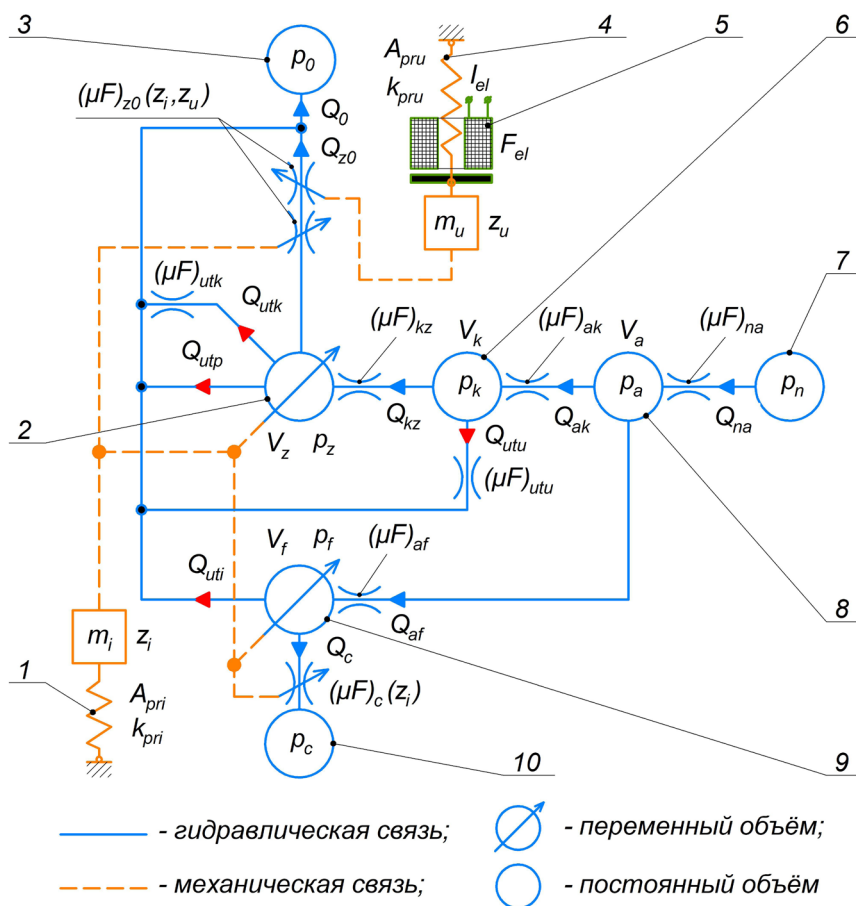


Рисунок 2 – Расчётная комбинированная схема электрогидравлической форсунки
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 - Combined calculation diagram of electrohydraulic injector
 Source: compiled by the authors.

2. Выявить и проанализировать зависимости среднего расхода в обратную линию от давления в аккумуляторе при разных значениях неплотности управляющего клапана, зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора», неплотности уплотнительного кольца, зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя».

3. Установить и проанализировать зависимости продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления в аккумуляторе при разных значениях неплотности управляющего клапана, зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 2 представлена расчётная комбинированная схема ЭГФ с электромагнитным приводом управляющего клапана, подключенной к жидкостному аккумулятору, обратной линии и камере впрыска измерительной системы

диагностического стенда. Тестовая жидкость под определённым давлением из жидкостного аккумулятора подаётся на вход форсунки, из полости слива форсунки жидкость поступает в обратную линию. На обмотку электромагнита подаются электрические управляющие импульсы заданной длительности, впрыск тестовой жидкости через распылитель форсунки осуществляется в камеру впрыска стенда.

На рисунке 2 представлены следующие обозначения: 1 – пружина иглы; 2 – управляющая полость; 3 – обратная линия; 4 – пружина управляющего клапана; 5 – электромагнит; 6 – промежуточная полость; 7 – топливный насос высокого давления (ТНВД); 8 – жидкостный аккумулятор; 9 – подыгольная полость; 10 – камера впрыска; p_0 – атмосферное давление, Па; p_n – давление на выходе ТНВД, Па; p_a – давление в топливном аккумуляторе, Па; p_k – давление в промежуточной полости форсунки, Па; p_z – давление в управляющей полости, Па; p_f – давление в подыгольной полости, Па; p_c –

давление в камере впрыска диагностического стенда в момент впрыска тестовой жидкости, Па; z_i – перемещение иглы, м; z_u – перемещение якоря электромагнита управляющего клапана, м; V_a – объём топливного аккумулятора, м³; V_k – объём промежуточной полости форсунки, м³; V_z – объём управляющей полости, м³; V_f – объём подыгольной полости, м³; Q_o – общий расход тестовой жидкости в обратную линию, м³/с; Q_{z0} – расход тестовой жидкости через канал, соединяющий управляющую полость и обратную линию, м³/с; Q_{na} – расход тестовой жидкости из ТНВД в топливный аккумулятор, м³/с; Q_{ak} – расход тестовой жидкости из топливного аккумулятора в промежуточную полость форсунки, м³/с; Q_{kz} – расход тестовой жидкости через канал, соединяющий промежуточную и управляющую полости, м³/с; Q_{af} – расход тестовой жидкости из аккумулятора в подыгольную полость форсунки, м³/с; Q_c – расход тестовой жидкости из подыгольной полости форсунки в камеру впрыска диагностического стенда, м³/с; Q_{uti} – расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «направляющая часть иглы – корпус распылителя», м³/с; Q_{utp} – расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «плунжер мультипликатора – втулка», м³/с; Q_{utk} – расход тестовой жидкости через неплотности управляющего клапана, м³/с; Q_{utu} – расход тестовой жидкости через неплотности уплотнительного кольца, м³/с;

$(\mu F)_c(z)$ – эффективное проходное сечение распылителя форсунки, м²; $(\mu F)_{z0}(z_p, z_u)$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего управляющую полость форсунки с обратной линией, м²; $(\mu F)_{kz}$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего промежуточную и управляющую полости форсунки, м²; $(\mu F)_{ak}$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего топливный аккумулятор и промежуточную полость форсунки, м²; $(\mu F)_{na}$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего ТНВД и топливный аккумулятор, м²; $(\mu F)_{utk}$ – эффективное проходное сечение неплотности управляющего клапана, м²; $(\mu F)_{utu}$ – эффективное проходное сечение неплотности уплотнительного кольца, м²; Arg_i – усилие предварительной затяжки пружины иглы, Н; k_{pri} – коэффициент жёсткости пружины иглы, Н/м; A_{pru} – усилие предварительной затяжки пружины управляющего клапана, Н; k_{pru} – коэффициент жёсткости пружины клапана, Н/м; I_{el} – сила электрического тока, протекающего через обмотку электромагнита клапана, А; F_{el} – сила, развиваемая электромагнитом привода клапана, Н; m_i – масса подвижных элементов, перемещающихся совместно с иглой, кг; m_u – масса подвижных элементов привода управляющего клапана, кг.

Формирование утечек тестовой жидкости из управляющей, промежуточной и подыгольной полостей ЭГФ показано на рисунках 3 и 4.

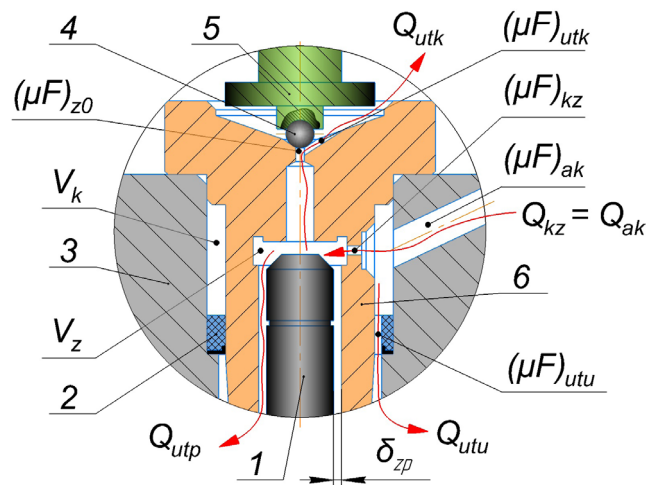


Рисунок 3 – Формирование утечек топлива из управляющей и промежуточной полостей электрогидравлической форсунки:
1 – плунжер мультипликатора; 2 – уплотнительное кольцо; 3 – корпус;
4 – сферический запорный элемент; 5 – толкатель якоря; 6 – втулка
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Fuel leakage generation in the control and intermediate chambers of electrohydraulic injector
1 – multiplier plunger; 2 – sealing ring; 3 – body;
4 – spherical shut-off element; 5 – anchor pusher; 6 – bushing
Source: compiled by the authors.

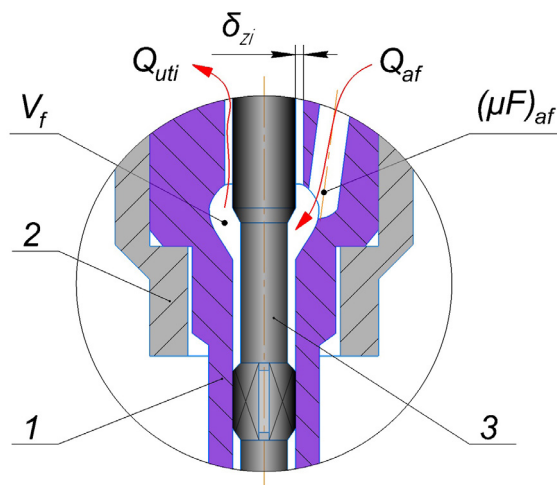


Рисунок 4 – Формирование утечек топлива из подыгольной полости электрогидравлической форсунки: 1 – корпус распылителя; 2 – гайка распылителя; 3 – игла
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Fuel leakage generation underneath the needle of electro-hydraulic injector
 1 – sprayer body; 2 – sprayer nut; 3 – needle
 Source: compiled by the authors.

Математическая модель ЭГФ может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику происходящих в форсунке процессов¹ [18, 19].

$$\begin{cases}
 \frac{dC_i}{dt} = \frac{\sigma_1}{m_i} (p_f f_i - p_z f_p - A_{pri} - k_{pri} z_i - F_{ki}); \\
 \frac{dz_i}{dt} = \sigma_1 C_i; \\
 \frac{dp_f}{dt} = \frac{1}{\alpha V_f} \left(Q_{af} - Q_c - Q_{uti} - \sigma_1 f_{in} \frac{dz_i}{dt} \right); \\
 \frac{dp_z}{dt} = \frac{1}{\alpha V_z} \left(Q_{kz} - Q_{z0} - Q_{utp} - Q_{utk} + \sigma_1 f_{pn} \frac{dz_i}{dt} \right); \\
 \frac{dp_k}{dt} = \frac{1}{\alpha V_k} (Q_{ak} - Q_{kz} - Q_{utu}); \\
 \frac{dp_a}{dt} = \frac{1}{\alpha V_a} (Q_{na} - Q_{ak} - Q_{af}); \\
 \frac{dC_u}{dt} = \frac{p_z f_{cir} + F_{el} - A_{pru} - k_{pru} z_u - F_{ku}}{m_u}; \\
 \frac{dz_u}{dt} = C_u,
 \end{cases} \quad (1)$$

где C_i – скорость перемещения иглы (плунжера мультипликатора), м/с; σ_1 – ступенчатая управляющая функция, накладывающая ограничение на перемещение иглы; F_{ki} – сила, возникающая в контакте плунжера мультипликатора с верхним упором, Н; F_{ku} – сила,

возникающая в контакте подвижных элементов клапана с верхним и нижним упорами, Н; f_i – площадь поперечного сечения иглы, м²; f_{in} – площадь поперечного сечения направляющей иглы, м²; f_p – площадь поперечного сечения плунжера мультипликатора, м²; f_{pn} – площадь поперечного сечения направляющей плунжера, м²; f_{cir} – площадь поперечного сечения сферического запорного элемента клапана по линии контакта с конусной поверхностью седла, м².

При построении математической модели были приняты допущения: волновые явления в жидкости и силы трения в сопряжениях «плунжер мультипликатора – втулка», «направляющая часть иглы – корпус распылителя» не учитываются; коэффициент сжимаемости тестовой жидкости, плотность, вязкость постоянны; зазоры в сопряжениях деталей концентрические; соударение иглы с нижним упором является абсолютно неупругим, верхний упор плунжера мультипликатора, а также нижний и верхний упоры подвижных элементов управляющего клапана представлены в виде условных вязкоупругих элементов.

$$\sigma_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } z_i = 0 \text{ и } p_f f_i - p_z f_p - A_{pri} < 0; \\ 1, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

¹ Астахов И.В., Трусов В.И., Хачиян А.С., Голубков Л.Н. Подача и распыливание топлива в дизелях. М.: Машиностроение, 1971. С.164.

$$f_i = \begin{cases} f_{ni} - f_{sk}, & \text{при } z_i = 0; \\ f_{ni}, & \text{при } z_i > 0, \end{cases} \quad (3)$$

где f_{sk} – площадь сечения иглы по поясу контакта запорного конуса, м².

$$f_p = \begin{cases} f_{ni}, & \text{при } z_i < z_{i_max}; \\ f_{ni} - f_{np}, & \text{при } z_i = z_{i_max}, \end{cases} \quad (4)$$

где f_{np} – площадь поперечного сечения хвостовика плунжера мультипликатора, м²; z_{i_max} – максимальное перемещение иглы, м.

$$F_{ki} = \begin{cases} k_{wi}(z_i - z_{i_max}) + b_{wi}C_i, & \text{при } z_i > z_{i_max}; \\ 0, & \text{при } z_i \leq z_{i_max}, \end{cases} \quad (5)$$

где k_{wi} – коэффициент жёсткости условного упругого элемента верхнего упора плунжера мультипликатора, Н/м; b_{wi} – условный коэффициент сопротивления для материала упора, (Н·с)/м.

$$F_{ku} = \begin{cases} k_{nu}z_u + b_{nu}C_u, & \text{при } z_u < 0; \\ k_{wu}(z_u - z_{u_max}) + b_{wu}C_u, & \text{при } z_u > z_{u_max}; \\ 0, & \text{при } 0 \leq z_u \leq z_{u_max}, \end{cases} \quad (6)$$

где k_{nu} , k_{wu} – коэффициенты жёсткости условных упругих элементов соответственно нижнего и верхнего упоров, подвижных элементов клапана, Н/м; b_{nu} , b_{wu} – условные коэффициенты сопротивления для материала соответственно нижнего и верхнего упоров подвижных элементов клапана, (Н·с)/м; z_{u_max} – максимальное перемещение подвижных элементов клапана, м.

Объёмный расход тестовой жидкости определяется по формуле [18]:

$$Q = \text{sign}(p_j - p_i) \mu F \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_j - p_i|}, \quad (7)$$

где p_j – давление в объеме, сообщающемся с рассматриваемым, Па; p_i – давление в рассматриваемом объеме, Па; μF – эффективное проходное сечение канала, соединяющего объёмы, м²; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Эффективное проходное сечение распылителя форсунки определяется с помощью полиномиальной зависимости [18]:

$$\mu F_c = \mu F_{c_max} \left(2,64 \left(\frac{z_i}{z_{i_max}} \right) - 2,37 \left(\frac{z_i}{z_{i_max}} \right)^2 + 0,73 \left(\frac{z_i}{z_{i_max}} \right)^3 \right), \quad (8)$$

где $(\mu F)_c$ – текущее эффективное проходное сечение распылителя, м²; $(\mu F)_{c_max}$ – максимальное эффективное проходное сечение распылителя, м².

Эффективное проходное сечение канала, соединяющего управляющую полость со сливной полостью форсунки [18]:

$$(\mu F)_{z0} = \min \begin{cases} \mu_{z0} f_{z0}; \\ \mu_{zd} \pi d_{zd}(z_{i_max} - z_i); \\ 0,5 \mu_{dk} \pi z_u (d_{sp} + z_u \sin(0,5\alpha)) \sin(\alpha_u), \end{cases} \quad (9)$$

где μ_{z0} – коэффициент расхода для канала, соединяющего полость управления со сливной полостью; f_{z0} – площадь проходного сечения канала, соединяющего полость управления со сливной полостью, м²; μ_{zd} – коэффициент расхода для проходного сечения между хвостовиком плунжера и входным отверстием, расположенным перед каналом, соединяющего полость управления

со сливной полостью; d_{zd} – диаметр входного отверстия, м; μ_{dk} – коэффициент расхода для проходного сечения между поверхностями сферического запорного элемента и седла клапана; d_{sp} – диаметр сферического запорного элемента, м; α_u – угол конуса седла клапана, рад [7].

Эффективное проходное сечение неплотности управляющего клапана [9]:

$$(\mu F)_{utk} = \mu_{z0} f_{z0} \left(\frac{s}{100} \right), \quad (10)$$

где s – величина неплотности управляющего клапана [9], %.

Эффективное проходное сечение неплотности уплотнительного кольца

$$(\mu F)_{utu} = \mu F_{kz} \left(\frac{k}{100} \right), \quad (11)$$

где k – величина неплотности уплотнительного кольца – доля в процентном отношении эффективного проходного сечения неплотности уплотнительного кольца от эффективного проходного сечения канала, соединяющего промежуточную и управляющую полости, %.

Расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «направляющая часть иглы – корпус распылителя» [9]:

$$Q_{uti} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d_{ni} \delta_{zi}^3 (p_f - p_0)}{6 \nu \rho l_{ni}} + \pi d_{ni} \delta_{zi} C_i \right), \quad (12)$$

где d_{ni} – диаметр направляющей иглы, м; δ_{zi} – величина зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя», м; ν – кинематическая вязкость тестовой жидкости, м²/с; l_{ni} – длина сопряжения «направляющая часть иглы – корпус распылителя», м.

Расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «плунжер мультипликатора – втулка» [9]:

$$Q_{utp} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d_{np} \delta_{zp}^3 (p_z - p_0)}{6 \nu \rho l_{np}} - \pi d_{np} \delta_{zp} C_i \right), \quad (13)$$

где d_{np} – диаметр направляющей плунжера, м; δ_{zp} – величина зазора в сопряжении «плунжер мультипликатора – втулка», м; l_{np} – длина сопряжения «плунжер мультипликатора – втулка», м.

Сила, действующая на якорь электромагнита управляющего клапана, [16]:

$$F_{el} = \frac{(I_{el} w_{el})^2 \mu_0 \mu S_{ps}}{2(\delta_m - z_u)^2}, \quad (14)$$

где w_{el} – количество витков в обмотке электромагнита; μ_0 – магнитная постоянная, Гн·м⁻¹; μ – относительная магнитная проницаемость тестовой жидкости; S_{ps} – площадь сердечника с учётом отверстия для установки пружины, м²; δ_m – величина начального зазора между якорем и сердечником, м.

Цикловая подача тестовой жидкости ЭГФ находится по известной формуле

$$q_c = \int_0^T Q_c(t) dt, \quad (15)$$

где T – конечная точка интервала интегрирования при решении системы дифференциальных уравнений (1), с.

Средний общий расход тестовой жидкости из сливной полости ЭГФ в обратную линию [9]:

$$Q_0^{cp} = \frac{\int_0^T Q_0(t) dt + \int_T^{T_{per}} Q_0(T) dt}{T_{per}}, \quad (16)$$

где T_{per} – промежуток времени, соответствующий периоду следования управляющих импульсов, с.

Мгновенный общий расход тестовой жидкости из сливной полости ЭГФ в обратную линию

$$Q_0 = Q_{utk} + Q_{utp} + Q_{utu} + Q_{uti}. \quad (17)$$

При определении продолжительности запаздывания окончания впрыска t_{zov} было принято допущение о равенстве данного промежутка времени и продолжительности запаздывания окончания посадки иглы t_{zpi} , которая определялась как время, прошедшее от окончания электрического управляющего импульса до касания иглой нижнего упора [10].

Значение зазора в сопряжениях «плунжер мультипликатора – втулка», «направляющая часть иглы – корпус распылителя» варьировалось в диапазоне от 3 до 8 мкм с шагом 1 мкм. Значение неплотности управляющего клапана и уплотнительного кольца варьировалось в диапазоне от 0 до 20% с шагом 4% [7]. Давление тестовой жидкости на входе в аккумулятор изменялось в диапазоне от 30 до 150 МПа, с шагом 10 МПа. Значение продолжительности электрических управляющих импульсов при проведении вычислительных экспериментов не изменялось и было принято равным $t_{upr} = 700$ мкс.

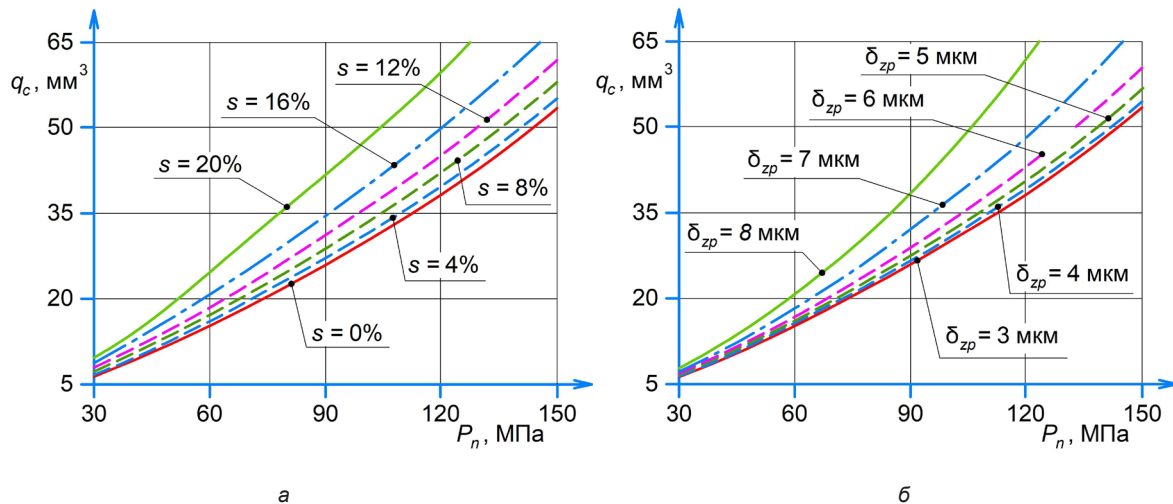


Рисунок 5 – Графики зависимостей цикловой подачи форсунки от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора»
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Relations between injector cyclic delivery and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: а – control valve leakage; б – clearance in bushing – multiplier plunger connection
Source: compiled by the authors.

В качестве расчётных были приняты параметры форсунки BOSCH 0445110293.

При решении системы дифференциальных уравнений (1) были заданы начальные условия: $C_i(0) = 0$; $z_i(0) = 0$; $P_f(0) = P_n$; $P_z(0) = P_n$; $P_k(0) = P_n$; $P_a(0) = P_n$; $C_u(0) = 0$; $z_u(0) = 0$ [7].

Расчёты проводились при помощи компьютерной математической системы Mathcad 15.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате многократного решения системы дифференциальных уравнений (1) при разных значениях рассмотренных структурных параметров и давлении тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор были получены временные зависимости основных фазовых переменных ЭГФ, при этом значения структурных параметров варьировались по отдельности. После дополнительных вычислений найдены значения диагностических параметров.

Было проведено сравнение значений диагностических параметров, приведённых в тест-плане фирмы BOSCH для рассмотренной ЭГФ и полученных расчётным путём при номинальных значениях структурных параметров и определённых сочетаниях давления на входе в аккумулятор и продолжительности управляющих импульсов, характерных для разных режимов работы силового агрегата и заданных в тест-плане. Результаты сравнения показали, что расчётные значения диагностических параметров находятся в допустимых пределах.

По полученным данным построены графики зависимостей диагностических параметров от давления тестовой жидкости при различных значениях структурных параметров.

На рисунке 5 приведены графики зависимостей цикловой подачи тестовой жидкости от давления жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора».

Из полученных результатов видно, что с увеличением давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор происходит возрастание цикловой подачи ЭГФ. С увеличением значений неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» темп роста цикловой подачи значительно возрастает. Следует отметить схожий характер полученных зависимостей $q_c = f(P_n)$ при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора», что не позволит определить, изменение какого из рассмотренных структурных параметров ЭГФ повлияло на увеличение цикловой подачи.

На рисунке 6 представлены графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора».

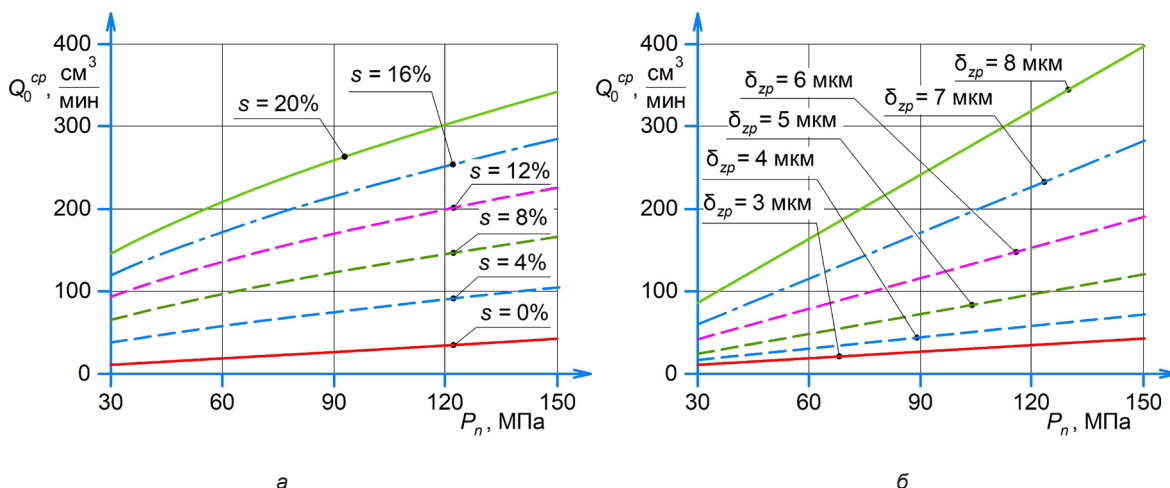


Рисунок 6 – Графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Relations between average return flow rate and inlet test fluid pressure for different values of: а – control valve leakage; б – clearance in the bushing – plunger connection.
 Source: compiled by the authors.

Из графиков (см. рисунок 6) видно, что с увеличением давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор средний расход в обратную линию возрастает. С увеличением значения неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» темп роста среднего расхода в обратную линию возрастает. Зависимость расхода $Q_0^{cp} = f(P_n)$ при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($s = 0\%$, $\delta_{zp} = 3$ мкм) практически линейная. При увеличении значения неплотности управ-

ляющего клапана возрастает нелинейность зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$. С увеличением зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» зависимости $Q_0^{cp} = f(P_n)$ остаются практически линейными во всем заданном диапазоне изменения величины зазора. Для уточнения характера полученных зависимостей были получены графики зависимостей производной среднего расхода по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях структурных параметров s и δ_{zp} (рисунок 7).

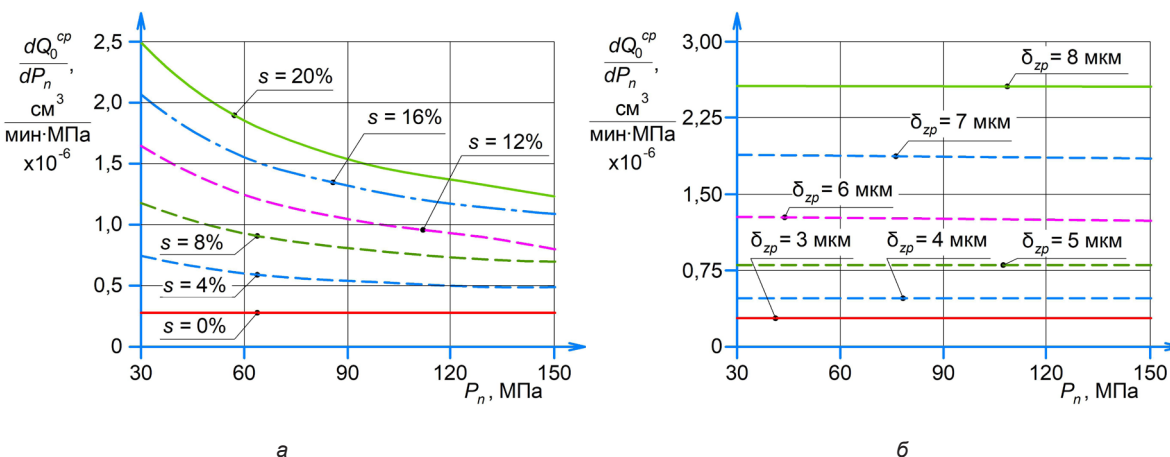


Рисунок 7 – Графики зависимостей производной среднего расхода в обратную линию по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Relations between average return flow rate derivative with respect to pressure and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: а – control valve leakage; б – clearance in the bushing – plunger interface.
 Source: compiled by the authors.

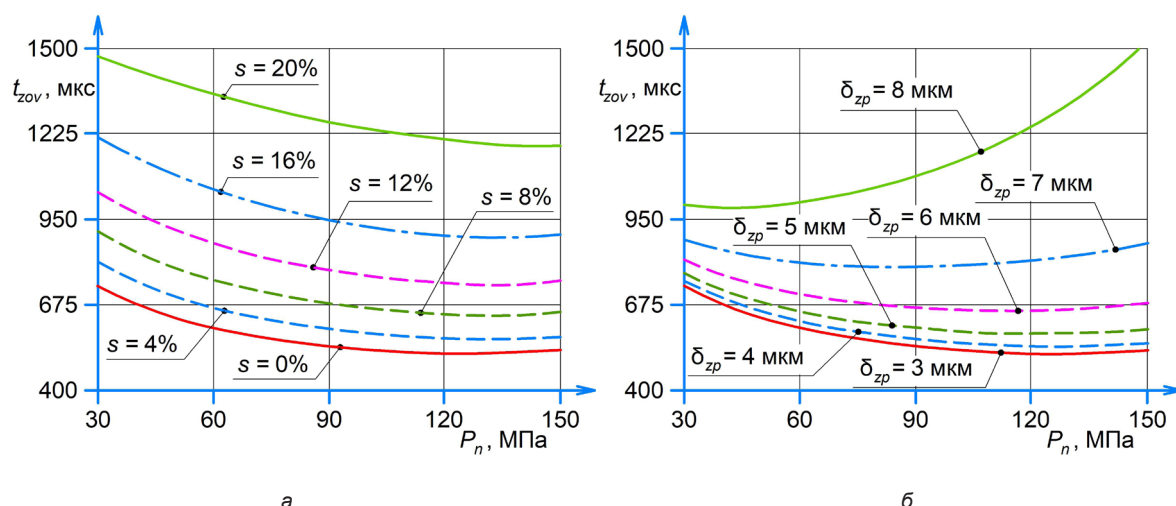


Рисунок 8 – Графики зависимостей запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях:
 а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Relations between injection end delay and accumulator inlet test fluid pressure for different values of:
 а – control valve leakage; б – clearance in the bushing – multiplier plunger connection
 Source: compiled by the authors.

Из полученных результатов видно, что при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($s = 0\%$, $\delta_{zp} = 3$ мкм) производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор является постоянной величиной и не зависит от значения давления P_n , что подтверждает линейность данной зависимости.

При увеличении значения неплотности управляющего клапана возрастает изменение значений производной в заданном диапазоне изменения давления P_n , что подтверждает наличие нелинейности зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$ и её нарастание по мере роста значения неплотности s . При всех заданных значениях зазора δ_{zp} производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления P_n практически не изменяется. Постоянство производной подтверждает линейность рассматриваемых зависимостей при всех заданных значениях зазора δ_{zp} . В данном случае линейность полученных при диагностировании зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является определяющим признаком, позволяющим различать наличие отклонений структурных параметров s и δ_{zp} при отклонении диагностического параметра Q_0^{cp} .

На рисунке 8 представлены графики зависимостей запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора».

Из полученных графиков (см. рисунок 8) видно, что зависимости продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор для всех значений неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» нелинейные. С увеличением давления P_n продолжительность t_{zov} сначала уменьшается, а затем возрастает. У полученных зависимостей $t_{zov} = f(P_n)$ имеются точки минимума, при этом по мере изменения значений структурных параметров s и δ_{zp} происходит изменение положения этих точек, т.е. изменяется давление P_n , при котором достигается минимальное значение функции $t_{zov} = f(P_n)$. Были получены графики зависимости давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор P_n^{\min} , соответствующего минимальному значению функции $t_{zov} = f(P_n)$, от величины неплотности управляющего клапана и от значения зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» (рисунок 9).

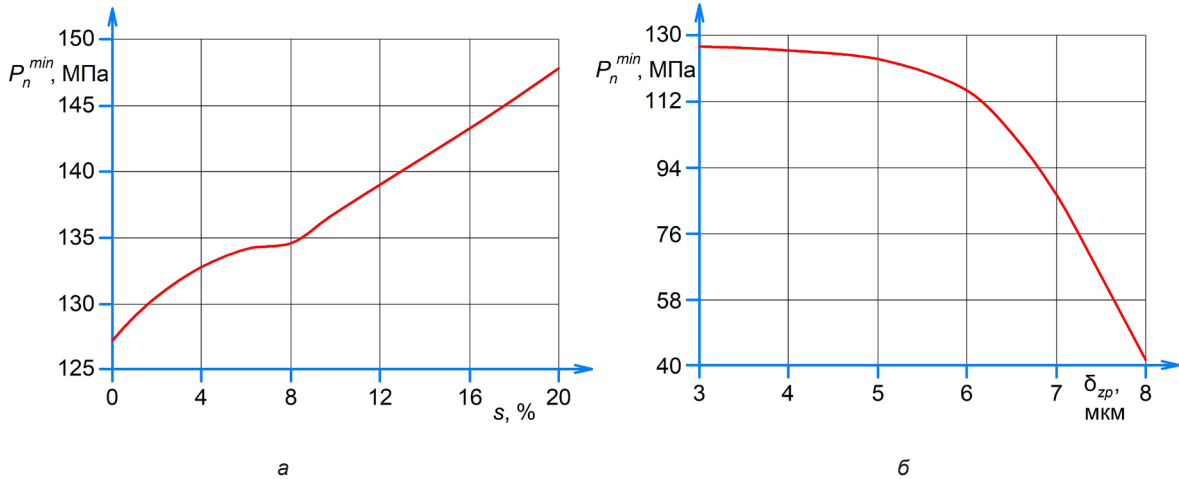


Рисунок 9 – Графики зависимостей давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор, соответствующего минимальному значению запаздывания окончания впрыска, от: а – величины неплотности управляющего клапана; б – значения зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Relations between accumulator inlet test fluid pressure, corresponding to the minimum value of injection end delay, and: a – control valve leakage value; b – clearance in bushing – multiplier plunger connection
 Source: compiled by the authors.

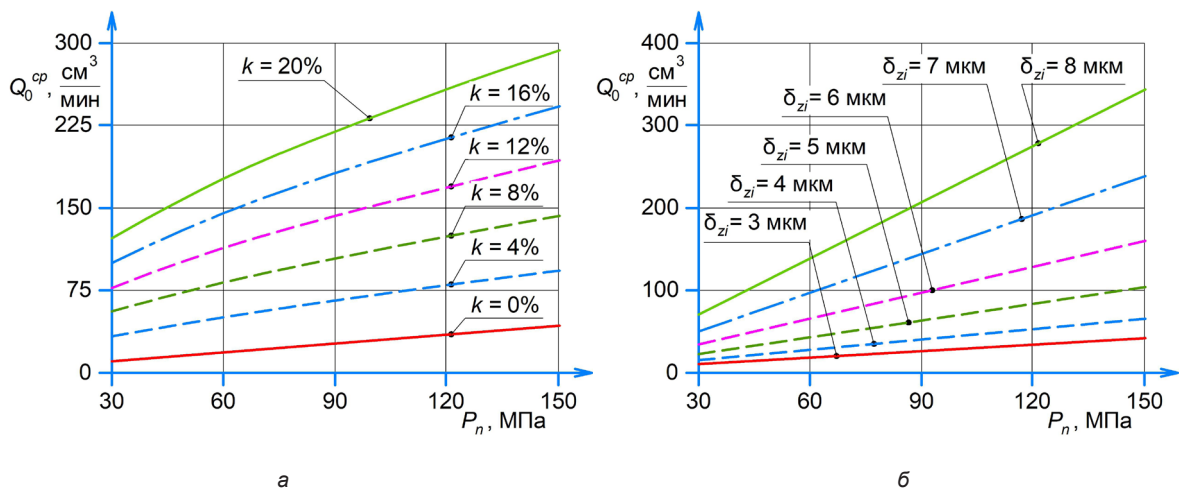


Рисунок 10 – Графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – величины неплотности уплотнительного кольца; б – зазора в сопряжении «корпус распылителя – направляющая часть иглы»
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Relations between average flow rate in the return line and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: a – sealing ring leakage; b – gap in body – needle guide part connection
 Source: compiled by the authors.

Из полученных результатов видно, что при увеличении значения неплотности управляющего клапана происходит возрастание, а при увеличении значения зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» – снижение давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор, при котором функция $t_{zov} = f(P_n)$ принимает минимальное значение. При наличии отклонения от номинального значения структурного параметра s значение давления P_n^{\min} больше, а при наличии отклонения параметра δ_{zp} – меньше значения давления $P_{n_nom}^{\min}$ при отсутствии отклонений данных структурных параметров. В данном случае знак отклонения фактического значения давления P_n^{\min} относительно его номинального значения $P_{n_nom}^{\min}$ может являться отличительным признаком, позволяющим определить, вариация какого именно структурного параметра s или δ_{zp} повлияла на изменение диагностического параметра t_{zov} .

Проведённые расчётные исследования показали, что изменение в заданных диапазонах структурных параметров: неплотности уплотнительного кольца и зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя» не оказывает влияние на характер зависимостей $q_c = f(P_n)$ и $t_{zov} = f(P_n)$.

На рисунке 10 представлены графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при разных значениях неплотности уплотнительного кольца и зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя».

Из графиков (см. рисунок 10) видно, что по мере роста давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор возрастает средний расход жидкости в обратную линию. При увеличении значения структурных параметров: k и δ_{zi} интенсивность возрастания расхода Q_0^{cp} растёт. Зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($k = 0\%$, $\delta_{zi} = 3$ мкм) практически линейная. При увеличении значения неплотности уплотнительного кольца возрастает нелинейность зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$. С увеличением зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя» зависимости $Q_0^{cp} = f(P_n)$ остаются практически линейными во всем заданном диапазоне изменения величины зазора. Для уточнения характера полученных зависимостей были получены графики зависимостей производной среднего расхода по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях структурных параметров k и δ_{zi} (рисунок 11).

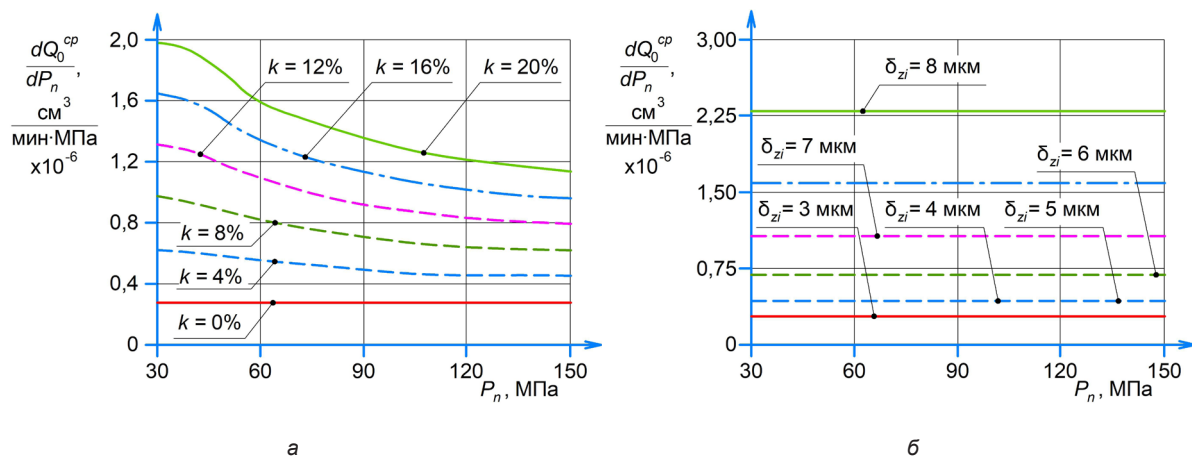


Рисунок 11 – Графики зависимостей производной среднего расхода в обратную линию по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в топливный аккумулятор при разных значениях: а – величины неплотности уплотнительного кольца; б – зазора в сопряжении «корпус распылителя – направляющая часть иглы»
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Relations between return line average flow rate derivative with respect to pressure and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: а – sealing ring leakage; б – gap in nozzle body – needle guide part connection
Source: compiled by the authors.

Из полученных результатов видно, что при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($k = 0\%$, $\delta_{zi} = 3$ мкм) производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления P_n является постоянной величиной, что подтверждает линейный характер данной зависимости.

При увеличении значения неплотности управляющего клапана нарастает изменение значения производной по мере роста давления P_n , что подтверждает наличие и возрастание нелинейности зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$. При всех заданных значениях зазора δ_{zi} производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления P_n практически не изменяется, это подтверждает линейность рассматриваемых зависимостей. В данном случае характер полученных при диагностировании зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является определяющим признаком, позволяющим различать наличие отклонений структурных параметров k и δ_{zi} при выявлении отклонения диагностического параметра Q_0^{cp} .

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований установлены и проанализированы зависимости цикловой подачи ЭГФ, среднего расхода тестовой жидкости в обратную линию, продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления в аккумуляторе при разных значениях рассмотренных структурных параметров. С увеличением давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при неизменной продолжительности управляющих импульсов возрастают цикловая подача и средний расход в обратную линию, изменяется продолжительность запаздывания окончания впрыска. Были выявлены отличия в характере зависимостей некоторых из рассмотренных диагностических параметров от давления P_n при наличии отклонения отдельных структурных параметров.

С увеличением значений неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штуцер – плунжер мультипликатора» интенсивность роста диагностических параметров q_c и Q_0^{cp} при увеличении давления P_n возрастает, при этом зависимости $q_c = f(P_n)$ имеют схожий характер. При наличии неплотности s зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ имеет нелинейный характер, при увеличенном зазоре δ_{zp} зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является практически линейной. По мере роста давления P_n происходит

изменение продолжительности запаздывания окончания впрыска. У зависимости $t_{zov} = f(P_n)$ имеется точка минимума, т.е. при определённом давлении тестовой жидкости P_n^{\min} параметр t_{zov} принимает наименьшее значение. При наличии неплотности s или увеличенном зазоре δ_{zp} происходит изменение значения давления P_n^{\min} относительно его начального значения P_n^{\min} при отсутствии отклонений данных структурных параметров. Наличие неплотности s приводит к возрастанию, а увеличенное значение зазора δ_{zp} – к снижению давления P_n^{\min} .

Структурные параметры k и δ_{zi} практически не оказывают влияние на характер зависимостей $q_c = f(P_n)$ и $t_{zov} = f(P_n)$. При наличии неплотности k зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ имеет нелинейный характер, при увеличенном зазоре δ_{zi} зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является практически линейной.

Анализ характера полученных при диагностировании ЭГФ на стенде зависимостей диагностических параметров от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор позволяет получить дополнительную информацию о техническом состоянии её отдельных компонентов, т.е. увеличить глубину поиска неисправностей.

Исходя из результатов исследований, можно предложить рациональную последовательность диагностирования ЭГФ на стенде: на первом этапе проводится определение и анализ значений диагностических параметров на режимах работы, предписанных тест-планом. В случае если значения диагностических параметров превышают допустимые $q_{c,D}$, $Q_0^{cp,D}$, то проводится второй этап диагностирования для выявления конкретных неисправностей. При реализации второго этапа диагностирования определяются и анализируются зависимости диагностических параметров от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при постоянной длительности управляющих импульсов. С учётом выявленных отклонений диагностических параметров на первом этапе диагностирования и характера полученных на втором этапе диагностирования зависимостей определяется наличие отклонения того или иного структурного параметра, т.е. конкретная неисправность. Блок-схема диагностического алгоритма показана на рисунке 12.

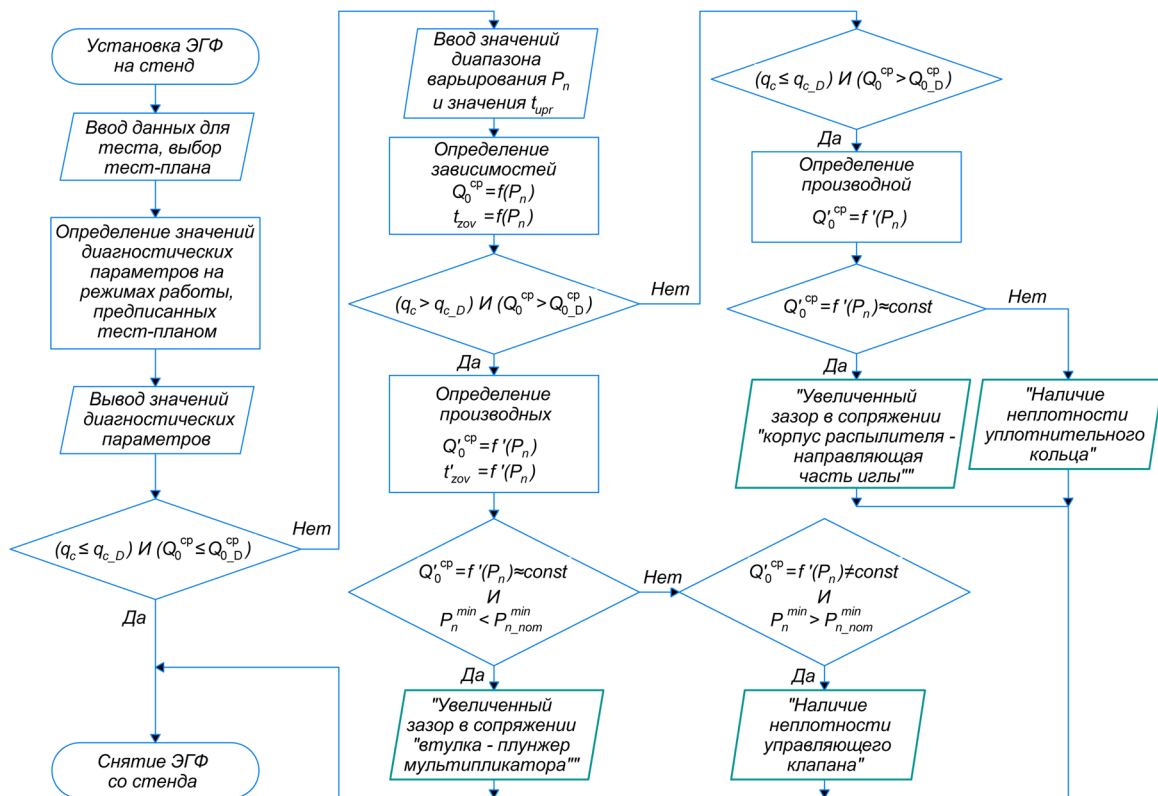


Рисунок 12 – Блок-схема диагностического алгоритма
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Diagnostic algorithm
Source: compiled by the authors.

Полученные во время исследований результаты свидетельствуют о возможности повышения глубины поиска неисправностей при стендовом диагностировании ЭГФ путём анализа характера зависимостей диагностических параметров от величины давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор стенда при постоянной длительности управляющих импульсов. Результаты подтверждают перспективность проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование методов и средств диагностирования ЭГФ с целью повышения глубины поиска неисправностей. При проведении дальнейших исследований целесообразно увеличить число рассматриваемых структурных параметров и оценить возможность локализации неисправностей при наличии отклонений одновременно нескольких структурных параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Krogerus T., Hyyönen M., Huhtala K. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Die-

sel Fuel Injection Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016; 138 (8): 1-11. DOI: 10.1115/1.4032417

2. Krogerus T., Huhtala K. Diagnostics and Identification of Injection Duration of Common Rail Diesel Injectors. *Open Engineering*. 2018; 8 (1): 1-6. давление в рампе DOI: 10.1515/eng-2018-0001

3. Kluczyk M., Grządziela A. Vibration diagnostics of common rail injectors. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2017; 16 (4): 177-184. DOI: 10.1080/20464177.2017.1387088

4. Jocanovic M. T., Karanovic V. V., Knezevic D. M., Orosnjak M. D. Diesel fuel filtration problems with modern common rail injection systems. *Military Technical Courier*. 2017; 65(4): 968-993.

5. Chomik Z., Lagowski P. The analysis of mechanical damage of Common Rail injectors. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019; 64 (1): 13-20.

6. Ignaciuk P., Gil L. Damages to injectors in diesel engines. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2014; 8 (21): 58-61. DOI: 10.12913/22998624.1091880

7. Журавский Б.В., Жигадло А.П. Диагностирование электрогидравлических форсунок силового агрегата автомобиля по изменению давления в топливном аккумуляторе в момент впрыска // Вест-

ник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2025. № 2(81). С. 71–85. EDN XHUNBI.

8. Payri F., Luján J., Guardiola C., Rizzoni G. Injection diagnosis through common-rail pressure measurement. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D-journal of Automobile Engineering*. 2006; 220 (3): 347-357. DOI: 10.1243/09544070JAU-TO34.

9. Журавский Б.В. Влияние структурных параметров электрогидравлической топливной форсунки дизельного двигателя на совокупность диагностических параметров // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2 (90). С. 230-247. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-230-247 EDN IAPLDF.

10. Журавский Б.В. Совершенствование диагностирования электрогидравлических форсунок дизельных двигателей с аккумуляторной системой впрыска топлива // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 3. С. 589–596. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-589-590 EDN HZPVBG.

11. Stoeck T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases. *Diagnostyka*. 2021; 22(3): 47-52. DOI: 10.29354/diag/135999

12. Stoeck T. Article citation info: Diagnostic method for a piezoelectric injector using the Newton-Cotes formula. *Combustion Engines*. 2024; 197(2): 106-111. DOI: 10.19206/CE-177132

13. Yakimov I.V., Krivtsov S.N., Potapov A.S., Svirbutovich O.A. Fuel flow and pressure in common return line as a diagnostic parameter of electro-hydraulic injectors technical state. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 632(1): 012058. DOI:10.1088/1757-899X/632/1/012058 EDN BAKKBH.

14. Song E., Ke Y., Yao C., Dong Q., Yang L. Fault Diagnosis Method for High-Pressure Common Rail Injector Based on IFOA-VMD and Hierarchical Dispersion Entropy. *Entropy (Basel)*. 2019; 21 (10): 1-20. DOI: 10.3390/e21100923

15. Неговора А.В., Козеев А.А., Габдрахимов М.М., Махиянов У.А. Модуль для поэтапного диагностирования топливоподающей системы дизелей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 3. С. 13–14.

16. Жигадло А.П., Макушев Ю.П. Теоретические исследования и техническое обслуживание форсунок с электрогидравлическим управлением // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, №6(88). С. 842–857. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857 EDN WWGTJJ.

17. Crăciun I., Dumitras C. Research on the Maintenance of Common-Rail Injectors. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine constructions Section*. 2022; 68: 124-136. DOI: 10.2478/bipcm-2022-0028

18. Абаляев А.Ю., Пигарина А.А. Математическая модель гидродинамических процессов в электрогидравлической форсунке // Двигателестроение. 2000. № 1. С. 13–14.

19. Григорьев А.Л., Прохоренко А.А., Рыкова И.В. Анализ устойчивости и сходимости числен-

ных методов интегрирования дифференциальных уравнений электрогидравлической форсунки дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. 2013. № 2. С. 3–8.

REFERENCES

1. Krogerus T., Hyvönen M., Huhtala K. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Diesel Fuel Injection Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016; 138 (8): 1-11. DOI: 10.1115/1.4032417

2. Krogerus T., Huhtala K. Diagnostics and Identification of Injection Duration of Common Rail Diesel Injectors. *Open Engineering*. 2018; 8 (1): 1-6. DOI: 10.1515/eng-2018-0001

3. Kluczyk M., Grządziela A. Vibration diagnostics of common rail injectors. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2017; 16 (4): 177-184. DOI: 10.1080/20464177.2017.1387088

4. Jocanovic M.T., Karanovic V.V., Knezevic D.M., Orosnjak M.D. Diesel fuel filtration problems with modern common rail injection systems. *Military Technical Courier*. 2017; 65(4): 968-993.

5. Chomik Z., Lagowski P. The analysis of mechanical damage of Common Rail injectors. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019; 64 (1): 13-20.

6. Ignaciuk P., Gil L. Damages to injectors in diesel engines. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2014; 8 (21): 58-61. DOI: 10.12913/22998624.1091880

7. Zhuravsky B.V., Zhigadlo A.P. Diagnosing electro-hydraulic injectors of a car power unit based on changes in pressure in the fuel accumulator at the time of injection. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (MADI)*. 2025; (2): 71-85. (In Russ.) EDN XHUNBI.

8. Payri F., Luján J., Guardiola C., Rizzoni G. Injection diagnosis through common-rail pressure measurement. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D-journal of Automobile Engineering*. 2006; 220 (3): 347-357. DOI: 10.1243/09544070JAU-TO34

9. Zhuravsky B.V. Influence of structural parameters of an electrohydraulic fuel injector of a diesel engine on a set of diagnostic parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (2): 230-247. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-230-247 EDN IAPLDF.

10. Zhuravsky B.V. Improving the diagnosis of electrohydraulic injectors of diesel engines with a battery fuel injection system. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2024; (3): C. 589-596. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-589-590 EDN HZPVBG.

11. Stoeck T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases. *Diagnostyka*. 2021; 22(3): 47-52. DOI: 10.29354/diag/135999

12. Stoeck T. Article citation info: Diagnostic method for a piezoelectric injector using the Newton-Cotes formula. *Combustion Engines*. 2024; 197(2): 106-111. DOI: 10.19206/CE-177132

13. Yakimov I.V., Krivtsov S.N., Potapov A.S., Svirbutovich O.A. Fuel flow and pressure in common return line as a diagnostic parameter of electro-hydraulic injectors technical state. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 632(1): 012058. DOI:10.1088/1757-899X/632/1/012058 EDN BAKKBH.

14. Song E., Ke Y., Yao C., Dong Q., Yang L. Fault Diagnosis Method for High-Pressure Common Rail Injector Based on IFOA-VMD and Hierarchical Dispersion Entropy. *Entropy (Basel)*. 2019; 21 (10): 1-20. DOI: 10.3390/e21100923

15. Negovora A.V., Kozeev A.A., Gabdrahimov M.M., Mahiyarov U.A. Module for element-by-element diagnostics of diesel fuel supply system. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva*. 2010; (3): 13-14. (In Russ.)

16. Zhigadlo A.P., Makushev Yu.P. Theoretical research and maintenance of electro hydraulically controlled injectors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 842-857. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857 EDN WWGTJJ.

17. Crăciun I., Dumitras C. Research on the Maintenance of Common-Rail Injectors. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine constructions Section*. 2022; 68: 124-136. DOI: 10.2478/bipcm-2022-0028

18. Abalyaev A.Yu., Pigarina A.A. Mathematical model of hydrodynamic processes in an electrohydraulic nozzle. *Dvigatellestroenie*. 2000; (1): 13-14. (In Russ.)

19. Grigor'ev A.L., Prohorenko A.A., Rykova I.V. Analysis of stability and convergence of numerical methods for integrating differential equations of an electrohydraulic diesel injector. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 2013; (2): 3-8. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Журавский Б.В. Вклад в работу заключается в общей организации, разработке методологии, проведении аналитических исследований.

Цехош С.И. Вклад в общую работу заключается в анализе, интерпретации и визуализации данных, валидации, подготовке и оформлении текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zhuravsky B.V. Contribution to the overall work includes the general organization of research, development of methodology, and conducting analytical research.

Tsekhosh S.I. Contribution to the overall work includes analysis, data interpretation and visualization, validation, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавский Борис Викторович – доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4516-2607>,

SPIN-код: 9160-2781,

e-mail: ra9meo@mail.ru

Цехош София Ивановна – канд. техн. наук, доц. Академического департамента (УИОТ) Тюменского государственного университета (625003, г. Тюмень, ул. Володарского, д.6).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-4173>,

SPIN-код: 3450-0029,

e-mail: sofia.tsekhosh@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhuravsky Boris V. – Associate Professor at the Automotive Transport Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4516-2607>,

SPIN-code: 9160-2781,

e-mail: ra9meo@mail.ru

Tsekhosh Sofia I. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor at the Academic Department (UIOT) of Tyumen State University (6, Volodarsky St., Tyumen, 625003).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-4173>,

SPIN-code: 3450-0029,

e-mail: sofia.tsekhosh@yandex.ru

Научная статья
УДК 62-835
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>
EDN: TLWSIM



МЕТОД БОРТОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПО СПЕКТРУ ТОКОВ СТАТОРА

Е.А. Двоеглазов^{1,2} ✉, О.А. Козелков¹, Ф.К. Дьяков³

¹Московский политехнический университет,
г. Москва, Россия

²ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»,
г. Москва, Россия

³Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
egor11022d@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Надёжность тягового электропривода является ключевым фактором, определяющим эксплуатационную эффективность городского электрического транспорта. Подшипниковые узлы электродвигателей остаются одной из самых частых причин отказов, приводящих к простоям транспортного средства.

Материалы и методы. Разработан метод бортовой диагностики дефектов подшипников качения тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) на основе анализа спектра токов статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA) с использованием эквивалентного действующего тока трёхфазной системы для нормализации диагностических признаков. Исследование проведено с помощью имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink, охватывающего диапазон угловых протяжённостей дефектов от 0° до 8° и скоростей от 1500 до 8000 об/мин.

Результаты. Предложенный метод устанавливает чёткие границы эффективности: максимальная скорость для надёжного обнаружения дефектов составляет 5000 об/мин. На этой и более низких скоростях в спектре тока статора наблюдается пик на механической частоте вращения ротора (f_r), амплитуда которого коррелирует с угловой протяжённостью дефекта. Нормализация по эквивалентному действующему току повышает точность диагностики.

Обсуждение и заключение. Предложенный метод позволяет внедрять систему бортовой диагностики без установки дополнительных датчиков, что особенно актуально для городских электробусов, эксплуатируемых преимущественно в диапазоне 2000–5000 об/мин. Разработан новый метод, впервые интегрирующий нормализацию по эквивалентному действующему току для количественной зависимости диагностической чувствительности анализа спектра тока статора от скорости вращения ротора в синхронном двигателе с постоянными магнитами и определяющий критический порог скорости 5000 об/мин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бортовая диагностика, тяговый электропривод, городской электротранспорт, подшипник качения, синхронный двигатель с постоянными магнитами, анализ спектра токов статора, спектральный анализ, математическое моделирование, момент сопротивления, предиктивное обслуживание, ток статора, механическая частота вращения ротора, эквивалентный действующий ток трёхфазной системы

Статья поступила в редакцию 20.01.2026; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Двоеглазов Е.А., Козелков О.А., Дьяков Ф.К., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Двоглазов Е.А., Козелков О.А., Дьяков Ф.К. Метод бортовой диагностики дефектов подшипников тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами по спектру токов статора // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 334-348. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>

EDN: TLWSIM

ON-BOARD DIAGNOSTICS METHOD FOR DETECTING BEARING DEFECTS IN TRACTION SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET MOTORS BASED ON STATOR CURRENT SPECTRUM

Egor A. Dvoeglazov^{1, 2} ✉, Oleg A. Kozelkov¹, Philip K. Dyakov³

¹Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia

²KAMAZ Innovation Center LLC,
Moscow, Russia

³Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
egor11022d@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The reliability of traction electric drive is a key factor determining the operational efficiency of urban electric transport. Bearing assemblies of electric motors remain one of the most common causes of failures leading to vehicle downtime.

Materials and methods. A method has been developed for on-board diagnostics of rolling bearing defects in a traction synchronous motor with permanent magnets (SDM) based on the analysis of stator current spectrum (MCSA) with equivalent three-phase current used to normalize diagnostic features. In the study simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment was carried out, covering the range of defect angular dimension from 0° to 8° and speeds from 1500 to 8000 rpm.

Results. The method proposed sets clear limits to efficiency: the maximum speed for reliable defect detection is 5,000 rpm. At these and lower speeds in the stator current spectrum, a peak is observed of the mechanical rotor speed (ω_r), the amplitude of which correlates with the defect angular dimension. Normalization by equivalent operating current increases diagnostic accuracy.

Discussion and conclusions. The proposed method makes it possible to implement an on-board diagnostic system without installing additional sensors, which is especially important for urban electric buses operating mainly in the range of 2000-5000 rpm. A new method has been developed that integrates normalization by equivalent operating current to quantify the diagnostic sensitivity of the analysis of the stator current spectrum depending on the rotor rotation speed in a permanent magnet synchronous motor and determines the critical speed threshold of 5000 rpm.

KEYWORDS: on-board diagnostics, traction electric drive, urban electric transport, rolling bearing, permanent magnet synchronous motor, stator current spectrum analysis, spectral analysis, mathematical modeling, moment of resistance, predictive maintenance, stator current, mechanical rotor speed, equivalent operating current of a three-phase system

The article was submitted: January 20, 2025; approved after reviewing: March 18, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Dvoeglazov E.A., Kozelkov O.A., Dyakov Ph.K. On-board diagnostics method for detecting bearing defects in traction synchronous permanent magnet motors based on stator current spectrum. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 334-348. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>

© Dvoeglazov Egor A., Kozelkov Oleg A., Dyakov Philip K., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность тягового электропривода является ключевым фактором, определяющим эксплуатационную эффективность городского электротранспорта [1]. Анализ статистики отказов показывает, что до 40% механических неисправностей вращающихся электрических машин связаны с повреждениями подшипниковых узлов [2]. Особенно актуальна эта проблема для городских электробусов, где частые пуски и торможения создают интенсивные циклические нагрузки на подшипники [3].

Как свидетельствуют данные ремонтной практики (рисунки 1, 2), развитие дефекта, начавшееся с микровыкрашивания, может привести к полному разрушению подшипника и выходу из строя всего тягового двигателя.

Традиционные методы диагностики – виброакустический анализ и ультразвуковая диагностика – требуют установки специализированных датчиков на корпус двигателя и, как правило, реализуются только в стационарных условиях [4, 5]. Это делает их неприменимыми для непрерывного мониторинга в процессе эксплуатации.

В этой связи перспективным является метод анализа спектра токов статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA). Он использует уже доступные в системе управления сигналы и не требует модификации конструкции привода [6].

Как показали исследования М. Блэда и соавт. [7], дефект подшипника вызывает периодические колебания момента сопротивления, приводящие к фазовой модуляции тока статора. В работах У.Т. Томсона, Р.Дж. Гилмора [8] и П.Дж. Тавнера [1] продемонстрирована возможность обнаружения подшипниковых дефектов по боковым гармоникам в спектре тока. Однако большинство исследований сосредоточено на асинхронных двигателях, тогда как современные городские электробусы всё чаще оснащаются синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) [9].

В последнее время наблюдается переход от реактивного обслуживания (ремонт после поломки) к стратегии предиктивного обслуживания (прогнозирование и управление состоянием, Prognostics and Health Management, PHM) [10], что повышает актуальность развития методов бортовой диагностики. В российских исследованиях также наблюдается рост интереса к бесконтактным методам. В.Л. Кодкин и соавт. показали, что спектральный состав тока ротора асинхронного двигателя

является показателем его эффективности [11], а М.М. Жилейкин и соавт. разработали алгоритмы для энергоэффективного управления тяговым приводом [12]. Аналогичные подходы с использованием нормализации остаточных гармоник токов для диагностики дефектов подтверждают эффективность в 90% случаев [13].

Несмотря на прогресс в диагностике электрических машин, для синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) остаются нерешёнными ключевые вопросы, связанные с анализом спектра токов статора:

1. Зависимость чувствительности диагностики от скорости вращения ротора, учитывая специфику проявления дефектов (пик на механической частоте f_r).

2. Количественная корреляция между угловой протяжённостью дефекта и амплитудой диагностических признаков при нормализации по эквивалентному действующему току.

3. Границы эффективности бортовой диагностики в реальных эксплуатационных условиях, включая влияние шума, нагрузки и критического порога скорости.

Цель настоящей работы – создать метод бортовой диагностики дефектов подшипников тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами на основе анализа спектра токов статора с интеграцией нормализации по эквивалентному действующему току для определения границ применимости и специфики диагностических признаков, с учётом эффективности подхода в реальных условиях эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанный метод основан на имитационном моделировании в среде MATLAB R2020b/Simulink с использованием блоков Simscape Electrical (библиотека для моделирования электрических систем) и Signal Processing Toolbox (инструментарий для обработки сигналов). Модель тягового привода представляет собой систему «синхронный двигатель с постоянными магнитами + инвертор + управляющий контур с векторным управлением по полю», как описано в работах М. Kumar и Е.А. Двоглазова [14, 15].

Параметры привода соответствуют типовому тяговому двигателю городского электробуса:

- номинальная мощность: 120 кВт;
- номинальная скорость: 5000 об/мин;
- число пар полюсов: $p = 5$;
- номинальный ток: 250 А.



Рисунок 1 – Разрез шестерни: выкрашивание (питтинг) на внутренней беговой дорожке, выполняющее роль внешнего кольца подшипника
 Источник: авторские фотографии, сделанные в рамках научно-исследовательской работы по диагностике тяговых электроприводов.

Figure 1 – Split gear: pitting on the inner treadmill acting as a bearing outer ring
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 2 – Разрушение тягового привода вследствие усталостного выкрашивания (питтинга) беговой дорожки, интегрированной в тело шестерни
 Источник: авторские фотографии, сделанные в рамках научно-исследовательской работы по диагностике тяговых электроприводов.

Figure 2 – Destruction of the traction drive due to fatigue pitting of the treadmill integrated into the gear body
 Source: compiled by the authors.

На основе указанных параметров разработана комплексная математическая модель, описывающая влияние дефектов подшипников на спектральные характеристики токов статора. Модель интегрирует механические и электромагнитные процессы в единую систему уравнений, с добавлением нормализации по эквивалентному действующему току трёхфазной системы для учета дисбаланса фаз

и вариаций нагрузки, что повышает устойчивость метода к внешним помехам.

Ключевым параметром модели является угловая протяженность дефекта α , которая задается как константа для каждого режима моделирования ($\alpha=0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$). При прохождении шарика подшипника через зону дефекта с угловой протяженностью α происходит локальное снижение несущей способности,

что приводит к периодическим возмущениям момента сопротивления.

Распределение радиальной нагрузки между шариками описывается выражением [15]:

$$P_{ri} = m \frac{R \cos \varphi}{z_T \sin \alpha}, \quad \frac{3\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2},$$

где P_{ri} – радиальная нагрузка на i -й шарик, воспринимающий нагрузку; m – коэффициент максимальной нагрузки; R – суммарная радиальная нагрузка; φ – угловая координата шарика, воспринимающего радиальную нагрузку; α – угол контакта; z_T – число тел качения, воспринимающих радиальную нагрузку.

Сила сопротивления качению определяется по формуле

$$P_{si} = K P_{ri},$$

где $K = 0,001$ – коэффициент сопротивлению качению.

Суммарный момент сопротивления на валу электродвигателя рассчитывается по формуле

$$M_s = \frac{d_0}{2} K \sum_{i=1}^{z_T} P_{ri},$$

где d_0 – диаметр кольца подшипника, на котором появился дефект.

Для синхронного двигателя с постоянными магнитами электромагнитные процессы описываются системой уравнений в координатах $d - q$:

$$\begin{cases} U_d = L_d \frac{dI_d}{dt} + R_s I_d - \omega_e L_q I_q \\ U_q = L_q \frac{dI_q}{dt} + \psi_f \omega_e + R_s I_q + \omega_e L_d I_d \end{cases},$$

где U_d, U_q – напряжения по осям d и q соответственно; I_d, I_q – токи статора по осям d и q ; R_s – активное сопротивление статора; L_d, L_q – индуктивности по осям d и q ; ψ_f – поток постоянных магнитов; ω_e – электрическая угловая скорость.

Электромагнитный момент определяется как

$$M_{эл} = \frac{3p}{2} (\psi_f \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q),$$

где $M_{эл}$ – электромагнитный момент; p – число пар полюсов двигателя.

Механическая скорость связана с электрическим соотношением

$$\omega = \frac{p \cdot n}{60},$$

где n – механическая скорость вращения в об/мин.

Эквивалентный действующий ток вводится как

$$I_{eff} = \sqrt{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)},$$

где I_a, I_b, I_c – мгновенные значения фазных токов. Это значение используется для нормализации амплитуды пика в спектре, что повышает устойчивость метода к вариациям нагрузки и шуму, аналогично подходам в [16, 17].

Угловая протяжённость дефекта α варьировалась от 0° (исправный) до 8° , что соответствует начальной ($1-2^\circ$), развитой ($3-5^\circ$) и поздней ($6-8^\circ$) стадиям усталостного разрушения.

Серия вычислительных экспериментов проведена при фиксированных скоростях вращения: 1500, 3000, 3700, 5000 и 8000 об/мин. На каждой скорости моделировались 5 состояний подшипника: $\alpha = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$. Серия экспериментов проведена на фиксированных скоростях вращения ротора: 1500, 3000, 3700, 5000 и 8000 об/мин. Для анализа токов статора применялся спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) с использованием окна Хэмминга для уменьшения эффекта растекания спектра. Длительность записи сигнала составляла 13 сек с частотой дискретизации 800 кГц. Сигнал фазного тока был предварительно отфильтрован с помощью аналогового фильтра Баттерворта нижних частот с полосой пропускания от 1 до 150 Гц, что позволило подавить высокочастотные помехи, обусловленные коммутацией инвертора, и выделить диагностические значимые низкочастотные компоненты, связанные с механическими дефектами подшипника.

Эффективность имитационного подхода подтверждена в работах:

А.В. Климова – виртуальное моделирование городских циклов [18];

Р.О. Максимова – виртуальные стендовые испытания для анализа совместимости подсистем [19];

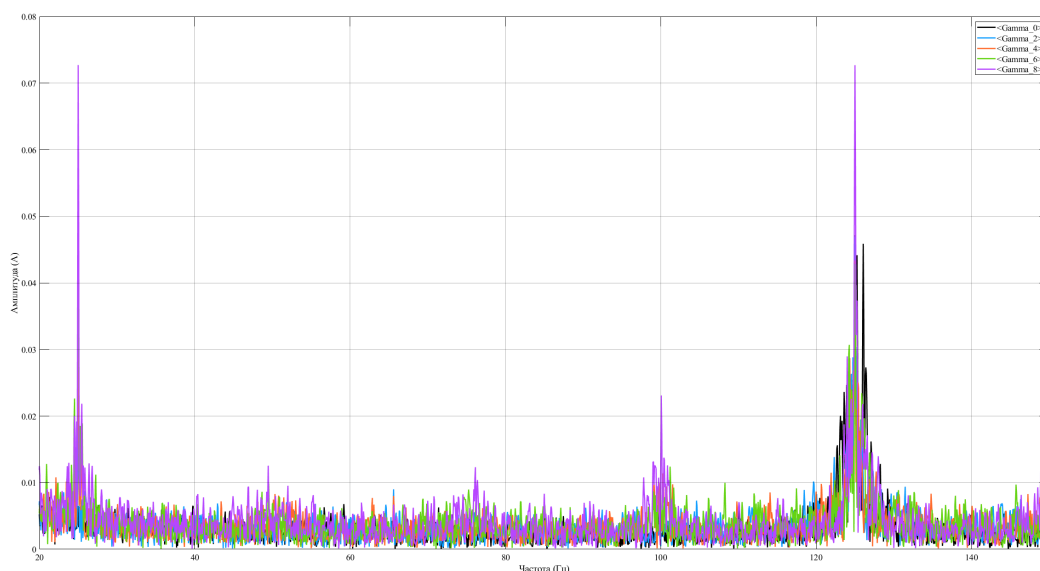
Qian D., Zhai X., Wei J. – технология распределенного моделирования сложных электро-механических систем электрических летательных аппаратов [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

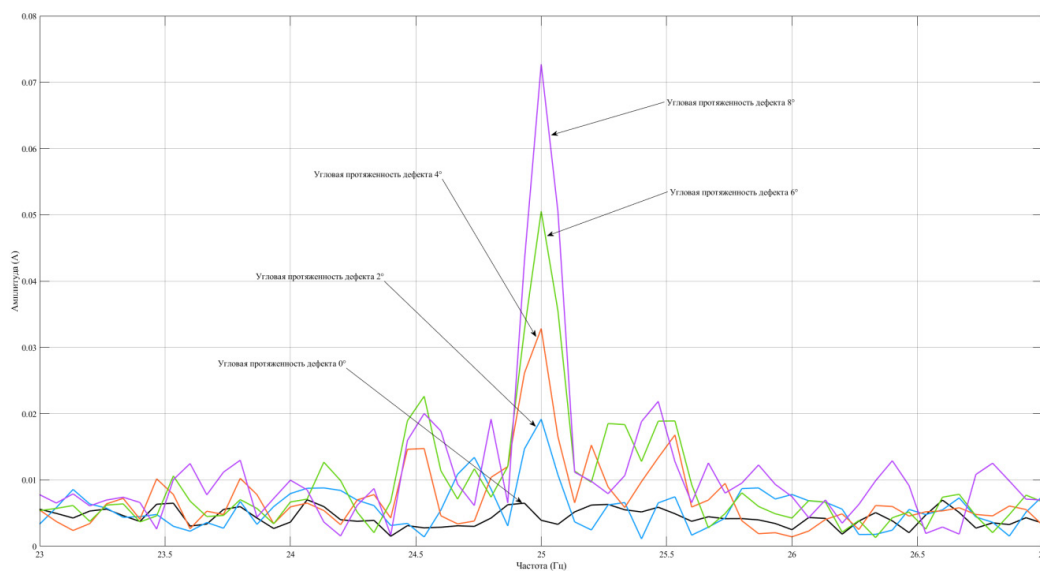
Результаты демонстрируют четкую частотную зависимость возникновения диагностических признаков дефектов подшипников. На

рисунке 3 представлен спектральный анализ тока статора при скорости вращения 1500 об/мин ($f_r = 25$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° . В полных спектрах (рисунк 3, а) четко наблюдается увеличение нормализованной амплитуды пика на механической частоте вращения ротора

с ростом угловой протяжённости дефекта. В увеличенной области спектра (рисунк 3, б) можно увидеть количественную зависимость: нормализованная амплитуда пика для дефекта 8° в 7,3 раза превышает амплитуду для исправного подшипника.



а



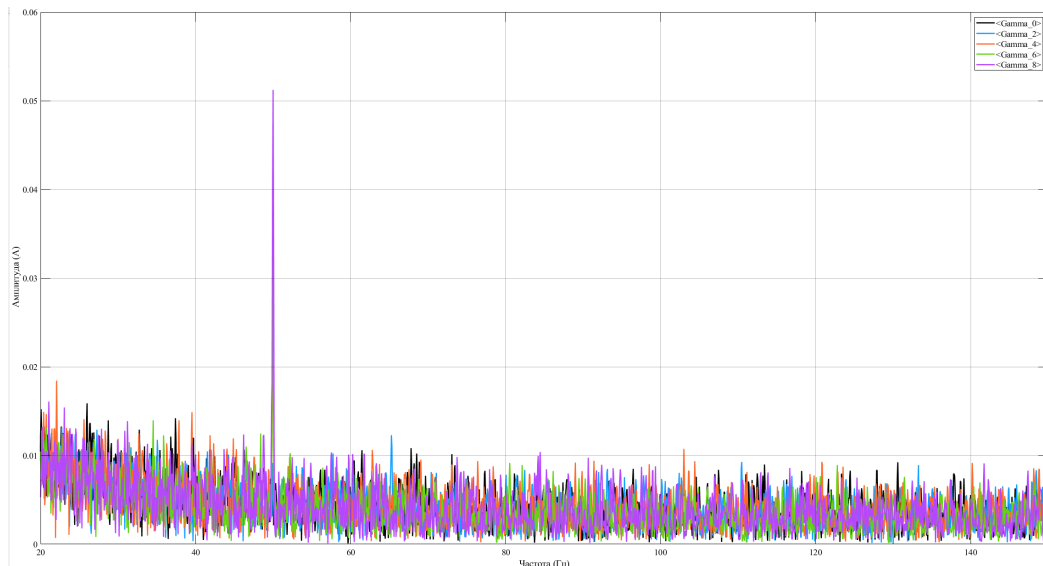
б

Рисунок 3 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 1500 об/мин ($f_r = 25$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :
а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц; б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
Источник: составлено авторами.

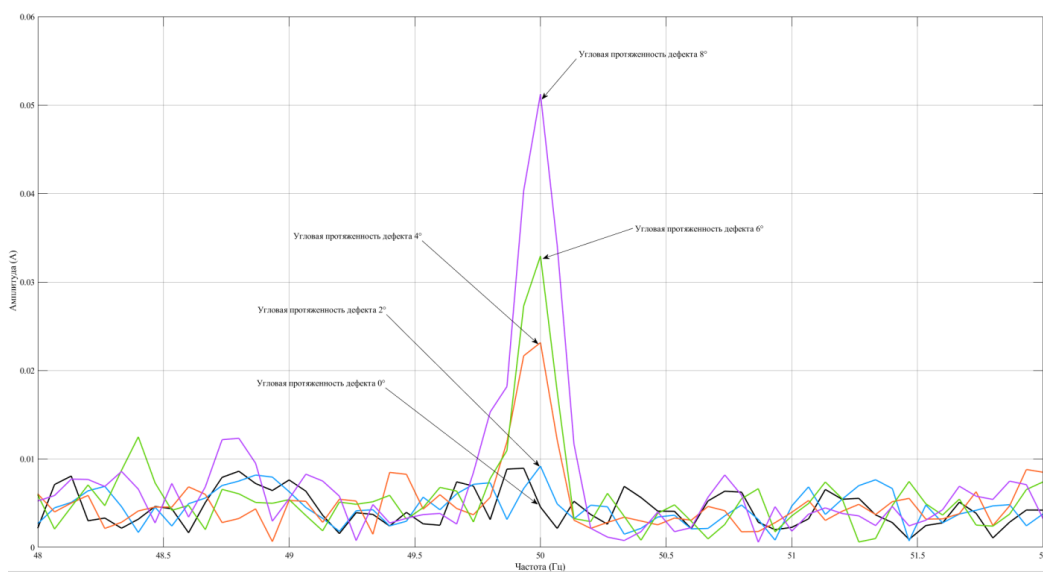
Figure 3 – Stator current spectral analysis at 1500 rpm ($f_r = 25$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8° .
(a) Full spectra in 0–150 Hz range. (b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
Source: compiled by the authors.

На рисунке 4 показаны результаты для скорости 3000 об/мин ($f_r = 50$ Гц). Здесь также наблюдается устойчивая корреляция между угловой протяжённостью дефекта и нормализованной амплитудой пика на частоте враще-

ния. Однако абсолютная амплитуда приращения сигнала меньше, чем при 1500 об/мин, что указывает на снижение диагностической чувствительности с ростом скорости.



а



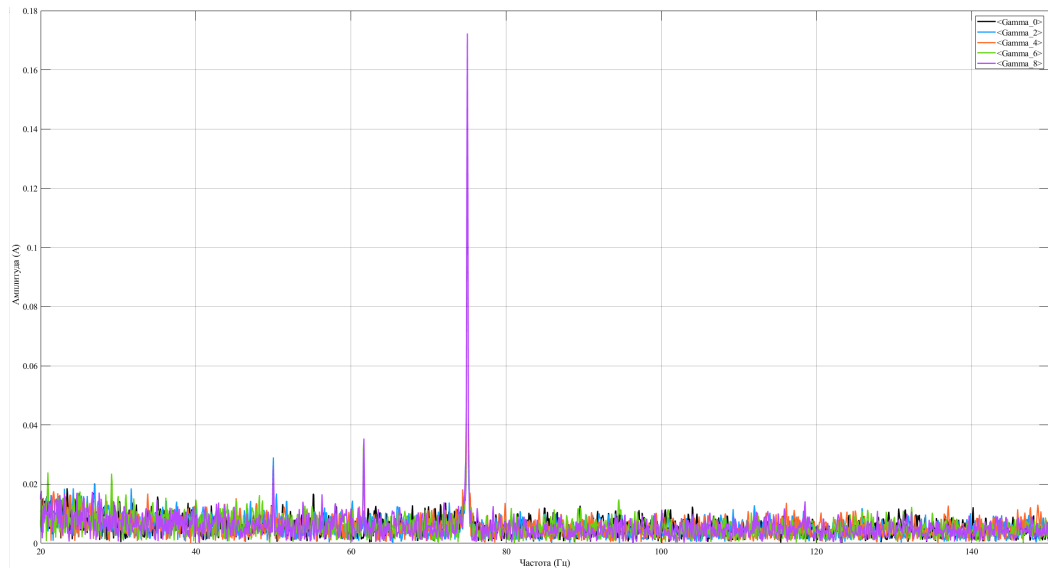
б

Рисунок 4 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 3000 об/мин ($f_r = 50$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :
 а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц;
 б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
 Источник: составлено авторами.

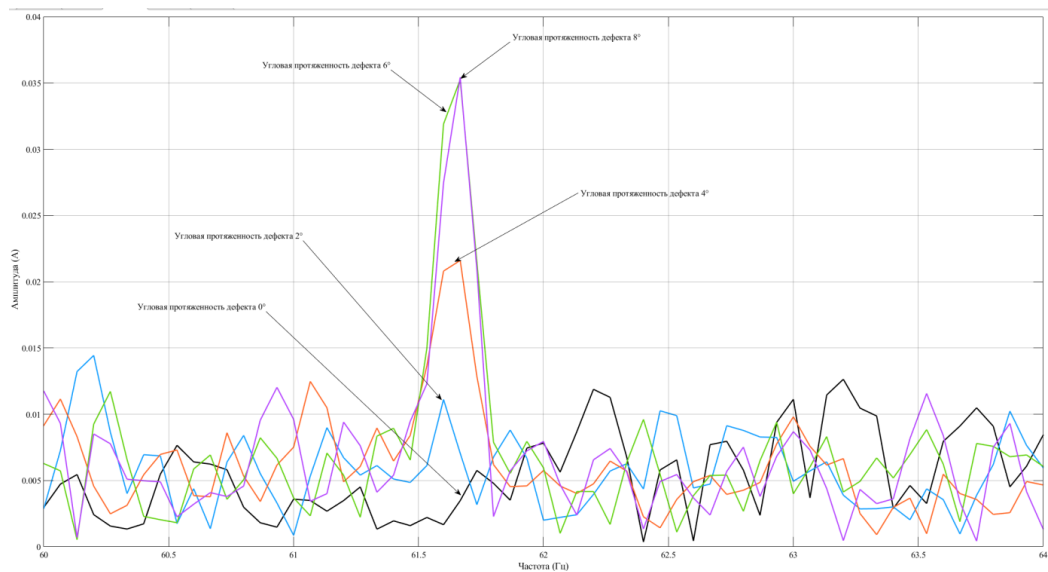
Figure 4 – Stator current spectral analysis at 3000 rpm ($f_r = 50$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8° .
 (a) Full spectra in 0–150 Hz range.
 (b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
 Source: compiled by the authors.

При анализе спектра на скорости 3700 об/мин ($f_r = 61,67$ Гц), как показано на рисунке 5, диагностика дефектов остаётся осуществимой: наблюдается корреляция между угловой протяжённостью дефекта и амплитудой пика,

с относительным увеличением для дефекта 8° в 2,8 раза по сравнению с исправным состоянием. Это подтверждает устойчивость метода в промежуточных режимах скорости.



а



б

Рисунок 5 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 3700 об/мин ($f_r = 61,67$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :

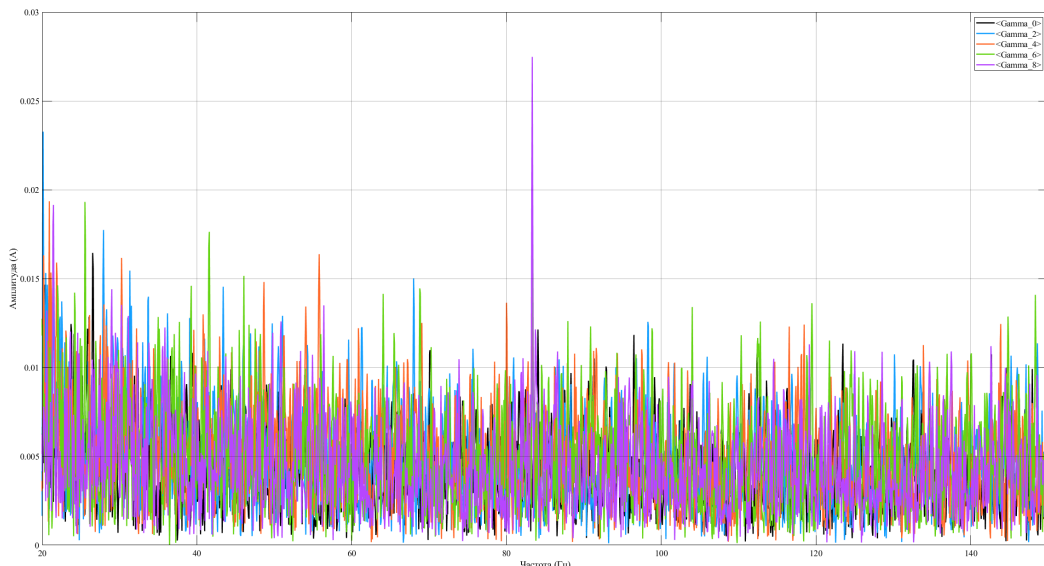
а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц;
б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Stator current spectral analysis at 3700 rpm ($f_r = 61.67$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° and 8° .

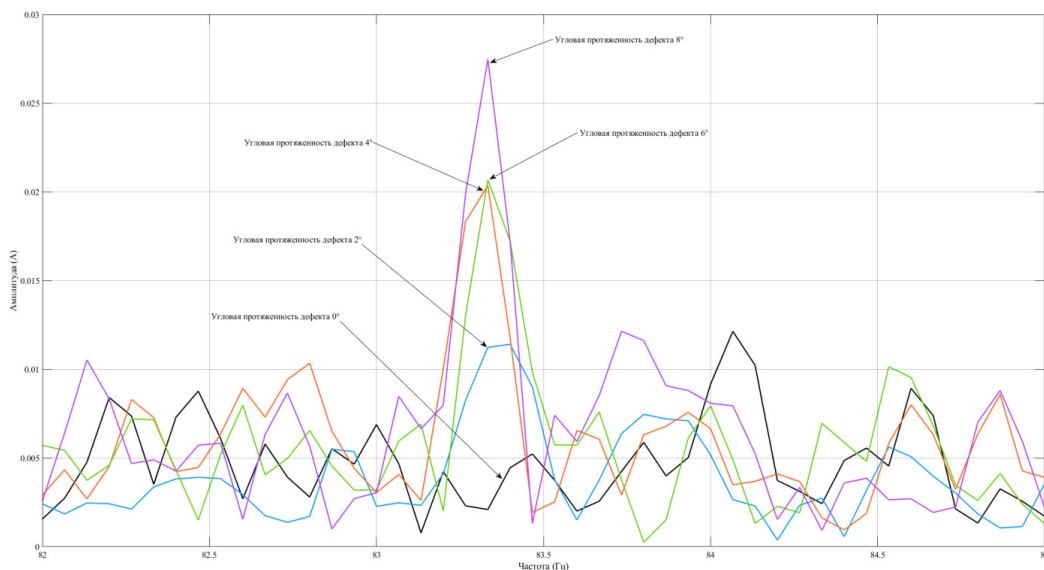
(a) Full spectra in 0–150 Hz range.
(b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
Source: compiled by the authors.

Критическая граница эффективности метода демонстрируется на рисунке 6, где представлены результаты при скорости 5000 об/мин ($f_r = 83,33$ Гц). Как видно из спектров, нормализованный пик на частоте вращения еще

можно идентифицировать, его относительная амплитуда для максимально исследованного дефекта (8°) в 7 раз превышает амплитуду исправного подшипника.



а



б

Рисунок 6 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 5000 об/мин ($f_r = 83,33$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :
 а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц;
 б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Stator current spectral analysis at 5000 rpm ($f_r = 83.33$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8° .
 (a) Full spectra in 0–150 Hz range.
 (b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
 Source: compiled by the authors.

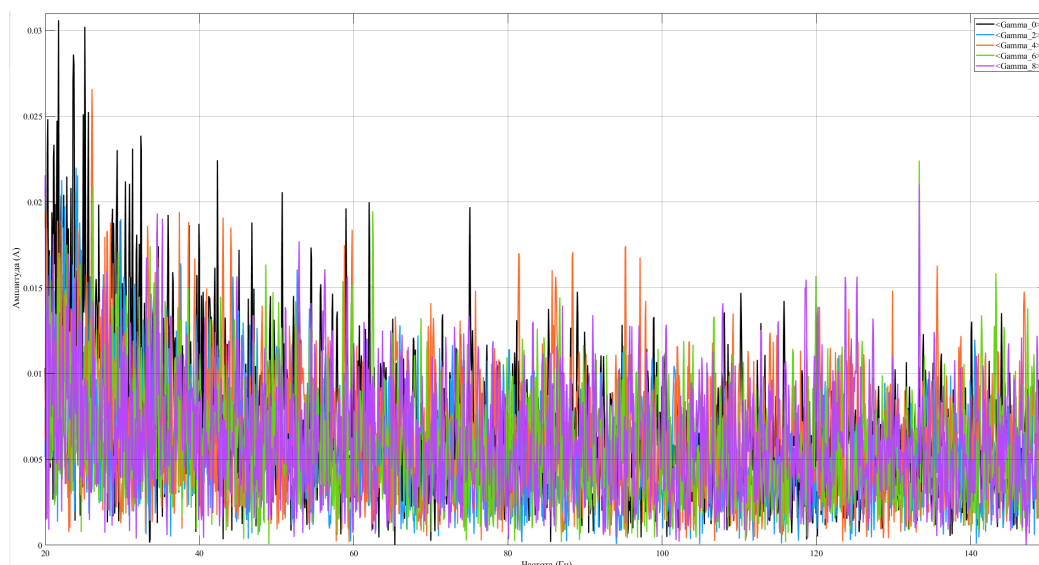


Рисунок 7 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 8000 об/мин ($f_r = 133,33$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8°
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Stator current spectral analysis at 8000 rpm ($f_r = 133.33$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8°
Source: compiled by the authors.

Полная потеря диагностической эффективности метода при высоких скоростях показана на рисунке 7, где представлен спектральный анализ при скорости 8000 об/мин ($f_r = 133,33$ Гц). В спектрах токов статора отсутствуют какие-либо диагностические признаки, позволяющие отличить дефектные подшипники от исправных. Спектральные характеристики всех режимов становятся статистически неразличимыми. Это согласуется с выводами Р.Б. Рэндалла и Дж. Антони [4]: при высоких скоростях отношение сигнал/шум падает, и дефект маскируется фоновым спектром.

Обнаруженная закономерность имеет физическое объяснение. На высоких скоростях вращения время контакта шарика подшипника с дефектом значительно сокращается. Инерционные эффекты меняются, и возмущения, вызываемые дефектом, не успевают сформировать выраженный низкочастотный компонент в спектре фазных токов, сравнимый по

амплитуде с шумами и другими гармониками системы управления [21, 22]. В отличие от классических подходов анализа спектра токов статора, где акцент на гармониках частоты прохождения шариков по наружной дорожке и частоты прохождения шариков по внутренней дорожке, в синхронном двигателе с постоянными магнитами с развитыми дефектами основной пик возникает именно на механической частоте вращения ротора (f_r) из-за сильной периодической модуляции момента сопротивления один раз за оборот. Нормализация по I_{eff} усиливает различимость признаков, повышая общую эффективность метода в низкочастотной области [23].

Установлено существование критического порога скорости более 5000 об/мин, из-за которого метод теряет диагностическую эффективность для данного типа дефектов, хотя в целевом диапазоне он показывает высокую надёжность.

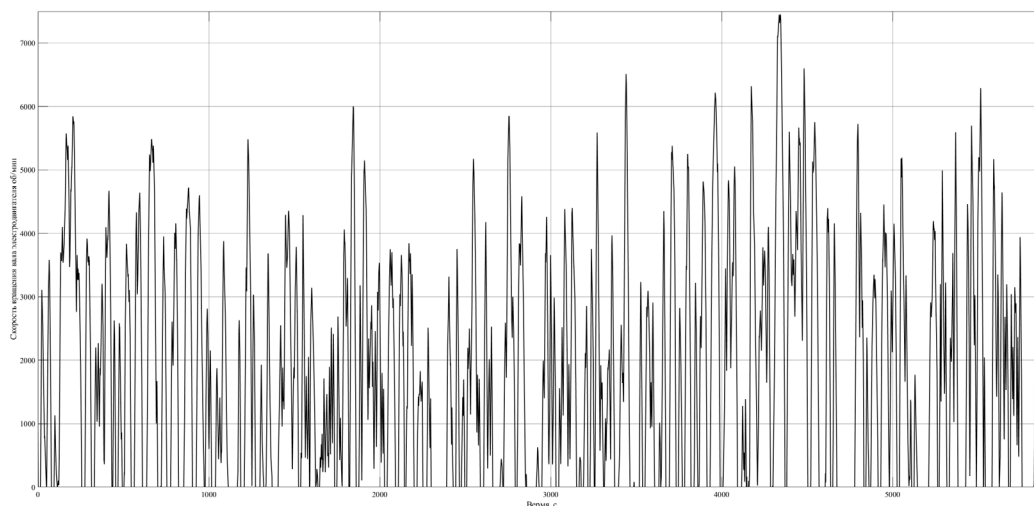


Рисунок 8 – Экспериментальные данные скорости вращения тягового электродвигателя городского электробуса большого класса, полученные в реальных условиях эксплуатации
Источник: данные, полученные авторами в ходе натурных испытаний.

Figure 8 – Experimental data on the rotational speed of a traction electric motor of a large-class urban electric bus obtained under real operating conditions.
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод эффективен до 5000 об/мин, что полностью покрывает городской цикл эксплуатации, где 95% времени движения приходится на диапазон 2000–5000 об/мин (рисунок 8).

Результаты согласуются с данными [2] о стадийности разрушения подшипников: на ранних стадиях дефект проявляется чётко, но на высоких скоростях его признаки маскируются. Специфика синхронного двигателя с постоянными магнитами заключается в том, что при развитых дефектах диагностический пик смещается на механическую частоту вращения ротора, а интеграция нормализации по эквивалентному действующему току делает метод более чувствительным к угловой протяжённости дефекта в низкочастотной области спектра аналогично подходам с использованием огибающей спектра [24].

Предложенный метод соответствует концепциям мехатронного проектирования [25] и стратегии прогнозирования и управления состоянием [10], с потенциалом интеграции с искусственным интеллектом для дальнейшего повышения точности [26, 27].

Сравнение с вибродиагностикой показывает, что последняя обладает большей чувствительностью, но требует стационарных условий и квалифицированного персонала. Разработанный метод анализа спектра токов статора

с нормализацией по I_{eff} , используя штатные датчики тока системы векторного управления по полю двигателем, обеспечивает возможность непрерывного мониторинга состояния подшипников непосредственно в процессе эксплуатации транспортного средства, что является ключевым преимуществом для городского электротранспорта [28, 29].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что разработанный метод наиболее эффективен в диапазоне скоростей до 5000 об/мин, что полностью соответствует городскому циклу эксплуатации электробусов, где основное время движения происходит при 2000–5000 об/мин. Как показано на рисунках 3, 4, 5, 6, в этом диапазоне скоростей метод обеспечивает надёжное обнаружение дефектов с угловой протяжённостью от 2° и позволяет оценивать степень развития дефекта по нормализованной амплитуде пика на механической частоте вращения ротора.

В ходе исследования были получены следующие основные результаты:

1. Разработана комплексная математическая модель влияния дефектов подшипниковых узлов на спектральные характеристики токов статора тягового электропривода при угловых протяженностях дефектов в диапазоне $0^\circ - 8^\circ$, с интеграцией нормализации по эквивалентному действующему току.

2. Установлены четкие границы эффективности разработанного метода для бортовой

диагностики: метод обеспечивает надежное обнаружение дефектов подшипников на скоростях до 5000 об/мин, что полностью соответствует городскому циклу движения электротранспорта. На рисунках 3, 4, 5, 6 наглядно продемонстрирована возможность диагностики в этом диапазоне скоростей, тогда как на рисунке 7 показана полная потеря диагностической способности при 8000 об/мин.

Выявлены и обоснованы диагностические признаки для оценки степени развития дефектов на основе анализа спектра токов статора с нормализацией по эквивалентному действующему току. Как видно из увеличенных областей спектров на рисунках 3,б – 6,б, нормализованная амплитуда пика на механической частоте вращения ротора коррелирует с угловой протяженностью дефекта, что отличает метод от фокуса на гармониках частоты прохождения шариков по наружной дорожке/частоты прохождения шариков по внутренней дорожке в асинхронных машинах.

Показаны преимущества бортовой диагностики по сравнению со стационарными методами контроля, включая отсутствие необходимости в дополнительных датчиках, возможность непрерывного мониторинга и адаптацию к режимам эксплуатации с учетом нормализации.

Полученные результаты имеют практическое значение для разработки адаптивных диагностических систем городского электротранспорта и могут служить основой для перехода от реактивного обслуживания к прогнозирующему подходу, что обеспечивает повышение функциональной надёжности тяговых электроприводов и снижение эксплуатационных затрат. Разработанный метод впервые количественно устанавливает зависимость диагностической чувствительности анализа спектра токов статора от скорости вращения ротора в синхронных двигателях с постоянными магнитами с использованием нормализации по эквивалентному действующему току и определяет критический порог скорости 5000 об/мин, с акцентом на пик на механической частоте вращения, подтверждая эффективность в сравнении с аналогичными работами [3, 16].

Для расширения функциональности возможна интеграция с системами распределения мощности между колёсами [30], что позволяет не только улучшить тягово-сцепные свойства, но и снизить динамические нагрузки на подшипники, тем самым замедляя развитие дефектов. Переход от диагностики к прогнози-

рованию остаточного ресурса требует применения подхода прогнозирования и управления состоянием, в частности 5S-методологии (Streamline, Smart Processing, Synchronize & See, Standardize, Sustain), которая обеспечивает связь между обнаружением дефекта и логистикой технического обслуживания, с потенциалом использования искусственного интеллекта для анализа спектров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tavner PJ. Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *IET Electric Power Applications*. 2008; 2(4): 215–247. DOI:10.1049/iet-epa:20070280
2. Khan MA, Asad B, Kudelina K, Vaimann T, Kallaste A. The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—The State of the Art. *Energies*. 2023; 16(1): 296. DOI: 10.3390/en16010296
3. Santer P, Reinhard J, Schindler A, Graichen K. Detection of localized bearing faults in PMSMs by means of envelope analysis and wavelet packet transform using motor speed and current signals. *Mechatronics*. 2025;106:103294. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2025.103294
4. Randall RB, Antoni J. Rolling element bearing diagnostics – a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011;25(2):485–520. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.017
5. He X, Liu X, Lin C, Fu M, Wang J, Zhang J. Early bearing fault diagnosis in PMSMs based on HO-VMD and weighted evidence fusion of current–vibration signals. *Sensors*. 2025;25(15):4591. DOI: 10.3390/s25154591
6. Janrao S, Ambekar R. Fault diagnosis of an induction motor using motor current signature analysis. *Int J Appl Eng Res*. 2018; 13(12): 11002–11008.
7. Blödt M, Granjon P, Raison B, Rostaing G. Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008; 55(4): 1813–1822. DOI: 10.1109/TIE.2008.917108
8. Thomson WT, Gilmore RJ. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives. In: *Proceedings of the 32nd Turbomachinery Symposium*; 2003. p. 145–156.
9. Ghorbel A, Eddai S, Limam B, Feki N, Haddar M. Bearing fault diagnosis based on artificial intelligence methods: machine learning and deep learning. *Arab J Sci Eng*. 2025;50:13605–13622. DOI: 10.1007/s13369-024-09488-3
10. Lee J, Wu F, Zhao W, Ghaffari M, Liao L, Siegel D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014;42:314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004
11. Кодкин В.Л., Аникин А.С., Балденков А.А. Спектральный состав тока ротора асинхронного двигателя – показатель его эффективности // Омский научный вестник. 2019; (5): 39–45. DOI:10.25206/1813-8225-2019-167-39-45

12. Жилейкин М.М., Климов А.В., Масленников И.К. Алгоритм формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающий энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса // Известия МГТУ «МАМИ». 2022; 16(1): 51–60. DOI:10.17816/2074-0530-100232
13. Allal A, Khechekhouche A. Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022; 141: 108219. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108219
14. Kumar M, Deosarkar P, Inamdar S, Mahanty RN. Field oriented control of traction PMSM drive using WBG devices for EV application. In: *Proceedings of the 2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*; 2023; Bhopal, India. p. 1-8. DOI: 10.1109/RESEM57584.2023.10236344
15. Двоглазов Е.А., Жилейкин М.М., Оспанбеков Б.К., Климов А.В. Диагностирование выкрашивания материала на беговой дорожке кольца подшипника синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Грузовик. 2023; (8): 25–30. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-8-25-30
16. Hosseini N, Toshani H, Abdi S, Sharifzadeh S. Enhanced Bearing Fault Detection in Induction Motors Using Projection-Based SVM. *IEEE Trans Ind Appl*. 2025; PP: 1-13. DOI: 10.1109/TIA.2025.3536425
17. Min TH, Lee JH, Choi BK. CNN-based fault classification in induction motors using feature vector images of symmetrical components. *Electronics*. 2025; 14(8): 1679. DOI: 10.3390/electronics14081679
18. Климов А.В. Исследование методов повышения энергоэффективности с учётом режимов работы тягового электропривода методами виртуального математического моделирования // Тракторы и сельхозмашины. 2024; 91(1): 65–74. DOI: 10.17816/0321-4443-56920
19. Максимов Р.О. Методика проведения виртуальных стендовых испытаний для анализа совместности технических характеристик систем транспортного средства для выявления и предотвращения возможностей возникновения резонансных явлений в подрессоренной кабине // Известия МГТУ «МАМИ». 2023; 17(4): 387–400. DOI: 10.17816/2074-0530-456459
20. Qian D, Zhai X, Wei J. Modeling and Simulation of Complex Electromechanical System of More-Electric Aircraft Based on Distributed Simulation Technology. In: *2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*; 2023; Nanjing, China. Piscataway (NJ): IEEE; 2023. p. 868-873. DOI:10.1109/ICoPESA56898.2023.10141103
21. Zhang B, Li H, Kong W, Ma J. Early-stage fault diagnosis of motor bearing based on kurtosis weighting and fusion of current–vibration signals. *Sensors (Basel)*. 2024; 24(11): 3373. DOI: 10.3390/s24113373
22. Ye X, Li G. An intelligent fault diagnosis method for rolling bearing using motor stator current signals. *Meas Sci Technol*. 2024; 35(8): 086131. DOI: 10.1088/1361-6501/ad4bfc
23. Mohanty AR, Kar C. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. *Mech Syst Signal Process*. 2006; 20(1): 158-187. DOI: 10.1016/j.ymssp.2004.07.006
24. De las Morenas J, Belmonte LM, Morales R. Streamlined bearing fault detection using artificial intelligence in permanent magnet synchronous motors. *Machines*. 2025; 13(5): 357. DOI: 10.3390/machines13050357
25. Белоусов Б.Н., Келлер А.В., Харитончик С.В., Бахмутов С.В., Бердников А.А. Проблемы прикладной механики при создании тягово-транспортных средств с мехатронными модулями // Автомобильная промышленность. 2020; (1): 8–16.
26. Raouf I, Kumar P, Kim HS. Deep learning-based fault diagnosis of servo motor bearing using the attention-guided feature aggregation network. *Expert Syst Appl*. 2024; 258: 125137. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125137
27. Li D, Wang W, Dong C, Fang T. Motor bearing fault diagnosis based on FFT-CNN-Transformer modeling. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Computer, Artificial Intelligence and Control Engineering*; 2025 Jan 10-12; Hefei, China. p. 615-621. DOI: 10.1145/3727648.3727748
28. Kumar MP, Velpula S, Saiprakash C, Sahoo B. Advancements in fault detection and diagnosis methods for electric vehicles: a review. *Discov Appl Sci*. 2025; 7: 1235. DOI: 10.1007/s42452-025-07758-9
29. Zsuga A, Dineva A. Data-driven onboard inter-turn short circuit fault diagnosis for electric vehicles by using real-time simulation environment. *IEEE Access*. 2023; 11: 145447-145466. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3344483
30. Келлер А.В., Попов А.В. Методика синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных автомобилей сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2023; 90(6): 505–514. DOI: 10.17816/0321-4443-568209

REFERENCES

1. Tavner PJ. Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *IET Electric Power Applications*. 2008;2(4):215-247. DOI: 10.1049/iet-epa:20070280
2. Khan MA, Asad B, Kudelina K, Vaimann T, Kallaste A. The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—*The State of the Art*. *Energies*. 2023; 16(1): 296. DOI: 10.3390/en16010296
3. Santer P, Reinhard J, Schindler A, Graichen K. Detection of localized bearing faults in PMSMs by means of envelope analysis and wavelet packet transform using motor speed and current signals. *Mechatronics*. 2025; 106: 103294. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2025.103294
4. Randall RB, Antoni J. Rolling element bearing diagnostics – a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011; 25(2): 485-520. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.017
5. He X, Liu X, Lin C, Fu M, Wang J, Zhang J. Early bearing fault diagnosis in PMSMs based on HO-VMD and weighted evidence fusion of current–vibration signals. *Sensors*. 2025; 25(15): 4591. DOI: 10.3390/s25154591

6. Janrao S, Ambekar R. Fault diagnosis of an induction motor using motor current signature analysis. *Int J Appl Eng Res*. 2018;13(12):11002-11008.
7. Blödt M, Granjon P, Raison B, Rostaing G. Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008; 55(4): 1813-1822. DOI: 10.1109/TIE.2008.9171108
8. Thomson WT, Gilmore RJ. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives. Proceedings of the 32nd Turbomachinery Symposium. 2003: 145-156.
9. Ghorbel A, Eddai S, Limam B, Feki N, Haddar M. Bearing fault diagnosis based on artificial intelligence methods: machine learning and deep learning. *Arab J Sci Eng*. 2025; 50: 13605-13622. DOI: 10.1007/s13369-024-09488-3
10. Lee J, Wu F, Zhao W, Ghaffari M, Liao L, Siegel D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014; 42: 314-334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004
11. Kodkin VL, Anikin AS, Baldenkov AA. Spectral composition of induction motor rotor current as an indicator of its efficiency. *Omsk Scientific Bulletin*. 2019; (5): 39-45. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-39-45 (In Russ.)
12. Zhileikin MM, Klimov AV, Maslennikov IK. Algorithm for generating accelerator pedal control signal providing energy-efficient power consumption of electric bus traction drive. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2022; 16(1): 51-60. DOI:10.17816/2074-0530-100232 (In Russ.)
13. Allal A, Khechekhouche A. Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022; 141: 108219. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108219
14. Kumar M, Deosarkar P, Inamdar S, Mahanty RN. Field oriented control of traction PMSM drive using WBG devices for EV application. In: Proceedings of the 2023 *IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*; 2023; Bhopal, India. p. 1-8. DOI: 10.1109/RESEM57584.2023.10236344
15. Dvoeglazov EA, Zhileikin MM, Ospanbekov BK, Klimov AV. Diagnosis of material spalling on the bearing ring raceway of a permanent magnet synchronous electric motor. *Gruzovik*. 2023; (8): 25-30. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-8-25-30 (In Russ.)
16. Ruiz-Sarrio JE, Antonino-Daviu JA, Martis C. Localized bearing fault analysis for different induction machine start-up modes via vibration time–frequency envelope spectrum. *Sensors*. 2024; 24(21): 6935. DOI: 10.3390/s24216935
17. Min TH, Lee JH, Choi BK. CNN-based fault classification in induction motors using feature vector images of symmetrical components. *Electronics*. 2025; 14(8): 1679. DOI: 10.3390/electronics14081679
18. Klimov AV. Investigation of methods for improving energy efficiency considering operating modes of traction electric drive using virtual mathematical modeling. *Traktory i Selkhoz mashiny*. 2024; 91(1): 65-74. DOI: 10.17816/0321-4443-569208 (In Russ.)
19. Maksimov RO. Methodology of virtual bench testing for analysis of compatibility of vehicle system technical characteristics to detect and prevent resonance phenomena in the sprung cabin. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023; 17(4): 387-400. DOI: 10.17816/2074-0530-456459 (In Russ.)
20. Qian D, Zhai X, Wei J. Modeling and Simulation of Complex Electromechanical System of More-Electric Aircraft Based on Distributed Simulation Technology. In: 2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA); 2023; Nanjing, China. Piscataway (NJ): IEEE; 2023. p. 868-873. DOI: 10.1109/ICoPESA56898.2023.10141103
21. Zhang B, Li H, Kong W, Ma J. Early-stage fault diagnosis of motor bearing based on kurtosis weighting and fusion of current–vibration signals. *Sensors (Basel)*. 2024; 24(11): 3373. DOI: 10.3390/s24113373
22. Ye X, Li G. An intelligent fault diagnosis method for rolling bearing using motor stator current signals. *Meas Sci Technol*. 2024; 35(8): 086131. DOI: 10.1088/1361-6501/ad4bfc
23. Mohanty AR, Kar C. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. *Mech Syst Signal Process*. 2006; 20(1): 158-187. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.02.015
24. de las Morenas J, Belmonte LM, Morales R. Streamlined bearing fault detection using artificial intelligence in permanent magnet synchronous motors. *Machines*. 2025; 13(5): 357. DOI: 10.3390/machines13050357
25. Belousov BN, Keller AV, Kharitonchik SV, Bakhmutov SV, Berdnikov AA. Problems of applied mechanics in the development of traction and transport vehicles with mechatronic modules. *Avtomobilnaya Promyshlennost*. 2020; (1): 8-16. (In Russ.)
26. Raouf I, Kumar P, Kim HS. Deep learning-based fault diagnosis of servo motor bearing using the attention-guided feature aggregation network. *Expert Syst Appl*. 2024; 258: 125137. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125137
27. Li D, Wang W, Dong C, Fang T. Motor bearing fault diagnosis based on FFT-CNN-Transformer modeling. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer, Artificial Intelligence and Control Engineering; 2025 Jan 10-12; Hefei, China. p. 615-621. DOI: 10.1145/3727648.3727748
28. Kumar MP, Velpula S, Saiprakash C, et al. Advancements in fault detection and diagnosis methods for electric vehicles: a review. *Discov Appl Sci*. 2025; 7: 1235. DOI: 10.1007/s42452-025-07758-9
29. Zsuga A, Dineva A. Data-driven onboard inter-turn short circuit fault diagnosis for electric vehicles by using real-time simulation environment. *IEEE Access*. 2023; 11: 145447-145466. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3344483
30. Keller AV, Popov AV. Methodology for synthesizing power distribution patterns between driving wheels of all-wheel drive agricultural vehicles. *Traktory i Selkhoz mashiny*. 2023; 90(6): 505-514. DOI:10.17816/0321-4443-568209 (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Двоеглазов Е.А. Разработал математическую модель, провел имитационное моделирование в MATLAB/Simulink, проанализировал результаты экспериментов, подготовил текст статьи.

Козелков О.А. Сформулировал научную проблему, проанализировал теоретические аспекты, участвовал в обсуждении результатов, внес вклад в редактирование статьи.

Дьяков Ф.К. Провел экспертную оценку результатов, внес вклад в редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dvoeglazov E.A. Developed the mathematical model, performed simulation modeling in MATLAB/Simulink, analyzed experimental results, prepared the manuscript.

Kozelkov O.A. Formulated the scientific problem, analyzed theoretical aspects, participated in discussion of the results.

Dyakov Ph.K. Provided expert evaluation of results, contributed to manuscript editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Двоеглазов Егор Александрович – аспирант Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38), ведущий инженер-программист службы электрифицированных автомобилей ООО «Инновационный центр «КАМАЗ» (121205, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, Большой бульвар, д. 62).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0930-4737>,

SPIN-код: 8538-2559,

e-mail: egor11022d@yandex.ru

Козелков Олег Александрович – д-р техн. наук, проф. Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4163-3721>,

SPIN-код: 8140-1200,

e-mail: kozolkow@mail.ru

Дьяков Филипп Кириллович – канд. техн. наук, доц. Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский просп., д. 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3041-9363>,

SPIN-код: 8439-0655,

e-mail: f.dyakov@madi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dvoeglazov Egor A. – postgraduate student, Moscow polytechnic university (38 B. Semenovskaya St., Moscow, 107023), a leading software engineer at the KAMAZ Innovation Center LLC (62 Bolshoy Boulevard, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0930-4737>,

SPIN-code: 8538-2559,

e-mail: egor11022d@yandex.ru

Kozelkov Oleg A. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Moscow polytechnic university (38 B. Semenovskaya St., Moscow, 107023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4163-3721>,

SPIN-code: 8140-1200,

e-mail: kozolkow@mail.ru

Dyakov Philip K. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI) (64 Leningradsky ave., Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3041-9363>,

SPIN-code: 8439-0655,

e-mail: f.dyakov@madi.ru

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья
УДК 69.034.96
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>
EDN: YGJBPX



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТА ИЛИ МАТЕРИАЛА ПРИ ЗАЩИТЕ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.И. Сологаев

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
sologaev_vi@cdo.sibadi.org

АННОТАЦИЯ

Введение. Проницаемость грунтов и материалов является важным параметром при защите от подтопления в городском строительстве. Любую жидкость или газ называют флюидом при фильтрационном движении через пористый грунт или материал. При защите от подтопления основной жидкостью является вода, а основным газом – воздух. В данной работе обоснована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве.

Методы и материалы. На основании фундаментальных законов проанализирована аналогия движения подземных вод и воздуха. Рассмотрен предложенный способ определения воздухопроницаемости грунтов и строительных материалов с помощью простого, но довольно надёжного прибора, который был сконструирован автором и испытан на многочисленных лабораторных опытах. Погрешность прибора не превышала 1%. В качестве сравнительного примера даны экспериментальные данные автора в виде графика воздушной фазовой проницаемости.

Обсуждение. Рассмотрены полученные результаты по методологии и практическому определению воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве, сопоставляемые с обзором последних публикаций, близких к теме исследования.

Заключение. Таким образом, в представленной работе проанализирована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или строительном материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве. Предпринятая тема исследования весьма актуальна, разработанная методология и способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов рекомендуется к практическому применению при борьбе с подтоплением в городском строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздухопроницаемость, грунт, строительный материал, защита от подтопления, городское строительство

Статья поступила в редакцию 21.05.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

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: Сологаев В.И. Определение воздухопроницаемости грунта или материала при защите от подтопления в городском строительстве // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 350-359. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>

© Сологаев В.И., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>
EDN: YGJBPX

DETERMINATION OF AIR PERMEABILITY OF SOIL OR MATERIAL IN PROTECTION FROM FLOODING IN URBAN CONSTRUCTION

Valeriy I. Sologaev

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Russia, Omsk
sologaev_vi@cdo.sibadi.org

ABSTRACT

Introduction. Permeability of soils and materials is an important parameter in flood protection in urban construction. Any liquid or gas is called a fluid when it moves by filtration through porous soil or material. In flood protection, the main liquid is water, and the main gas is air. This paper substantiates the analogy of groundwater and air movement. The main attention is paid to air filtration in soil or material. A method for determining the air permeability of soil or material for flood protection in urban construction is proposed, substantiated theoretically and tested practically.

Methods and materials. Based on fundamental laws, the analogy between underground water and air movement has been analyzed. The proposed method for determining the air permeability of soils and building materials using a simple but fairly reliable device designed by the author and tested in numerous laboratory experiments, has been considered. The error of the device did not exceed 1%. As a comparative example, the author's experimental data are given in the form of a graph of air phase permeability.

Discussion. The obtained results on the methodology and practical determination of the air permeability of soil or material for flood protection in urban construction have been considered, comparing them with a review of recent publications related to the research topic.

Conclusion. Thus, the presented work analyzes the analogy between groundwater and air movement. The main attention is paid to the filtration of air in soil or building material. A method for determining the air permeability of soil or building material for the protection against flooding in urban construction has been proposed, substantiated theoretically and tested practically. The research topic is very relevant, the developed methodology and the way of determining the air permeability of soils and building materials are recommended for practical application in the preventive actions against flooding in urban construction.

KEYWORDS: air permeability, soil, building material, flood protection, urban construction

The article was submitted: May 21, 2025; approved after reviewing: February 10, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

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. Sologaev V.I. Determination of air permeability of soil or material in protection from flooding in urban construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 350-359. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-350-359>

© Sologaev Valeriy I., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Проницаемость грунтов и материалов является важным параметром [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], особенно при защите от подтопления в городском строительстве. Любую жидкость или газ называют флюидом при фильтрационном движении через пористый грунт или материал. При защите от подтопления основной жидкостью является вода, а основным газом – воздух. В данной работе обоснована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основные расчёты и моделирование при защите от подтопления в городском строительстве обычно связаны с подземной водой и её фильтрационными течениями в пористых средах, грунтах и материалах. Иногда возникает потребность рассмотреть фильтрацию подземного воздуха, например, в системах строительного водопонижения, связанного с вакуумированием грунтов. Поэтому важно кроме проницаемости по воде знать проницаемость по воздуху.

Движение подземной воды и подземного воздуха может иметь аналогию, но есть некоторые отличия в этих процессах. Для примера рассмотрим сравнительное фильтрационное течение воды и воздуха через трубу, заполненную проницаемым грунтом или строительным материалом. Предположим, что на разных концах трубы длиной L , м, имеются разные давления воздуха p_1 и p_2 , Па, что показано на рисунке 1.

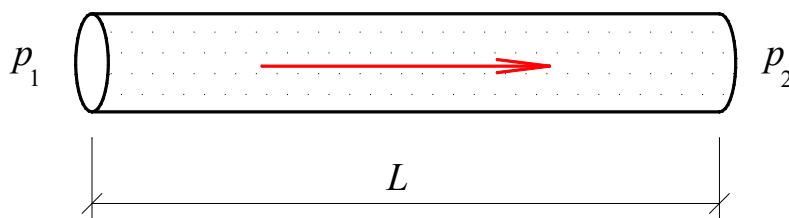


Рисунок 1 – Фильтрационное течение воздуха
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Air filtration flow
Source: completed by author.

Принимаем изотермическую фильтрацию воздуха при постоянной температуре T , К. Величины давлений воздуха близки к атмосферному давлению, поровый воздух считаем идеальным газом. Тогда по Д.И. Менделееву плотность воздуха, кг/м³:

$$\rho = p / (R_a \cdot T). \quad (1)$$

Здесь R_a – газовая константа для воздуха, Дж/(кг·К).

Расход воздуха по массе в трубе принимаем как средний арифметический на входе и выходе. Поэтому средняя плотность фильтрационного потока воздуха с учётом (1) будет

$$\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2 = (p_1 + p_2) / (2 \cdot R_a \cdot T). \quad (2)$$

По закону А. Дарси для газа скорость фильтрации воздуха в образце пористого грунта или материала в трубе, м/с:

$$V_a = k_a \cdot (p_1 - p_2) / (\mu_a \cdot L), \quad (3)$$

где k_a – коэффициент проницаемости по воздуху, м²; μ_a – динамическая вязкость порового воздуха, Па·с; остальные обозначения оговорены выше.

Массовый расход воздуха через образец, кг/с:

$$G_a = \rho \cdot \omega \cdot V_a, \quad (4)$$

где ω – площадь живого (поперечного) сечения трубы, заполненная грунтом или строительным материалом, м².

Решая совместно уравнения (1), (2), (3) и (4), выразим расход порового воздуха по массе в виде, кг/с:

$$G_a = k_a \cdot \omega \cdot (p_1^2 - p_2^2) / (2 \cdot \mu_a \cdot R_a \cdot T \cdot L). \quad (5)$$

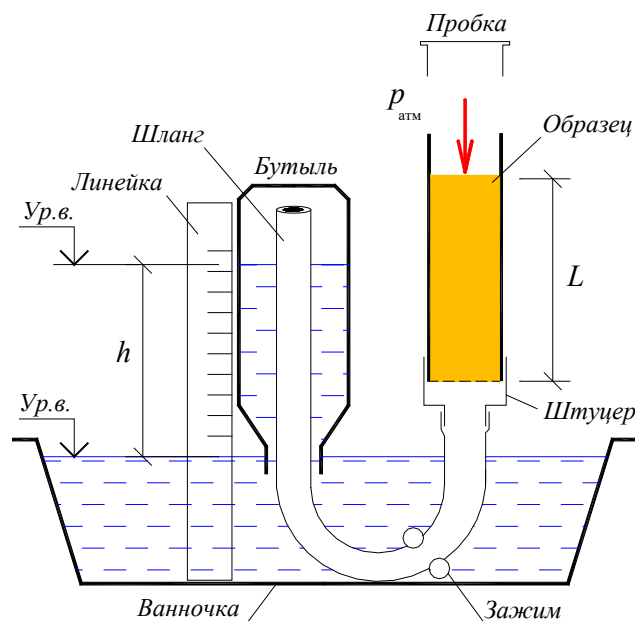


Рисунок 2 – Измерение проницаемости по воздуху
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Air permeability measurement
Source: completed by author.

На основании совместного закона Р. Бойля и Э. Мариотта о постоянстве произведения давления идеального газа на его объём в изотермических условиях выразим из формулы (5) приведённый к атмосферному давлению $p_{\text{атм}}$ объёмный расход порового воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q_a = k_a \cdot \omega \cdot (p_1^2 - p_2^2) / (2 \cdot \mu_a \cdot p_{\text{атм}} \cdot L). \quad (6)$$

Если через образец проницаемого грунта или материала в трубе (см. рисунок 1) происходит напорная фильтрация воды с напорами слева и справа соответственно H_1 , м, и H_2 , м, то по закону А. Дарси для поровой воды объёмный расход будет, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q_w = k \cdot \omega \cdot (H_1 - H_2) / L, \quad (7)$$

где k – коэффициент фильтрации в СИ, $\text{м}/\text{с}$, который в гидрогеологии обычно имеет размерность $\text{м}/\text{сут}$, переводной коэффициент в $\text{м}/\text{с}$ равен $1/86400$.

Сопоставляя формулы (6) и (7), можно убедиться в наличии аналогии фильтрации воздуха и воды, что используем в дальнейшем для обоснования способов измерения проницаемости грунтов и материалов по воде и по воз-

духу. Отметим также, что в геологии нефти и газа также рассматривают так называемые фазовые проницаемости по жидкости и по газу¹.

Рассмотрим предложенный нами способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов с помощью простого, но довольно надёжного лабораторного прибора, показанного на рисунке 2. Прибор был впервые сконструирован нами и испытан на многочисленных лабораторных опытах в лаборатории гидравлики в СибАДИ. Относительная погрешность прибора не превышала 1%.

Идея прибора, изображённого на рисунке 2, состоит в том, чтобы высотой водяного столба h , м, в бутылке создать перепад всасывающего давления за счёт вакуума. Этот перепад давлений между атмосферным давлением и давлением внутри бутылки, меньшим атмосферного, будет вызывать фильтрацию наружного воздуха в бутылку.

Наблюдая с интервальным секундомером за снижением вакуума по убыли величины h , м вод. ст., можно записать и обработать полученные экспериментальные данные, а затем рассчитать воздухопроницаемость грунта или строительного материала, чей образец помещён в испытательную трубку.

¹ Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах: монография. М.: Недра, 1984. 211 с.

Стеклянная бутылочная ёмкость (см. рисунок 2) на боковой стенке имеет градуировку по объёмам, см³. Это позволяет засекать объём входящего в бутылку порового воздуха, который поступает снаружи под влиянием разности давлений между атмосферным давлением и давлением внутри бутылки. Этот поровый воздух проходит через образец грунта или строительного материала, помещённого в испытательную трубку.

Попутно измеряем температуру воздуха в лаборатории и температуру воды в ванночке. Необходимо, чтобы эти температуры воды и воздуха были равны. Это обеспечивает повышение точности экспериментальных замеров и уменьшает погрешность прибора при определении воздухопроницаемости образца грунта или строительного материала.

Внешний диаметр эластичного армированного резинового шланга, соединяющего трубку с образцом и бутылку, был подобран меньшего размера, чем внутренний диаметр горловины бутылки (см. рисунок 2). Это обеспечило зазор между горловиной и шлангом, через который вода могла свободно стечь из бутылки в ванночку. Однако стеканию воды препятствовал вакуум во внутренней полости бутылки. В процессе опыта по определению воздухопроницаемости образца высота водяного столба h , м, в бутылке уменьшается постепенно, по мере прохождения фильтрации порового воздуха через образец в бутылку.

Трубка из стекла заполняется материалом образца (см. рисунок 2). В нижней части трубки имеется мелкая сетка, препятствующая выпадению образца под действием силы тяжести. Сверху на трубке имеется герметичная эластичная пробка, надетая на трубку до начала опыта. Снизу к трубке присоединён штуцер с уплотнением герметиком. К штуцеру присоединён эластичный резиновый шланг, снабжённый зажимом.

Первоначальная подготовка опыта по определению воздухопроницаемости образца такая. Вначале бутылку и шланг без воды, шланг заведён в бутылку. Затем бутылку переворачиваем и погружаем её горловину под уровень воды (Ур.в) примерно на глубину 1 см. Первоначально уровни воды в ванночке и бутылки совпадают по закону сообщающихся сосудов.

Далее присоединяем к шлангу ручной поршневой насос (большой шприц) и аккуратно откачиваем воздух из внутренней полости бутылки примерно до высоты $h = 0,15$ м. В ре-

зультате внутри бутылки образуется столб воды с начальной высотой $h = h_0 = 0,15$ м. Это и есть вакуум, выраженный в м вод. ст. В единицах СИ данный вакуум будет около 1500 Па.

Сразу же плотно с перегибом перекрываем зажимом шланг. Столб воды в бутылке перед началом опыта $h = 0,15$ м. Свободный конец шланга подсоединяем к штуцеру трубки с образцом (см. рисунок 2), которая со стороны входа атмосферного воздуха герметично закрыта пробкой. Аккуратно подвешиваем перечисленные компоненты на штатив, соблюдая их вертикальность вместе с измерительной линейкой. На заднем плане устанавливаем секундомер. Желательно также производить во время опыта видеосъёмку. В результате прибор по определению воздухопроницаемости образца полностью готов к проведению опыта.

Для обработки экспериментальных данных подготовим методологическую базу. Старт опыта производится открыванием зажима и пробки в одно и то же время. Начальное значение времени фильтрации воздуха через образец $t = 0$ с. Опираясь на закон (3), сформируем дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации воздуха через образец в виде

$$k_a \cdot \omega_0 \cdot \gamma_w \cdot h / (\mu_a \cdot L) = \omega_0 \cdot dh/dt. \quad (8)$$

Здесь ω_0 – площадь живого сечения образца, м²; ω_0 – площадь живого сечения внутренней полости бутылки, м²; g_w – удельный вес воды, Н/м³; L – длина пути фильтрации (длина образца), м; k_a – коэффициент воздухопроницаемости образца, м²; m_a – динамическая вязкость порового воздуха, Па·с; остальные обозначения оговорены выше.

Решая дифференциальное уравнение (8) нестационарной фильтрации воздуха через образец при краевых условиях, показанных на рисунке 2, получим формулу, позволяющую обработать результаты лабораторного эксперимента и рассчитать искомый коэффициент воздухопроницаемости грунта или строительного материала, м²:

$$k_a = \mu_a \cdot \omega_0 \cdot L \cdot \ln(h_0/h) / (\omega_0 \cdot \gamma_w \cdot t). \quad (9)$$

Полученная зависимость (9) напоминает формулу Г.Н. Каменского, используемую в гидрогеологии² для вычисления коэффициента фильтрации (по воде) с помощью так называемой «трубки Каменского».

² Коротеев А.П. Спутник гидрогеолога. М.: ОНТИ, 1934. 316 с.

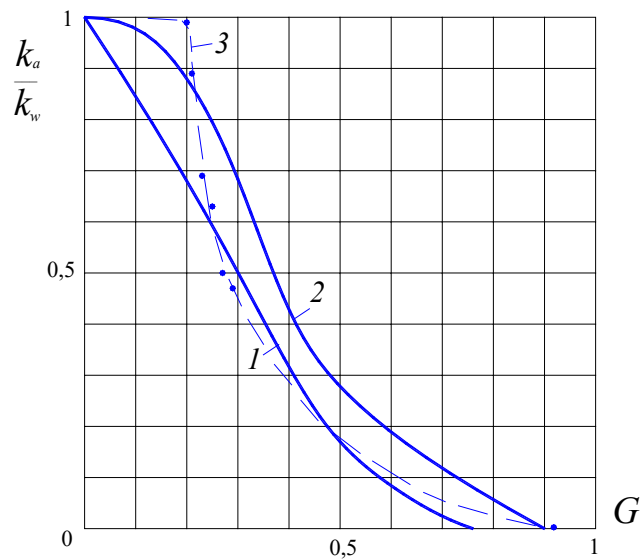


Рисунок 3 – Воздушная фазовая проницаемость: 1 – глины и суглинков³; 2 – супесей⁴; 3 – песка
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Air phase permeability: 1 – clays and loams³; 2 – sandy loams⁴; 3 – sand
Source: completed by author.

Однако для определения воздухопроницаемости формулу Г.Н. Каменского применять нельзя вследствие принципиальных отличий фильтрации воды и воздуха. Рекомендуем использовать формулу (9).

На рисунке 3 для сравнения и примера даны три графика для разных грунтов, где k_w – проницаемость по воде, м²; G – степень влажности грунта или материала. График 3 показывает результаты наших многочисленных лабораторных опытов с разработанным прибором (см. рисунок 2) по определению воздухопроницаемости речного песка. Полученные опытным путём значения воздухопроницаемости песка были проверены независимым способом. Для этого вначале для песка на приборе А. Дарси был определён коэффициент фильтрации по воде. Затем он был пересчитан к коэффициенту воздухопроницаемости. Отличие значений получилось менее 1%, что свидетельствует о надёжности прибора для определения воздухопроницаемости грунта или строительного материала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим полученные результаты по методологии и практическому определению

воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве, сопоставляя с обзором последних публикаций, близких к теме исследования.

В статье [1] исследователи из Китая разработали и представили новую систему испытания на проницаемость под высоким давлением для подземных резервуаров хранения сжатого воздуха.

В работе [2] авторы из Японии и Германии изучили проницаемость недеформированных, деформированных и/или изменённых гранитов, а также искусственной пористой керамики. Проницаемость была протестирована с помощью газозондовых пермеаметров (стационарный поток газа и переходный импульс давления).

Китайские ученые в статье [3] на основе самостоятельно разработанной экспериментальной системы изучения геофильтрации исследовали поведение потока в трещинах с различной проницаемостью, где закон Дарси нарушается. Результаты показывают, что как вязкая, так и инерционная составляющие проницаемости демонстрируют положительную корреляцию с проницаемостью трещины.

³ Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях / ВНИИ ВОДГЕО. М.: Стройиздат, 1991. 272 с.

⁴ Кристеа Н. Подземная гидравлика: монография. Т. II. М.: Гостехиздат, 1962. 492 с.

Исследователи из США [4] заявили о новом подходе к оценке проницаемости и пластового давления в течение периода после закрытия испытаний на закачку/отток, в то время как существующие методы в основном сосредоточены на диагностических испытаниях на закачку в трещину для оценки параметров геологического пласта. При этом не было разработано никаких методов для анализа периода закрытия после испытаний на закачку/отток в скважинах.

В статье [5] представлен метод определения слоистой структуры и профиля проницаемости стали с помощью импульсного вихретокового контроля, который обеспечивает лучшую проникающую способность.

Российские учёные из Сколково [6] представили новый метод оценки пространственного распределения абсолютной проницаемости в нефтяных пластах, согласующийся с измерениями каротажа скважин и испытания скважин. Основная цель – создать карту проницаемости, включив результаты интерпретации испытаний скважин и достигнув гидродинамического подобия фактическому распределению проницаемости вокруг каждой скважины. Это усовершенствование направлено на повышение точности результатов моделирования пласта при воспроизведении реальных данных.

В статье [7] авторами из Норвегии и Японии изучены подводные оползни, вызванные сейсмической активностью, представляющие значительную опасность для морских сооружений. Чтобы улучшить понимание этого явления, была разработана CFD-схема, способная моделировать механизмы, лежащие в основе подводных оползней, вызванных землетрясением. Недавние испытания на центрифуге продемонстрировали, что проницаемость морских осадков является критическим фактором в определении механизма разрушения подводных оползней. В частности, более низкая проницаемость увеличивает вероятность перехода склона от обрушения к гравитационному потоку обломков.

Исследователи из Китая и Германии [8] предложили трехмерную (3D) эталонную модель лабораторного эксперимента для изучения процесса динамического гидравлического разрыва пласта в условиях напряженного состояния. Результаты показывают, что распространение трещины связано с диффузией жидкости при высоком давлении закачки при разрушении. Фронт трещины опережает фронт давления жидкости. При низком давлении закачки после разрушения фронт давления жидкости постепенно достигает фронта

трещины, и диффузия жидкости является основным движущим фактором распространения по трещине.

В статье [9] авторов из Южной Кореи описывается комплексное исследование для точного определения гидравлической проницаемости и удельного объема образца сланца.

Авторы из Бразилии и Норвегии [10] представили материалы по испытанию проницаемости мягкой глины *in situ* (в поле) с зондом на испытательном полигоне. Приведено описание метода испытания проницаемости, обсуждаются его преимущества и недостатки, особенно в случае очень мягких глин при низких напряжениях. Поровое давление контролировалось во время установки зонда и оказалось немного ниже порового давления соответствующего положению фильтра зонда.

В исследовании китайских ученых [11] изучается нелинейное поведение потока, проходящего через трещины в бетоне при различных градиентах давления с использованием теста на водопроницаемость. Искусственные трещины были созданы и количественно оценены методом сопоставления облаков точек. Результаты показывают, что закон Дарси становится не применимым для расчета кажущейся проницаемости треснувшего бетона при высоком числе Рейнольдса. В качестве альтернативы предлагается использовать параболическое уравнение Форхгеймера для моделирования скоростей потока при различных градиентах давления.

Исследователи из Китая [12] пришли к выводу, что интенсивность осадков и проницаемость почвы склона влияют на инфильтрацию осадков и, следовательно, играют важную роль в определении режима разрушения оползней, вызванных дождями.

Ученые из Индии [13] дали новый подход к одновременному учету ключевых параметров резервуара, таких как горизонтальная проницаемость, вертикальная проницаемость, скин-фактор и граничные расстояния для пространственного распределения по ячейкам сетки в трехмерной модели резервуара с одной скважиной.

Авторы из Китая [14] пришли к выводу, что испытания на водопроницаемость являются одними из наиболее широко используемых методов для оценки ширины трещин и самовосстанавливающихся характеристик бетона. В попытке преодолеть ограничение, вызванное вязкостью воды, был предложен тест на диффузию газа, в котором газ с низкой вязкостью используется для замены воды в качестве среды. Однако, учитывая, что вода и газы ведут себя по-разному при прохождении через

трещины, эти два метода могут иметь разные характеристики при оценке ширины трещины и характеристик восстановления бетона. В исследовании были проанализированы тенденции, обнаруженные при оценке ширины трещины этими двумя методами.

В исследовании [15] авторов из Китая были проведены подземные полевые испытания закачки азота в шахте с угольными пластами с низкой проницаемостью, а также был выполнен сравнительный анализ техники инъекции азота для улучшения дегазации и дренажа.

Китайские авторы в статье [16] утверждают, что цементированный песчано-гравийный материал (ПГМ) является экологически чистым материалом для строительства плотин. Его проницаемость под нагрузкой имеет решающее значение для инженерных приложений. В этом исследовании изучается проницаемость ПГМ при осевом сжатии с помощью лабораторных экспериментов.

Авторы из США в работе [17] изучали эволюцию газопроницаемости и трещин высыхания в уплотненных бентонитовых блоках, армированных стекловолокном при 150 °С.

Исследователи из США, Японии и Египта в статье [18] резюмировали, что проницаемость и пористость являются критическими параметрами, которые влияют на оценку и управление углеводородными пластами. Традиционные методы оценки проницаемости и пористости ограничены дефицитом данных и геологической изменчивостью, что требует использования передовых прогностических моделей. В этом исследовании представлена полностью автоматизированная структура машинного обучения (AML), которая объединяет четыре передовые модели – Gradient Boosting Machine (GBM), Distributed Random Forest (DRF), Generalized Linear Model (GLM) и Deep Neural Network (DNN) – для прогнозирования проницаемости и пористости на основе данных каротажа скважин.

Авторы из Китая [19] подчеркивают, что хранение энергии с помощью сжатого воздуха в водоносных горизонтах (CAESA) является новой крупномасштабной технологией. Однако влияние проницаемости на подземные процессы и производительность устья скважины требуют дальнейшего изучения. В этом исследовании разработана сопряженная модель ствола скважины и водоносного горизонта на основе практического теста CAESA в окрестностях Дэчжоу Китая в плоских водоносных горизонтах.

В работе [20] китайских исследователей сообщено, что во время проходки щита с компенсацией давления грунта в насыщенном

водой песчаном грунте для предотвращения выброса воды впрыскиваются пена и другие реагенты, например, такие как бентонитовая суспензия. Испытания на проницаемость проводились для изучения того, как давление воды влияет на проницаемость песка, кондиционированного пеной и бентонитовой суспензией. Экспериментальные результаты показывают, что увеличение давления воды в верхней и нижней части образца продлевает начальный стабильный период коэффициента проницаемости, значительно замедляя скорость его роста.

Нетрудно заметить из приведенного обзора последних публикаций, что исследование проницаемости грунтов и материалов вызывает большой научный интерес. Однако применительно к интересующим нас вопросам, связанным с защитой от подтопления в городском строительстве, данные публикации имеют лишь косвенное отношение, возможно, за исключением статьи [14]. Тем не менее в работах затронуты интересные особенности определения проницаемости грунтов и материалов. Поэтому наша тема исследования весьма актуальна, разработанная методология и способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов рекомендуется к практическому применению при борьбе с подтоплением в городском строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в представленной работе обоснована аналогия движения подземных вод и воздуха. Основное внимание уделено фильтрации воздуха в грунте или строительном материале. Предложен, теоретически обоснован и практически опробован способ определения воздухопроницаемости грунта или материала в целях защиты от подтопления в городском строительстве. Предпринятая тема исследования весьма актуальна, разработанная методология и способ определения воздухопроницаемости грунтов и материалов рекомендуется к практическому применению при борьбе с подтоплением в городском строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shikang Qin, Shuwei Zhou, Caichu Xia, Chen Xu, Rui Liu A new testing system to the permeability coefficient of flexible sealing materials for compressed air energy storage caverns and its application // *Journal of Energy Storage*. V. 122. 2025. P. 116717. DOI: 10.1016/j.est.2025.116717
2. Scibek J., Kubo T., Koike K., Achtziger-Zupančič P. Permeability of granitic drill core tested by steady flow and transient flow gas permeameter

probes: Improvements to methods and applications // *Engineering Geology*. V. 351. 2025. P. 108023. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.108023

3. Xiang L., Li C., Meng J. Effect of matrix permeability on non-Darcian flow behavior and flow partitioning patterns in fractured porous media: Insight from experimental and numerical tests // *Journal of Hydrology*. V. 658. 2025. P. 133234. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133234

4. Eltaleb Ibrahim, Soliman Mohamed Y., Farouq Ali S.M., Cipolla Craig Estimation of permeability from pump-in/flowback tests: An after-closure analysis approach // *Fuel*. V. 381, Part B, 2025. P. 133020. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133020

5. Zheng Xinnan, She Saibo, Xia Zihan, Xiong, Xun Zou, Kuohai Yu, Rui Guo, Ruoxuan Zhu, Zili Zhang, Wuliang Yin Analyzing the permeability distribution of multilayered specimens using pulsed eddy-current testing with multi-scale 1D-ResNet // *NDT & E International*. V. 149. 2025. P. 103247. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103247

6. Kanin E., Garipova A., Boronin S., Vanovskiy V., Vainshtein A., Afanasyev A., Osiptsov A., Burnaev E. Combined mechanistic and machine learning method for construction of oil reservoir permeability map consistent with well test measurements // *Petroleum Research*. Available online, 12 September 2024. P. 1-19. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.09.001

7. Tran Quoc-Anh, Sørli Erik, Grimstad Gustav, Eiksund Gudmund, Takahashi Hidenori, Sassa Shinji Influence of sediment permeability in seismic-induced submarine landslide mechanism: CFD-MPM validation with centrifuge tests and analysis // *Computers and Geotechnics*. V. 174. 2024. P. 106588. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106588

8. Shen Haimeng, Yoon Jeoung S., Zang Arno, Hofmann Hannes, Li Xiaying, Li Qi Impact of injection pressure and polyaxial stress on hydraulic fracture propagation and permeability evolution in graywacke: Insights from discrete element models of a laboratory test // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 17. Issue 4. 2025. P. 2344-2359. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.05.017

9. Song I., Seo E. Integrating transient pressure and flow data for determination of hydraulic permeability and specific storage of a shale sample: Experimental tests and sensitivity analysis // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. V. 176. 2024. P. 105718. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105718

10. Vargas J.W.S., Danziger F.A.B., Lopes F.R., Lunne T. Inflow and outflow permeability tests in a very soft clay under low stresses // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 16. Issue 8. 2024. P. 3270-3283. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.009

11. Hou Sailong, Li Kai, Hu Xiang, Shi Caijun Exploring the nonlinear behavior of flow through cracked concrete by water permeability test // *Cement and Concrete Composites*. V. 150. 2024. P. 105557. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105557

12. Qu L., Du Q., Hui J. Model Test Study of the Influence of Rainfall Intensity and Soil Permeability on Slope Instability // *KSCE Journal of Civil Engineering*. V. 28. Issue 7. 2024. P. 2722-2737. DOI: 10.1007/s12205-024-1550-1

13. Kumar A., Liang L., Ojha K. Simultaneous inversion of permeability, skin and boundary from pressure transient test data in three-dimensional single well reservoir model // *Petroleum Research*. V. 9. Issue 2. 2024. P. 265-272. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.01.004

14. Lee D., Shin K., Lee K. Evaluation of crack width and self-healing performance of concrete based on fluid flow characteristics: Comparison between water permeability test and gas diffusion test // *Construction and Building Materials*. V. 411. 2024. P. 134118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134118

15. Wang Kai, Gong Haoran, Wang Gongda, Yang Xin, Xue Haiteng, Du Feng, Wang Zhie N2 injection to enhance gas drainage in low-permeability coal seam: A field test and the application of deep learning algorithms // *Energy*. V. 290. 2024. P. 130010. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130010

16. Han Liwei, Guo Ruibin, Zhang Yifan, Li Jiayu, Yao Xinyuan Cementitious sand gravel material: Influence of axial compressive load on permeability performance // *Case Studies in Construction Materials*. V. 22. 2025. P. e04643. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04643

17. Dong-Hwa Noh, Seunghee Kim, Jongwan Eun, Yong-Rak Kim Experimental study on gas permeability and desiccation cracking of fiber-reinforced compacted bentonite at high temperature // *Construction and Building Materials*. V. 478. 2025. P.141053. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141053

18. Amer A. Shehata, Mohamed Ahmed, Ahmed A. Kassem, Ramadan Abdelrehim, Takeshi Tsuji, Amir Ismail Optimizing permeability and porosity prediction with advanced machine learning: A case study unlocking the complexities of late cretaceous reservoirs, gulf of suez, Egypt // *Journal of African Earth Sciences*. V. 228. 2025. P. 105670. DOI: 10.1016/j.jafrsci.2025.105670

19. Yi Li, Ping Xue, Yi Li, Yaning Liu, Jingrui Wang, Wenjie Yin Modeling underground performance of compressed air energy storage in a practical flat aquifer: Insights on the permeability effects // *Energy*. V. 322. 2025. P. 135592. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135592

20. Shuying Wang, Fanlin Ling, Qinxin Hu, Tongming Qu, Junlong Shang Effect of water pressure on time-dependent permeability characteristics of sand conditioned with foam and bentonite slurry // *Canadian Geotechnical Journal*. V. 62. 2025. P. 101. DOI: 10.1139/cgj-2023-0497

REFERENCES

1. Shikang Qin, Shuwei Zhou, Caichu Xia, Chen Xu, Rui Liu A new testing system to the permeability coefficient of flexible sealing materials for compressed air energy storage caverns and its application. *Journal of Energy Storage*. V. 122. 2025; P. 116717. DOI: 10.1016/j.est.2025.116717

2. Scibek J., Kubo T., Koike K., Achtziger-Zupančič P. Permeability of granitic drill core tested by steady flow and transient flow gas permeameter probes: Improvements to methods and applications. *Engineering Geology*. V. 351. 2025; P. 108023. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.108023

3. Xiang L., Li C., Meng J. Effect of matrix permeability on non-Darcian flow behavior and flow partitioning patterns in fractured porous media: Insight

from experimental and numerical tests. *Journal of Hydrology*. V. 658. 2025; P. 133234. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133234

4. Eltaleb Ibrahim, Soliman Mohamed Y., Farouq Ali S.M., Cipolla Craig Estimation of permeability from pump-in/flowback tests: An after-closure analysis approach. *Fuel*. V. 381, Part B, 2025; P. 133020. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133020

5. Zheng Xinnan, She Saibo, Xia Zihan, Xiong Lei, Zou Xun, Yu Kuohai, Guo Rui, Zhu Ruoxuan, Zhang Zili, Yin Wuliang. Analyzing the permeability distribution of multilayered specimens using pulsed eddy-current testing with multi-scale 1D-ResNet. *NDT & E International*. V. 149. 2025; P. 103247. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103247

6. Kanin E., Garipova A., Boronin S., Vanovskiy V., Vainshtein A., Afanasyev A., Osiptsov A., Burnaev E. Combined mechanistic and machine learning method for construction of oil reservoir permeability map consistent with well test measurements. *Petroleum Research. Available online*, 12 September 2024; P. 1-19. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.09.001

7. Tran Quoc-Anh, Sørli Erik, Grimstad Gustav, Eiksund Gudmund, Takahashi Hidenori, Sassa Shinji Influence of sediment permeability in seismic-induced submarine landslide mechanism: CFD-MPM validation with centrifuge tests and analysis. *Computers and Geotechnics*. V. 174. 2024; P. 106588. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106588

8. Shen Haimeng, Yoon Jeoung S., Zang Arno, Hofmann Hannes, Li Xiaying, Li Qi Impact of injection pressure and polyaxial stress on hydraulic fracture propagation and permeability evolution in graywacke: Insights from discrete element models of a laboratory test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 17. Issue 4. 2025; P. 2344-2359. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.05.017

9. Song I., Seo E. Integrating transient pressure and flow data for determination of hydraulic permeability and specific storage of a shale sample: Experimental tests and sensitivity analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. V. 176. 2024. P. 105718. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105718

10. Vargas J.W.S., Danziger F.A.B., Lopes F.R., Lunne T. Inflow and outflow permeability tests in a very soft clay under low stresses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 16. Issue 8. 2024; P. 3270-3283. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.009

11. Hou Sailong, Li Kai, Hu Xiang, Shi Caijun Exploring the nonlinear behavior of flow through cracked concrete by water permeability test. *Cement and Concrete Composites*. V. 150. 2024; P. 105557. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105557

12. Qu L., Du Q., Hui J. Model Test Study of the Influence of Rainfall Intensity and Soil Permeability on Slope Instability. *KSCE Journal of Civil Engineering*. V. 28. Issue 7. 2024; P. 2722-2737. DOI: 10.1007/s12205-024-1550-1

13. Kumar A., Liang L., Ojha K. Simultaneous inversion of permeability, skin and boundary from pressure transient test data in three-dimensional single well reservoir model. *Petroleum Research*. V. 9. Issue 2. 2024; P. 265-272. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.01.004

14. Lee D., Shin K, Lee K. Evaluation of crack width and self-healing performance of concrete based on fluid flow characteristics: Comparison between water permeability test and gas diffusion test. *Construction and Building Materials*. V. 411. 2024; P. 134118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134118

15. Wang Kai, Gong Haoran, Wang Gongda, Yang Xin, Xue Haiteng, Du Feng, Wang Zhie N2 injection to enhance gas drainage in low-permeability coal seam: A field test and the application of deep learning algorithms. *Energy*. V. 290. 2024; P. 130010. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130010

16. Han Liwei, Guo Ruibin, Zhang Yifan, Li Jiayu, Yao Xinyuan Cementitious sand gravel material: Influence of axial compressive load on permeability performance. *Case Studies in Construction Materials*. V. 22. 2025; P. e04643. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04643

17. Noh Dong-Hwa, Kim Seunghee, Eun Jongwan, Kim Yong-Rak Experimental study on gas permeability and desiccation cracking of fiber-reinforced compacted bentonite at high temperature. *Construction and Building Materials*. V. 478. 2025; P.141053. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141053

18. Amer A. Shehata, Mohamed Ahmed, Ahmed A. Kassem, Ramadan Abdelrehim, Takeshi Tsuji, Amir Ismail Optimizing permeability and porosity prediction with advanced machine learning: A case study unlocking the complexities of late cretaceous reservoirs, gulf of suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. V. 228. 2025; P. 105670. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2025.105670

19. Li Yi, Xue Ping, Li Yi, Liu Yanning, Wang Jingrui, Yin Wenjie Modeling underground performance of compressed air energy storage in a practical flat aquifer: Insights on the permeability effects. *Energy*. V. 322. 2025; P. 135592. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135592

20. Wang Shuying, Ling Fanlin, Hu Qinxin, Qu Tongming, Shang Junlong Effect of water pressure on time-dependent permeability characteristics of sand conditioned with foam and bentonite slurry. *Canadian Geotechnical Journal*. V. 62. 2025; P. 101. DOI: 10.1139/cgj-2023-0497

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сологаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф. ВАК РФ, проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), (644050, г. Омск, пр. Мира 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-код: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sologaev Valery Ivanovich – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, Professor of Civil Engineering Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-code: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org

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, 20–50 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 принимает 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, указывается индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10пт).

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, слева 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 <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи курсивом (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 150 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «АННОТАЦИЯ» прописными буквами (шрифт полужирный, 10пт); 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/грантовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. **Основной текст статьи** излагается на русском или английском языках (шрифт Ariel (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 представлены 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.

8. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–50 источников. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20. Источники, опубликованные в научных журналах, индексируемых в международных базах данных – 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, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, ORCID iD, SPIN-код, Scopus Author ID, ResearcherID, электронная почта, телефон.

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 предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисуночной 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 правому краю, а иллюстрации – подрисуночные подписи, выравнивание по правому краю). 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 предоставляются 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 принятыми 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 присылаемых 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. Корректур статей авторам не высылаются, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются 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.